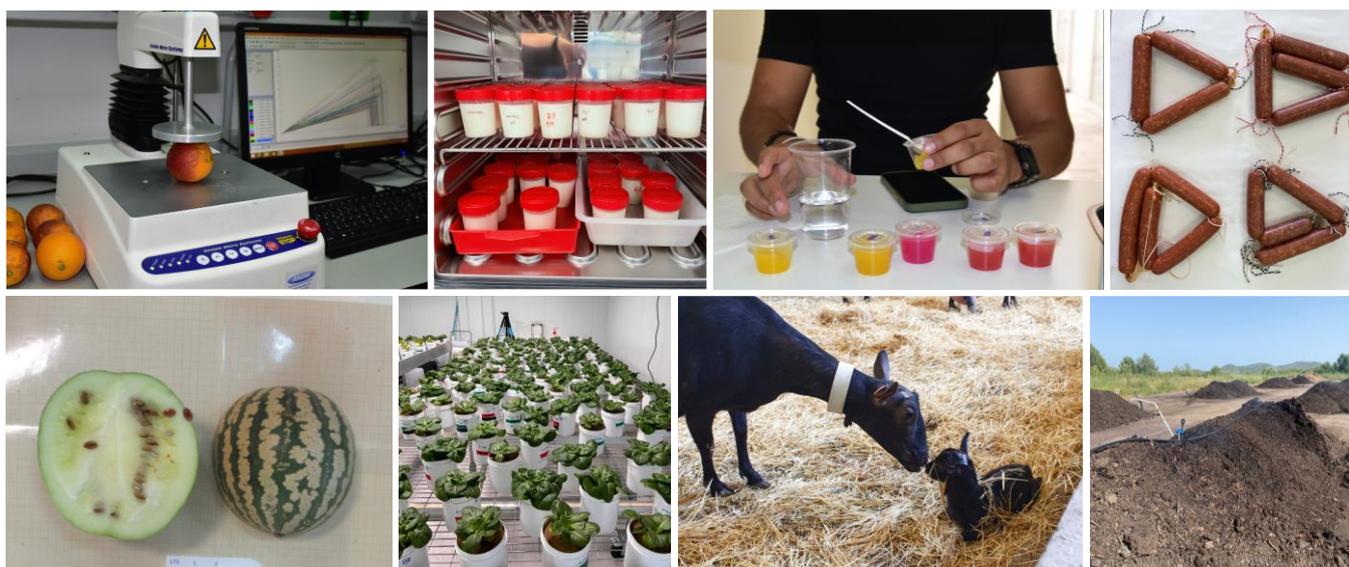


Actas del V Congreso Universitario Internacional en Innovación y Sostenibilidad Agroalimentaria–2024



Editores: Dr. Santiago García Martínez y Dra. María Serrano Mula



Actas del V Congreso Universitario Internacional en Innovación y Sostenibilidad Agroalimentaria – 2024

Editores:

Dr. Santiago García Martínez y Dra. María Serrano Mula

ISBN:

978-84-09-67196-0

DOI:

10.21134/PUMH.1960

Fecha de edición:

16/12/2024

Editorial:

Limencop, S.L. Alicante (España)

Maquetación:

Servicio de Innovación y Planificación Tecnológica (SIPT)

La Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO) y el Centro en Investigación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO) de la Universidad Miguel Hernández de Elche, en su afán de promover el intercambio de conocimiento entre los estudiantes y jóvenes investigadores ha organizado el **V Congreso Universitario Internacional en Innovación y Sostenibilidad Agroalimentaria** (CUIISA), celebrado los días 17, 18 y 19 de septiembre de 2024, en modalidad dual (presencial y on line).

En este congreso se inscribieron 131 participantes y se presentaron 94 comunicaciones, 71 de forma oral y 23 como póster, por jóvenes investigadores, pertenecientes a estudios de Grado, Máster y Doctorado, o recientemente doctorados. La mayoría de los participantes en este congreso han sido españoles, aunque también había participantes de Ecuador, México, Chile, Colombia, Italia y Polonia.

Las comunicaciones se presentaron en 8 sesiones temáticas que abarcaron diferentes aspectos de la producción agrícola y ganadera, los recursos genéticos, las técnicas de producción más novedosas, hasta el aprovechamiento de subproductos y la economía de las empresas agroalimentarias, siempre desde un punto de vista medioambiental y sostenible y con especial énfasis en la producción de productos de excelente calidad y con beneficios para la salud de los consumidores.

Una vez más, queremos destacar la elevada calidad científica de las comunicaciones presentadas en el congreso y que se recogen en la presente publicación, que según se desprende de su título, es la tercera de una larga serie de futuros congresos.

Dr. Santiago García Martínez (Presidente del Comité Organizador)

Dra. María Serrano Mula (Presidenta del Comité Científico)

COMITÉ ORGANIZADOR

Presidente: Dr. Santiago García Martínez

Secretaria: Dra. Gema Romero Moraleda

Secretaría Administrativa: Oficina de Congresos UMH

Vocales:

Dr. Juan Martínez Tomé, CIAGRO-UMH

Dr. Francisco Javier Andreu Rodríguez, CIAGRO-UMH

Dra. María José Argente Carrascosa, CIAGRO-UMH

Dña. Irene Arias Navarro, CIAGRO-UMH

Dr. Salvador Castillo García, CIAGRO-UMH

Dra. Juana Fernández López, CIAGRO-UMH

Dra. María Teresa Ferrández García, CIAGRO-UMH

Dr. Manuel Ferrández-Villena García, CIAGRO-UMH

Dr. Antonio Martínez Gabarrón, EPSO-UMH

Dra. M^a Luz García Pardo, CIAGRO-UMH

Dr. Luis Noguera Artiaga, CIAGRO-UMH

Dra. M^a Desamparados Melian Navarro, CIAGRO-UMH

Dr. Raúl Moral Herrero, CIAGRO-UMH

Dra. Concepción Paredes Gil, CIAGRO-UMH

Dr. Antonio Ruiz Canales, CIAGRO-UMH

Dra. Esther Sendra Nadal, CIAGRO-UMH

Dr. Manuel Viuda Martos, CIAGRO-UMH

Dr. Pedro Javier Zapata Coll, CIAGRO-UMH

Comité Científico:

Presidenta: Dra. María Serrano Mula CIAGRO-UMH

Dr. Nawaf Abu-Khalaf, Palestine Technical University-Kadoorie

Dr. Alessio Alegra, Universidad de Palermo

Dr. Julián Bartual Martos, Estación Experimental Agraria de Elche

Dra. Marina Cano Lamadrid, EPSO-UMH

Dr. Salvador Castillo García, CIAGRO-UMH

Dr. Carlos Sandoval Castro, UADY México

Dra. Jacinta Collado González, IMIDA Murcia

Dr. José Enrique Cos Terrer, IMIDA Murcia

Dra. M^a Dolores de Miguel Gómez, UPCT
Dra. Concepción Fabeiro Cortés, Universidad de Castilla La Mancha
Dra. M^a Ángeles Fernández Zamudio, IVIA Valencia
Dra. María José Frutos Fernández, CIAGRO-UMH
Dr. Alejandro Galindo Egea, IMIDA-Murcia
Dra. Purificación García Segovia, UPV
Dr. Iván García Tejero, IFAPA
Dra. María Dolores Garrido Fernández, Universidad de Murcia
Dra. Francisca Hernández García, CIAGRO-UMH
Dr. Juan Fernando Hidalgo Cordero, Universidad de Cuenca, Ecuador
Dr. José Manuel Lorenzo Rodríguez, Universidad de Vigo
Dra. Ana Martí de Olives, EPSO-UMH
Dra. Laura Martínez-Carrasco Martínez, CIAGRO-UMH
Dr. Pedro José Martínez García, CEBAS-CSIC, Murcia
Dra. M^a Encarnación Martínez Sabater, CIAGRO-UMH
Dra. M^a Dolores de Miguel Gómez, UPCT
Dr. José Miguel Molina Martínez, UPCT
Dra. Casilda Navarro Rodríguez de Vera, CIAGRO-UMH
Dr. José Ángel Pérez Álvarez, CIAGRO-UMH
Dra. Aurelia Pérez Espinosa, CIAGRO-UMH
Dra. Herminia Puerto Molina, CIAGRO-UMH
Dr. José Antonio Sáez Tovar, CIAGRO-UMH
Dra. Armida Sánchez Escalante, CIAD, México
Dr. Daniel Valero Garrido, CIAGRO-UMH
Dr. Pedro Javier Zapata Coll, CIAGRO-UMH

Índice

<u>Horticultura, Citricultura, Fruticultura, Viticultura y Protección de Cultivos</u>	15
Estudio comparativo de feromonas de agregación del picudo negro de la platanera (<i>Cosmopolites sordidus</i> Germar).	
<i>M. Paris, P. Guirao Moya, S. Perera González, T. Pérez Perdomo y A. Piedra-Buena Díaz.</i>	17
Estudio de los cambios fisiológicos durante el desarrollo de Finger lime (<i>Citrus australasica</i> L.).	27
<i>A. M. Solivella-Poveda, P. J. Zapata y M. J. Giménez.</i>	
Efecto de tratamientos pre-cosecha con sorbitol sobre la calidad y producción de nectarina cv. Garcima.	
<i>A. Guirao, A. Solana-Guilabert, J. M. Valverde, H. M. Díaz-Mula y D. Martínez-Romero.</i>	38
<u>Recursos Fitogenéticos, Mejora, Biotecnología y Producción Vegetal</u>	45
Estudio de la diversidad genética en almendro (<i>Prunus dulcis</i> (Miller) D.A. Webb)	47
<i>F. J. Gómez-López, F. Dicenta y P. J. Martínez.</i>	
Recursos genéticos en auyama (<i>Cucurbita moschata</i> Duchesne ex Lam.) para apoyar los sistemas de producción sostenibles. Una revisión.	57
<i>J. Ortiz y S. García-Martínez.</i>	
Influencia factores edafológicos en los índices de vegetación y su impacto en la productividad y calidad del aguacate (<i>Persea americana</i> Mill.)	67
<i>A. Morillo-De los Santos, M. Serrano, D. Martínez-Romero y D. Valero.</i>	
<u>Economía Agraria. Usos del Territorio y Desarrollo Rural. Agricultura Sostenible y Cambio Climático</u>	79
Keynote: Utilización de Python como lenguaje de desarrollo de aplicaciones WEB para la monitorización y almacenamiento de datos de narices electrónicas.	81
<i>Juan J. Pérez-Solano y Antonio Ruiz-Canales</i>	
Valoración económica de la producción de aguacate: análisis de la estructura productiva y socioeconómica, rentabilidad, cadena de valor e impacto ambiental.	82
<i>C. A. Martínez-Mateo y D. B. López-Lluch.</i>	

Obtención de suelos dotacionales en el Plan General de Ordenación Urbana de Torrevieja a partir de jurisprudencia del Tribunal Supremo.	94
<i>V. M. Costa y A. Melián.</i>	
Análisis de la demanda social de la marca Territorio Sierra Espuña (Región de Murcia).	104
<i>M. I. Rodríguez-Valero, G. Martínez-García, J. A. Albaladejo-García y J. M. Martínez-Paz.</i>	
Propuesta de zonificación del suelo rural en el término municipal de Alicante.	111
<i>F. Nieto y A. Melian.</i>	
Percepción ciudadana del nivel de bienestar y la falta de oportunidades de las zonas rurales de la Región de Murcia.	118
<i>G. Martínez-García, F. Martínez-Carrasco y J. M. Martínez-Paz.</i>	
Prototipo analítico para el proceso de extracción de aceite de lechuga cultivada por método hidropónico con fines industriales.	127
<i>J. E. Tierradentro Cruz, J. M. Méndez Sayago y G. Vera Rizzo.</i>	
Revisión sistemática sobre pago por servicios ambientales para el desarrollo socioeconómico con sistemas agrosilvopastoriles en zonas degradadas de República Dominicana.	140
<i>J. Segura, F. Del Campo-Gomis y A. Agulló-Torres.</i>	
Diseño e implementación de una granja hidropónica residencial en vecindario de Bogotá: Un enfoque hacia ciudades y comunidades sostenibles.	146
<i>J. E. Tierradentro Cruz, J. M. Méndez Sayago y G. Vera Rizzo.</i>	
Predicción de la producción de cacao en Santander mediante Modelos de Machine Learning en Python.	155
<i>J. E. Tierradentro-Cruz, J. M. Méndez Sayago y G. Vera Rizzo.</i>	
Nuevas estrategias basadas en biodiversidad y teledetección para reducir el uso de fertilizantes nitrogenados en la zona del mediterráneo.	164
<i>J. Muñoz-Acero, H. Puerto, L. Yabor, S. Pardo-Pina, F. García-Sánchez y J. M. Cámara-Zapata.</i>	
<u>AGROALNEX</u>	171
AGROALNEXT 2022/048. Gemelo digital para el control climático en invernadero: Caso de uso en la producción de <i>Cannabis sativa</i> .	173
<i>S. Pardo-Pina, J. M. Cámara-Zapata, J. Muñoz-Acero, S. Alcañiz-Lucas y F. J. Ferrández-Pastor.</i>	
Estudio de marcadores sanguíneos en conejos machos seleccionados por resiliencia.	180
<i>D. Serrano-Jara, M. J. Argente y M. L. García.</i>	

Evaluación agronómica de nuevos biofertilizantes pelletizados de base orgánica en un cultivo en condiciones controladas de rye-grass (<i>Lolium perenne</i> L.).	184
<i>S. Sánchez Méndez, L. Orden y R. Moral.</i>	
<u>Postcosecha y Procesado de Productos Vegetales</u>	191
Uso de la espectroscopía NIR para determinar el estado de madurez interno de la naranja sanguina.	193
<i>M. V. Pérez, S. Castillo-Gironés, D. Valero, S. Castillo y M. Serrano.</i>	
Efecto de la aplicación precosecha de ácido clorogénico en naranja Navel Late Powell.	204
<i>V. Torres-Vincent y P. Zapata-Coll.</i>	
Efecto del tratamiento precosecha de sorbitol sobre la calidad de <i>Prunus persica</i> (L). Batsch durante su periodo de conservación postcosecha.	214
<i>A. Solana-Guilabert, A. Guirao, H. M. Díaz-Mula, J. M. Valverde y D. Martínez-Romero.</i>	
Efecto de los tratamientos pre-cosecha con ácido cítrico en la calidad postcosecha de los pomelos ‘Star ruby’.	222
<i>J. A. Espinosa, V. Serna-Escolano y P. J. Zapata.</i>	
Factores determinantes de la presencia de cadmio en aguacates (<i>Persea americana</i> L.) en la provincia de Pedernales y en cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) en las provincias Duarte (San Francisco de Macorís) y Monte Plata, República Dominicana.	230
<i>C. A. G. Castillo Vicioso, E. Valero Cases, L. V. Peña, D.A. Montes, D. Oca y M. J. Frutos.</i>	
Factores que afectan la calidad post cosecha de la cebolla en la República Dominicana: posibles herramientas para mejorar la calidad.	240
<i>A. Avilés-Quezada, D. Martínez-Romero, M. E. García-Pastor, J. Pastor, H. M. Díaz-Mula y L. Matos-Casado.</i>	
<u>Alimentación Funcional, Calidad Sensorial y Salud</u>	253
Studying the effect of mastication on bolus properties and in vitro starch digestibility of pulse-based pasta.	255
<i>S. Ribes, M. Arnal, L. Salcedo, y P. Talens.</i>	
Digestibilidad proteica y bioaccesibilidad del hierro de harinas de frijol negro hidrolizadas con un extracto de subproductos de la piña.	263
<i>M. Arnal, L. P. Flores-Prado, A. S. Hernández-Cázares, L. Mora y P. Talens.</i>	
Obtención de bacteriocinas de <i>L. plantarum</i> y <i>L. lactis</i> y actividad inhibitoria frente a <i>S. aureus</i> resistente causante de mastitis bovina.	272
<i>F. Aquino De La Cruz, E. Valero-Cases y M. J. Frutos.</i>	

<i>Moringa oleífera</i> como ingrediente potencial en productos de panadería. <u>C. Belmar-Moya, E. Sayas-Barberá y C. Navarro-Rodríguez de Vera.</u>	280
<u>Gestión y Valorización de Residuos Orgánicos en la Agricultura</u>	288
Tableros de paja de arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) usando residuo de piel de patata como aglutinante. <u>M. Martínez-Fernández, M.T. Ferrández-García, M. Ferrández-Villena.</u>	290
Situación de los sectores lácteo, agrícola y ganadero en pequeñas poblaciones del cantón Mocha (Ecuador). <u>S. Ramos-Romero, I. Gavilanes-Terán, J. Idrovo-Gavilanes, J. Idrovo-Novillo, Víctor Valverde-Orozco y C. Paredes.</u>	300
Ejemplo de gestión sostenible mediante agrocompostaje de los residuos de almazara en una planta de la Comunidad Valenciana. <u>N. Manrique, C. Álvarez-Alonso, S. Sánchez-Méndez, C. Gómez, E. Agulló, A. García-Rández, V. Blay, I. Irigoien, M. López, R. Moral, M. D. Pérez-Murcia, M. Á. Bustamante.</u>	310
Alternativas de gestión, tratamiento y valorización de los lixiviados procedentes de la disposición de residuos sólidos urbanos. <u>C. Díaz y C. Paredes.</u>	315
Suelos enmendados con compost obtenidos mediante compostaje descentralizado: evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero. <u>C. Álvarez-Alonso, M. D. Pérez-Murcia, N. Manrique, S. Sánchez-Méndez, L. Orden, J. Saez-Tovar, F. J. Andreu, I. Irigoien, M. López, R. Moral y M. A. Bustamante.</u>	323
Análisis del aprovechamiento de las podas del naranjo (<i>Citrus sinensis</i>) en la fabricación de tableros de partículas. <u>B. E. Ferrández-García, M. T. Ferrández-García, T. García-Ortuño y M. Ferrández-García.</u>	330
Valorización de la pulpa de café (<i>Coffea arabica</i>) como ingrediente funcional: una revisión sistemática de su potencial y aplicaciones en la República Dominicana. <u>K. A. Alcántara, D. Martínez-Romero, M. H. Díaz-Mula, F. De La Rosa, J. Castillo, M. E. García-Pastor y D. Valero.</u>	337
<u>Producción, Bienestar, Genética y Calidad en la Producción Animal</u>	348
Valorización de subproductos de granada Mollar de Elche y Wonderful ensilado para su uso en alimentación de rumiantes. <u>M. Cutillas, M. Gálvez-López, I. M. Ilea, A. Navarro, G. Romero y J. R. Díaz.</u>	350
La inclusión de hasta un 15% de subproducto de granada ensilado en la ración de cabras lecheras mantiene la producción y macro-composición de leche. <u>A. Navarro, G. Romero, M. Gálvez-López, A. Roca, M. Ramón, C. Peris y J. R. Díaz.</u>	359

La inclusión de hasta un 12% de orujo de uva tinta en la ración, no causa efecto sobre índices productivos, calidad de la leche y RCS en caprino lechero.	369
<i>M. Gálvez-López, G. Romero, E. Pérez, R. Muelas, N. Fernández y J. R. Díaz.</i>	
Estudio de marcadores plasmáticos relacionados con el bienestar animal en conejos.	376
<i>F. M. Silfa y M. J. Argente.</i>	
Estudio del peso del gazapo en las primeras horas de vida.	384
<i>M. Sáez Torregrosa, J. Gálvez Lorente y M. J. Argente.</i>	
<u>Procesado e Innovación de Productos de Origen Animal</u>	390
Efecto de la <i>Moringa oleifera</i> sobre la calidad de las hamburguesas de cerdo.	392
<i>M. Padilla, C. Navarro-Rodríguez de Vera y E. Sayas-Barberá.</i>	
Influencia de la humedad y condiciones de extrusión en las propiedades de proteínas hidrolizadas de guisante para la fabricación de análogos cárnicos.	402
<i>A. Greco, M. D. Garrido e I. Peñaranda.</i>	
Efecto de la inclusión de brácteas de alcachofa en la dieta de cabras Murciano-Granadinas en la calidad de leches fermentadas.	413
<i>J. Galindo-Espinosa, E. Sendra-Nadal y R. Muela-Domingo.</i>	
Valorización energética de aguas y lodos de matadero.	425
<i>L. Ballesteros y M. Pérez.</i>	

Índice de autores

<i>Autor</i>	<i>Páginas*</i>
A. Agulló-Torres	140
E. Agulló	310
J. A. Albaladejo-García	104
K. A. Alcántara	337
S. Alcañiz-Lucas	173
C. Álvarez-Alonso	310, 323
F. J. Andreu	323
M. J. Argente	180, 376, 384
M. Arnal	255, 263
F. Aquino De La Cruz	272
A. Avilés-Quezada	240
L. Ballesteros	425
C. Belmar-Moya	280
V. Blay	314
M. Á. Bustamante	310, 323
J. M. Cámara-Zapata	164, 173
J. Castillo	337
S. Castillo-Gironés	193
S. Castillo	193
C. A. G. Castillo Vicioso	230
V. M. Costa	94
M. Cutillas	350
F. Del Campo-Gomis	140
F. De La Rosa	337
C. Díaz	315
H. M. Díaz-Mula	38, 214, 240, 337
J. R. Diaz	350, 359, 369
F. Dicenta	47
J. A. Espinosa	222
B. E. Ferrández-García	330
F. J. Ferrández-Pastor	173
M. Ferrández-García	330
N. Fernández	369
M.T. Ferrández-García	290, 330
M. Ferrández-Villena	290
L. P. Flores-Prado	263
M. J. Frutos	230, 272
J. Galindo-Espinosa	413
J. Gálvez Lorente	384
M. Gálvez-López	350, 359, 369
A. García-Rández	310
F. García-Sánchez	164
M. E. García-Pastor	240, 337
M. L. García	180
S. García-Martínez	57
T. García-Ortuño	330
M. D. Garrido	402
I. Gavilanes-Terán	300
M. J. Giménez	27
C. Gómez	310

F. J. Gómez-López	47
A. Guirao	214
P. Guirao Moya	17, 38
A. Greco	402
A. S. Hernández-Cázares	263
J. Idrovo-Gavilanes	300
J. Idrovo-Novillo	300
I. M. Ilea	350
I. Irigoien	310, 323
D. B. López-Lluch	82
M. López	310, 323
N. Manrique	310 , 323
C. A. Martínez-Mateo	82
D. Martínez-Romero	38, 67, 214, 240, 337
F. Martínez-Carrasco	118
G. Martínez-García	104, 118
J. M. Martínez-Paz	104, 118
M. Martínez-Fernández	290
P. J. Martínez	47
L. Matos-Casado	240
A. Melián	94, 111
J. M. Méndez Sayago	127, 146, 155
D.A. Montes	230
L. Mora	263
R. Moral	184, 310, 323
A. Morillo-De los Santos	67
R. Muelas	369
R. Muela-Domingo	413
J. Muñoz-Acero	164 , 173
A. Navarro	350, 359
C. Navarro-Rodríguez de Vera	280, 392
F. Nieto	111
D. Oca	230
L. Orden	184, 323
J. Ortiz	57
M. Padilla	392
S. Pardo-Pina	164, 173
C. Paredes	300, 315
M. Paris	17
J. Pastor	240
L. V. Peña	230
I. Peñaranda	402
S. Perera González	17
E. Pérez	369
M. V. Pérez	193
M. D. Pérez-Murcia	310, 323
M. Pérez	425
T. Pérez Perdomo	17
Juan J. Pérez-Solano	81
C. Peris	359
A. Piedra-Buena Díaz	17
H. Puerto	164
M. Ramón	359
S. Ramos-Romero	300
S. Ribes	255

A. Roca	359
M. I. Rodríguez-Valero	104
G. Romero	350, 359, 369
Antonio Ruiz-Canales	81
M. Sáez Torregrosa	384
J. Sáez-Tovar	323
L. Salcedo	255
S. Sánchez Méndez	184 , 310, 323
E. Sayas-Barberá	280, 392
J. Segura	140
E. Sendra-Nadal	413
V. Serna-Escolano	222
D. Serrano-Jara	180
M. Serrano	67, 193
A. Solana-Guilabert	38, 214
A. M. Solivella-Poveda	27
F. M. Silfa	376
P. Talens	255, 263
J. E. Tierradentro Cruz	127 , 146, 155
V. Torres-Vincent	204
D. Valero	67, 193, 337
E. Valero Cases	230, 272
J. M. Valverde	38, 214
Víctor Valverde-Orozco	300
G. Vera Rizzo	127, 146, 155
L. Yabor	164
P. Zapata-Coll	204
P. J. Zapata	27, 222

**En negrita artículo como autor principal*

Horticultura, Citricultura, Fruticultura, Viticultura y Protección de Cultivos

Estudio comparativo de feromonas de agregación del picudo negro de la platanera (*Cosmopolites sordidus*, Germar)

M. Paris¹, P. Guirao Moya², S. Perera González³, T. Pérez Perdomo⁴, A. Piedra -Buena Díaz⁵

¹ Universidad Miguel Hernández, Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Ctra. de Beniél, km 3,2, 03312 Orihuela (Alicante, España), paris_mihaela@yahoo.com

² Universidad Miguel Hernández, Escuela Politécnica Superior de Orihuela, Dpto. de Producción Vegetal y Microbiología, Ctra. de Beniél, km 3,2, 03.312 Orihuela (Alicante, España), pedro.guirao@umh.

³ Servicio Técnico de Agricultura y Desarrollo Rural, Cabildo Insular de Tenerife, c/Alcalde Mandillo 8, 4ª pl, 38007, Santa Cruz de Tenerife (España), sperera@tenerife.es

⁴ Contratado TRAGSATEC-Cabildo Insular de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife (España), tperez4@tragsa.es

⁵ Unidad Protección Vegetal, Instituto Canario de Investigaciones Agrarias, ctra. El Boquerón s/n 38270, Valle de Guerra (San Cristóbal de La Laguna, España), apbuena@icia.es

Resumen

Para el cultivo de la platanera el picudo negro (*Cosmopolites sordidus*) (Germar) (Coleoptera; Dryophthoridae) representa una de las plagas más importantes, causando graves pérdidas económicas tanto directas, al producir un descenso de la producción, como indirectas, debido a los costes que genera su control. Entre los métodos de monitoreo del picudo más utilizados se encuentra el uso de trampas cebadas con feromonas de agregación. En este estudio, realizado en la finca La Quinta Roja, municipio de Garachico en la isla de Tenerife, se evaluó la eficacia de ocho difusores comerciales conteniendo feromonas de agregación de *C. sordidus* (CosmoPlus®, Cosmolure®, Aomi® Cosmopol, ECOSordidina 90-k, Pherodis, SEDQ, Econex 90, Sordi Pro Press®). El diseño del ensayo fue de bloques al azar con cuatro repeticiones. La distancia entre trampas fue de 10 m. Las capturas se registraron semanalmente y las trampas se rotaron cada 14 días dentro de los bloques. La duración del ensayo fue de 90 días. Los resultados obtenidos mostraron que las medias más elevadas de capturas se registraron con Cosmolure®, Aomi® Cosmopol y Pherodis, aunque los análisis estadísticos no revelaron diferencias significativas respecto a los demás productos. Además, las dos primeras mostraron ser muy estables, manteniendo niveles de captura relativamente constante a lo largo del tiempo, durante el período del ensayo.

Palabras clave: gorgojo, control, trampas, sordidina, captura.

Comparative study of aggregation pheromones of the banana weevil (*Cosmopolites sordidus*, Germar)

Abstract

The banana weevil (*Cosmopolites sordidus*) (Germar) (Coleoptera; Dryophthoridae) represents one of the most important pests for banana crops. It causes serious economic losses, both direct, decreasing fruit production, and indirect, increasing economic costs of control measures. One of the most frequently used weevil monitoring methods is the use of traps baited with aggregation pheromones. In this study, carried out on La Quinta Roja farm, municipality of Garachico (Tenerife), the efficacy of eight commercial pheromone lures containing *C. sordidus* aggregation pheromones was evaluated (CosmoPlus®, Cosmolure®, Aomi® Cosmopol, ECOSordidina 90-k, Pherodis, SEDQ, Econex 90, Sordi Pro Press®). The experimental design was randomized blocks with four replications. The distance between traps was 10 m. Weevil fallen in the traps were recorded weekly and traps were rotated every 14 days within blocks. The duration of the trial was 90 days. The results obtained showed that the largest numbers of adult weevil were recorded with Cosmolure®, Aomi® Cosmopol and Pherodis, although the statistical analyses did not reveal significant differences with compared to the other products-. In addition, the first two showed to be very stable, maintaining relatively constant countings over time during the trial period.

Keywords: weevil, control, traps, sordidin, lure.

Introducción

El cultivo del plátano representa un pilar fundamental de la economía agraria en las Islas Canarias. Se cultivan varias variedades de platanera, siendo las más extendidas las de los grupos Pequeña Enana y la Gran Enana. Además, se ha utilizado la variedad Williams y en años recientes se ha promovido el cultivo de variedades locales derivadas de la Pequeña Enana, como la Gruesa Palmera®, Brier® y Ricasa® (Cultesa, 2024).

Sin embargo, su producción se ve seriamente amenazada por el picudo negro de la platanera *Cosmopolites sordidus* (Germar, 1824) (Coleoptera; Dryophthoridae), un insecto que ha causado estragos en las plantaciones desde su introducción a principios del siglo XX.

El adulto de *C. sordidus* se caracteriza por ser de color negro y medir entre 10 y 15 mm de longitud. Este insecto es de hábitos nocturnos y altamente vulnerable a la desecación. Durante el día se oculta en tallos y cormos, rara vez vuela, lo que puede hacer que su presencia pase desapercibida durante largos períodos. El picudo negro tiene un período de vida prolongado y baja fecundidad, los adultos viven aproximadamente un año, aunque algunos individuos pueden sobrevivir hasta cuatro años (Manzanilla y Martínez, 2005). Al igual que las musáceas, este insecto es originario del sureste de Asia, donde no representa un problema crítico debido a la presencia de enemigos naturales (Armendáriz et al., 2016).

El picudo negro de la platanera presenta diversas formas de dispersión, siendo el transporte de material vegetal infestado una de las más significativas. El movimiento de plantas, rizomas o frutos contaminados con huevos o adultos del insecto facilita su dispersión a largas distancias. Además, los adultos del picudo tienen capacidad para realizar vuelos cortos, lo que les permite colonizar áreas cercanas y establecer nuevas poblaciones. Otro mecanismo de dispersión importante ocurre a través de corrientes de agua durante inundaciones o lluvias intensas.

La pérdida de producción ocasionada por el picudo negro puede alcanzar hasta un 42% de la cosecha total. Este insecto causa daño directo a través de las larvas que se alimentan del cormo, lo que conlleva a una reducción en la producción y en la vida útil de la plantación. Además, los ataques del picudo negro afectan la iniciación y desarrollo de las raíces, provocan la muerte de las raíces existentes, limitan la absorción de nutrientes, reducen el vigor de las plantas, retrasan la floración y aumentan la vulnerabilidad a otras plagas y enfermedades (Gold y Messiaen, 2000).

En la actualidad, el control del picudo negro se centra principalmente en el uso de trampas cebadas con feromona de agregación, tratamientos con insecticidas, y solarización en nuevas plantaciones (Perera et al., 2018). Entre las alternativas de manejo disponibles, el uso de trampas con feromona ha demostrado ser el método más efectivo en muchos casos (López et al., 2014), aunque en ocasiones puede no ser suficiente.

Para la gestión integrada de esta plaga, se emplean métodos preventivos como el uso de material vegetal sano, eliminación de residuos de cosecha, control de malezas y establecimiento de trampas. Además, se recurre al método cultural durante la plantación mediante el cual se evitan los suelos infestados y se utiliza azufre para proteger las plantas recién establecidas (Nogueroles et al., 2014). En este caso se recomienda el uso de plantas producidas *in vitro* en viveros registrados (Gold y Messiaen, 2000; Robinson y Galán, 2012; Nogueroles et al., 2014; MAPA, 2016). Tras la plantación se les aplica un tratamiento con azufre alrededor del cormo, ya que su efecto repelente protegerá a la planta de posibles ataques futuros.

El control biológico también juega un papel importante. En el lugar de origen existen varias especies de enemigos naturales que controlan las poblaciones del insecto plaga, como coleópteros e himenópteros, actuando como depredadores del picudo: *Propagalerita bicolor* (Drury) (Coleoptera: Carabidae), *Scarites* sp. (Coleoptera: Carabidae), *Hololepta* sp. (Coleoptera: Histeridae), *Onthophagus* sp. (Coleoptera: Scarabaeidae), *Tetramorium* sp. (Hymenoptera: Formicidae) y *Camponotus* sp. (Hymenoptera: Formicidae) (Sepúlveda-Cano et al., 2008).

Sin embargo, la introducción de estos depredadores no ha sido tan exitosa, siendo Cuba el único lugar donde se han obtenido buenos resultados con las hormigas *Tetramorium guineense* y *Pheidole*

megacephala, que son depredadoras del picudo. A estas hormigas se las atrae con trozos de pseudotallo, permitiendo su diseminación en todas las parcelas (Gold y Messiaen, 2000). Se han probado además hongos entomopatógenos y nematodos que parasitan y causan la muerte de estos insectos (Perera et al., 2018; Díaz et al., 2021). Entre los entomopatógenos citados por Sepúlveda-Cano et al., (2008) se encuentran los hongos entomopatógenos *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin y *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorokin, nematodos entomopatógenos de los géneros *Steinernema* y *Heterorhabditis*, y especies de hongos endófitos no patógenicos como *Fusarium* spp. En los últimos años, se han registrado productos comerciales basados en estos organismos para su uso en el control biológico del picudo (MAPA, 2024), tales como Serenisim® (*B. bassiana* cepa NPP111B005, registrado como producto fitosanitario), Biorend R Palmeras®, Capsanem® y Nemauid® (*Steinernema carpocapsae*, registrados como otros medios de defensa fitosanitaria).

En los métodos biotécnicos, tradicionalmente, se utilizaban trozos de pseudotallo (o rolo) para atraer al picudo negro. En 1993, Budenberg y sus colaboradores lograron identificar la feromona de agregación emitida por los machos de esta especie, que atrae a individuos de ambos sexos a un área determinada, generalmente para explotar mejor una fuente de alimento, como defensa contra depredadores o para la selección de parejas. Dos años después, en 1995, Beauhaire et al., desarrollaron una feromona sintética comercial de agregación denominada “sordidina”, una mezcla sintética de 4 isómeros que reproduce artificialmente los efectos de la feromona natural emitida por los machos. En este primer intento, el rendimiento del último paso de la síntesis a gran escala fue bajo, lo que limitó la producción de grandes cantidades de la feromona. Sin embargo, en 1996 Ducrot, mejoró el proceso de síntesis a gran escala, facilitando una mayor producción. Más tarde, en 2005 Enders et al., publican un nuevo método basado en la síntesis asimétrica, que permitió obtener compuestos con alta pureza. Estudios realizados en Uganda mostraron que las trampas cebadas con feromonas eran 18 veces más atractivas para *C. sordidus* que las trampas de pseudotallo (Tinzaara et al., 2000). Desde entonces, el uso de diferentes modelos de trampas comerciales cebadas con esta feromona de agregación en diferentes formatos como líquido o gel, se ha extendido ampliamente. Este método presenta varias ventajas, entre las que destacan su alta especificidad, lo que minimiza el impacto sobre otros insectos beneficiosos y reduce la contaminación ambiental (Tinzaara et al., 2002).

El control con insecticidas, si bien puede ser muy útil cuando se emplea correctamente, el uso indiscriminado y sin considerar factores como el umbral, la época, la forma de aplicación y la dosis del producto puede incrementar los costos del control, afectar el equilibrio ecológico, al control natural y causar problemas de resistencias y de residuos en las cosechas.

El control del picudo en las Islas Canarias se ha convertido en una prioridad para la continuidad del sector agrario, se está haciendo un gran esfuerzo por dirigir esta lucha hacia métodos ecológicos. En cuanto al trapeo del picudo negro de la platanera mediante el uso de trampas cebadas, existen numerosos estudios que han investigado diferentes aspectos de esta técnica. Estos estudios han evaluado la eficacia de diversas versiones sintéticas de la misma feromona, y trampas en capturar y controlar las poblaciones de picudo negro. Alpizar y Rodríguez (2000) demostraron la mayor eficacia de las trampas cebadas con feromonas sintéticas frente a las tradicionales de pseudotallo. Reddy et al. (2009) investigaron el efecto del tipo de trampa, su color, tamaño y posición en la eficacia de capturas del picudo negro. En 2010, Rhino et al., evaluaron el trapeo masivo de *C. sordidus* en Guadalupe, mientras que Ventura y colaboradores lo estudiaron en Azores (Ventura et al., 2012).

En Canarias, Montesdeoca (1998) analizó la eficacia del trapeo del picudo negro usando trampas cebadas con Cosmolure® y un activador, logrando capturar hasta 1200 adultos en 8 semanas de seguimiento. Cabrera (2016) llevó a cabo un estudio empleando feromona sintética y registró una reducción del 94.4% en las capturas de febrero de 2009 a febrero de 2010.

Velázquez et al. (2015) realizaron un estudio comparativo de distintas formulaciones de la feromona para el picudo de la platanera en Tenerife, registrando capturas durante 75 días en cuatro localizaciones diferentes. Encontraron que los formulados actuaron independientemente de la localización y del tipo de cultivo, siendo Phero-era el más efectivo en la mayoría de los casos, excepto en una ubicación donde Cosmolure tuvo mejores resultados.

En 2018, Perera et al., evaluaron cuatro variantes sintéticas de la sordidina (Cosmolure®, Phero-era, ECOSordidina 60 y Econex Cosmopolites sordidus) durante 140 días en dos localizaciones, concluyendo que Cosmolure® mostró las mayores capturas en todos los períodos estudiados, independientemente de la ubicación.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la eficacia de nuevos difusores de feromona en la captura del picudo negro de la platanera mediante trampas, ya que estos estudios demuestran la importancia del uso de trampas cebadas con feromonas en el manejo integrado del picudo negro, proporcionando datos útiles para optimizar las estrategias de control en diferentes contextos agrícolas

Materiales y Métodos

El presente estudio se realizó en 2024 en cuatro parcelas seleccionadas en la finca experimental “La Quinta Roja”, propiedad del Cabildo Insular de Tenerife, situada en el municipio de Garachico, a una altitud de 37 msnm. Tuvo una duración de 90 días, desde febrero hasta mayo, un periodo durante el cual las condiciones meteorológicas fueron favorables para el movimiento del insecto.

El cultivo se desarrolla con un marco de plantación de 2 x 3 m² y la variedad de plátano cultivada es Brier® (*Musa x paradisiaca* subgrupo Cavendish), del grupo Pequeña Enana. El riego se realiza mediante un sistema de goteo auto compensante con líneas de tuberías equidistantes a 1,5 m. Los riegos son poco frecuentes, se realizan una vez al día, ajustando el tiempo de riego a la evapotranspiración del cultivo durante el año.

El diseño empleado fue en bloques al azar, con cuatro repeticiones, seleccionados en función de la incidencia de la plaga. Para determinar la incidencia de la plaga en cada parcela, un mes antes de iniciar el ensayo se colocaron trampas tipo Pitfall de la marca NovAgrica, cebadas con feromonas de agregación (ECOSordidina 90-k) Las capturas del insecto se monitorizaron semanalmente.

La distancia entre trampas se estableció en 10 m, basándonos en investigaciones realizadas por el Dr. Raimundo Cabrera dentro del convenio Asprocan-FEU-ULL durante los años 2006 y 2007, así como en estudios llevados a cabo por Tinzaara et al. (2000) en Uganda. Las trampas se colocaron enterrando su mitad inferior hasta que sus bordes se apoyaron sobre el terreno, facilitando así la entrada de los picudos. Una vez establecidos los bloques y colocadas las trampas, se distribuyeron los 8 tratamientos de cada bloque, definiéndose como tratamiento a cada uno de los formulados de feromona con su difusor, y como bloque a cada una de las repeticiones efectuadas.

Tabla 1. Nombre comercial, empresa, distribuidor, formato y persistencia de los formulados estudiados.

Nombre comercial	Empresa fabricante	Distribuidor	Formato	Persistencia
Aomi® Cosmopol	Ao Midori Biocontrol S.L.	Ao Midori Biocontrol S.L.	Difusor de vapores plástico.	180 días
Cosmolure®	Chem Tica Internacional S.A	Coplaca/ Marante Agro XXI SL.	Burbuja plástica permeable con líquido.	90 días
CosmoPlus®	Scyll'Agro	O'Shanahan	Sobre de gel traslúcido	90 días
Econex 90	Econex	Fitosanitarios Drago	Líquido en difusor plástico semipermeable	90 días
ECOSordidina 90-k	Ecobertura	Ecobertura	Tubo de polietileno con tapa.	90 días
Pherodis	Koppert	Ceres agrícola	Gel en sobre semipermeable.	90 días
SEDQ	SEDQ	SEDQ	Tubos de plástico con líquido	40 días
Sordi Pro Press®	M2i Solution	Marante Agro XXI SL	Líquido, en envase dosificador a presión.	90 días

Los difusores se colocaron en las trampas siguiendo las indicaciones de los respectivos fabricantes, ya que, como se observa en la descripción de la tabla anterior, cada uno de estos productos posee un formato y modo de colocación diferente.

La mayoría de los formulados utilizados tienen una duración indicada por el fabricante de 90 días, a excepción de Aomi®Cosmopol que presenta una persistencia de 180 días y SEDQ, que presenta una duración de solo 40 días. Debido a esta diferencia, se realizó un cambio de difusores de la marca SEDQ en todas las repeticiones al alcanzar los 40 días desde el inicio del ensayo. Este procedimiento garantiza que se mantenga la eficacia y continuidad del control, para que todas las marcas comerciales se comparen en las condiciones indicadas por los respectivos fabricantes.

La duración del ensayo fue de 90 días, registrando las capturas de adultos de picudo por trampa cada 7 días. Asimismo, cada 14 días se rotaron las trampas con su correspondiente difusor dentro de cada bloque, para compensar el efecto del comportamiento en focos característico de esta plaga.

Los datos de capturas acumuladas se han realizado con el test de Friedman, empleando la función `friedmanTest`, y las comparaciones múltiples se han realizado según Eisinga et al. (2017) con la función `rdAllPairsExactTest`, ambas funciones del paquete `PMCMRplus` de R, con las opciones por defecto (Pohlert, 2023).

Los datos se han representado mediante diagramas de cajas y bigotes (box and whisker), y se ha indicado en ellos, además de las 4 repeticiones de cada difusor o trampa (puntos rojos), la mediana (línea horizontal negra), y la media (asterisco).

Los datos meteorológicos proceden de la estación meteorológica "La Quinta" (lat: 28°22'22,13" N; lon:16°46'26,61" O), ubicada en la finca donde se llevó a cabo el ensayo. Esta estación es de tipo D y es propiedad del Cabildo de Tenerife. Registra datos al aire libre de velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, precipitación y radiación solar.

Resultados y Discusión

Las siguientes gráficas de cajas muestran los resultados obtenidos en distintos intervalos de tiempo: 28 días (semana 4), 56 días (semana 8) y 90 días (semana 13). También se presentan los resultados del test de Friedman, utilizado para evaluar las diferencias entre los tratamientos.

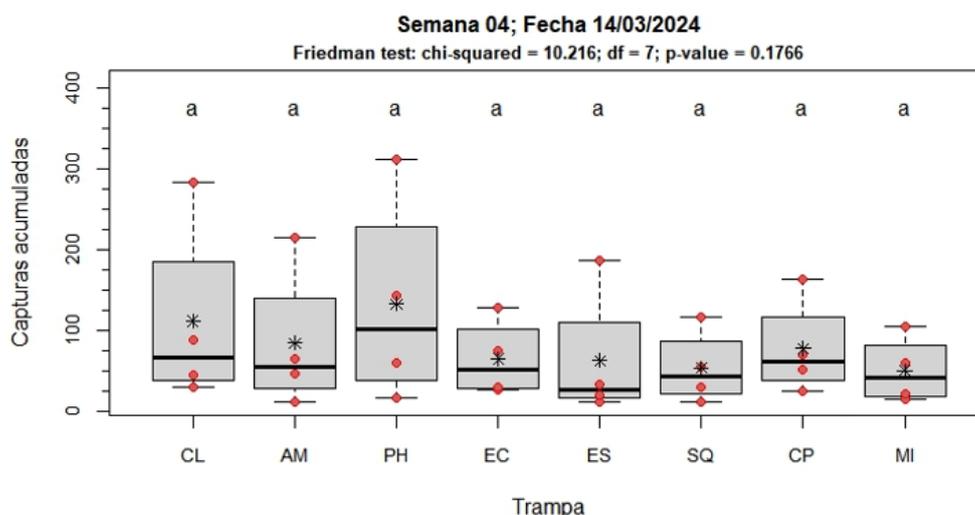


Figura 1. Análisis estadístico comparando las capturas acumuladas en la cuarta semana tras empezar el ensayo: Cosmolure® (CL), Aomi® Cosmopol (AM), Pherodis (PH), Econex 90 (EC), ECOSordidina 90-k (ES), SEDQ (SQ), CosmoPlus® (CP), Sordi Pro Press® (MI). Los datos se han representado mediante diagramas de cajas y bigotes (box and whisker), y se han indicado en ellos además de las 4 repeticiones de cada difusor o trampa (puntos rojos), la mediana (línea horizontal negra), y la media (asterisco).

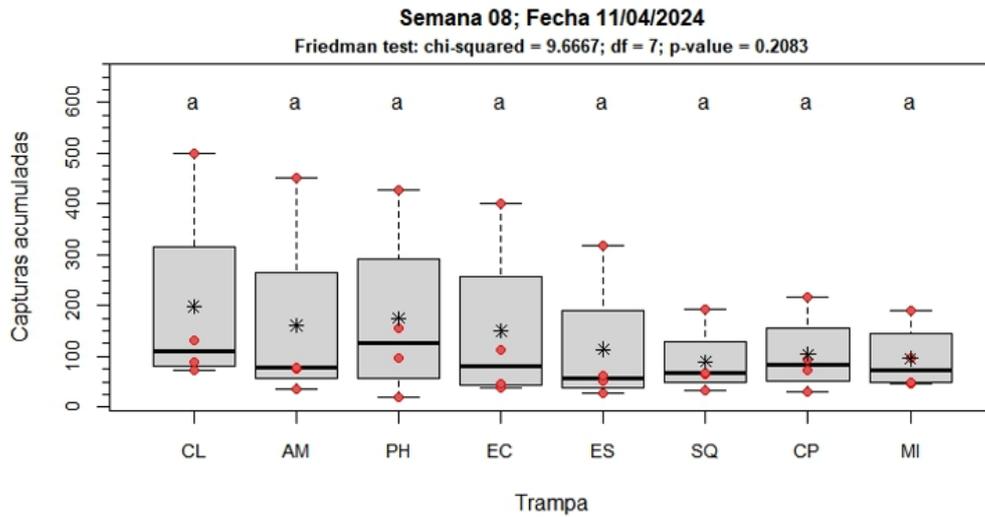


Figura 2. Análisis estadístico comparando las capturas acumuladas en la octava semana tras empezar el ensayo: Cosmolure® (CL), Aomi® Cosmopol (AM), Pherodis (PH), Econex 90 (EC), ECOSordidina 90-k (ES), SEDQ (SQ), CosmoPlus® (CP), Sordi Pro Press® (MI). Los datos se han representado mediante diagramas de cajas y bigotes (box and whisker), y se han indicado en ellos además de las 4 repeticiones de cada difusor o trampa (puntos rojos), la mediana (línea horizontal negra), y la media (asterisco).

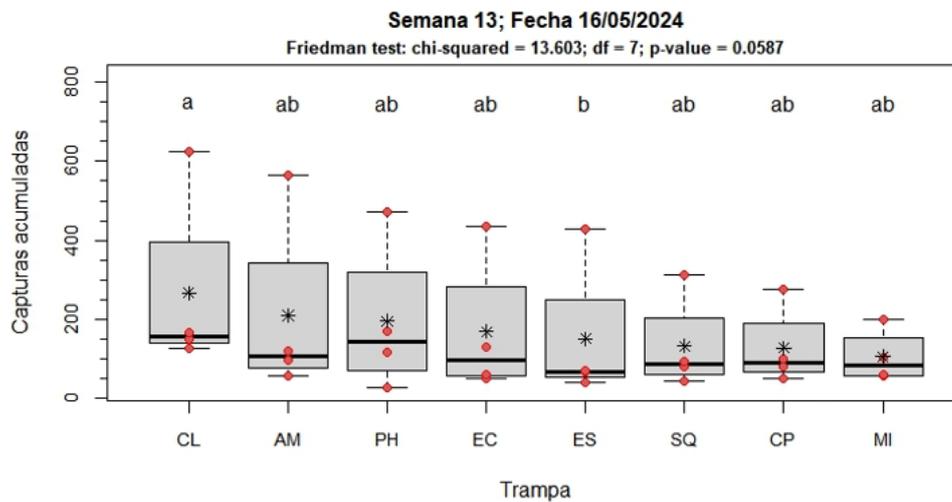


Figura 3. Análisis estadístico comparando las capturas acumuladas al finalizar el ensayo: Cosmolure® (CL), Aomi® Cosmopol (AM), Pherodis (PH), Econex 90 (EC), ECOSordidina 90-k (ES), SEDQ (SQ), CosmoPlus® (CP), Sordi Pro Press® (MI). Los datos se han representado mediante diagramas de cajas y bigotes (box and whisker), y se han indicado en ellos además de las 4 repeticiones de cada difusor o trampa (puntos rojos), la mediana (línea horizontal negra), y la media (asterisco).

A los 28 días tras la instalación de las trampas con sus respectivos difusores en el campo, aunque hay diferencias visuales en la cantidad de capturas entre algunas trampas como por ejemplo Pherodis que registró la mayor cantidad de capturas acumuladas, con una mediana de 27, seguido de Cosmolure®, que tuvo una mediana de 15 (Figura 1), el análisis estadístico sugiere que estas diferencias no son significativas. Todos los tratamientos parecen comportarse de manera similar en cuanto a la atracción de las trampas, como se muestra en la Figura 1.

A los 56 días, se observaron nuevamente variaciones entre las trampas en términos de capturas acumuladas, destacando Cosmolure®, con una mediana de 14,5, y Pherodis, con 8,5. No obstante, el test de Friedman sigue indicando que no hay diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 2).

Al finalizar el ensayo, a los 90 días, las diferencias entre los difusores según el test de Friedman, son cercanas a la significación (probabilidad = 0,0587), mostrando una tendencia que sugiere que Cosmolure® podría ser el tratamiento más eficiente en capturar picudos. En contraste, ECOSordidina 90-k parece tener la menor eficacia mientras que los demás tratamientos muestran un comportamiento intermedio (Figura 3).

Además, se destaca que Cosmolure® y Aomi® Cosmopol mantuvieron una persistencia constante a lo largo del ensayo, con un número de capturas relativamente homogéneo (Figura 4). Por otro lado, Pherodis mostró un efecto elevado al principio, pero sus capturas disminuyeron con el tiempo, un comportamiento similar al de ECOSordidina 90-k, aunque en menor medida.

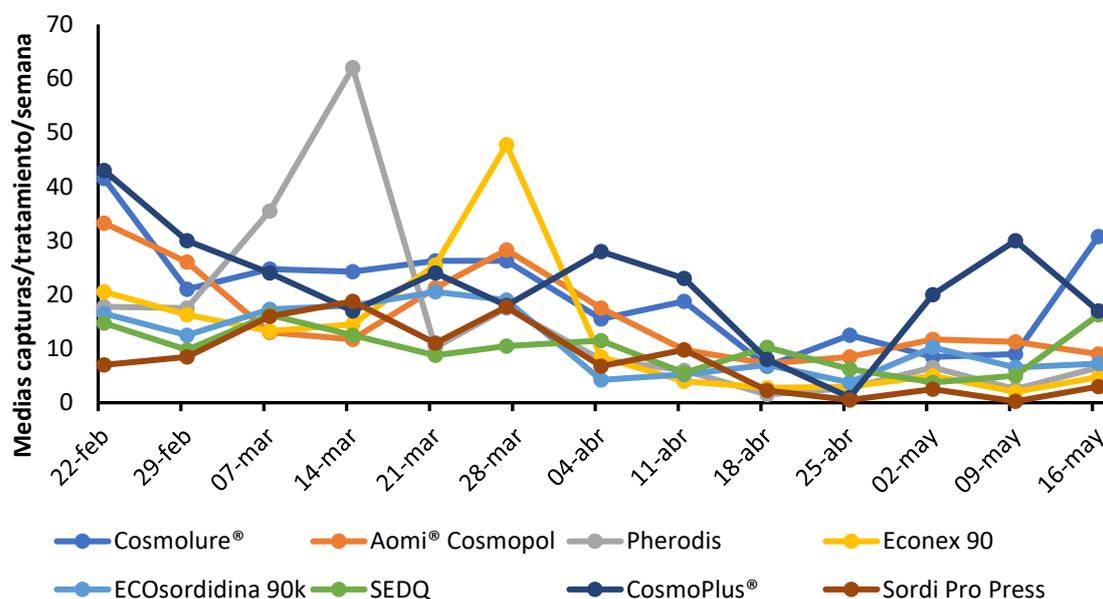


Figura 4. Evolución de las capturas con registro semanal por feromona. Los datos corresponden a las capturas medias por trampa.

Los resultados obtenidos a lo largo de los 90 días indican que, aunque las diferencias en la eficacia de los difusores utilizados en las trampas no son estadísticamente significativas según el test de Friedman, las tendencias observadas permiten destacar algunos aspectos relevantes. Cosmolure® se perfila como el tratamiento más consistente y potencialmente eficiente en la captura de picudos, especialmente a partir del segundo mes del ensayo, donde se observa un mayor número de capturas acumuladas. Estos hallazgos coinciden con estudios anteriores que incluyeron Cosmolure® (Perera González et al., 2018; Delgado et al., 2019), donde este formulado también mostró los mejores resultados.

Las feromonas de agregación son sustancias químicas que los insectos producen para atraer a otros miembros de la misma especie. Estas feromonas desempeñan un papel importante en la comunicación entre los insectos, facilitando la búsqueda de alimento, la reproducción y la defensa del territorio. La síntesis de feromonas de agregación en el laboratorio implica una serie de pasos químicos que pueden variar dependiendo de la estructura de la feromona específica. A pesar de su estructura relativamente simple, la síntesis de la sordidina en un laboratorio puede presentar algunos desafíos debido a la necesidad de obtener un producto altamente puro y con una configuración estereoquímica específica (Jayaraman et al., 1997; Yadav et al., 2008). Las principales diferencias entre los formulados sintéticos de sordidina vienen determinados por los siguientes factores: pureza, concentración, soporte del dispensador y aditivos.

En cuanto al picudo negro de la platanera, la temperatura y la humedad son determinantes en su actividad. Las condiciones óptimas para este insecto son temperaturas moderadas y alta humedad. El picudo es particularmente susceptible a la desecación, por lo que niveles muy bajos de humedad relativa, aún a temperaturas favorables, pueden reducir significativamente su actividad. En cambio, niveles de humedad alta favorecen su actividad, permitiendo una mayor movilidad y búsqueda de alimento. Esto coincide con lo observado en las capturas a lo largo del ensayo (Figura 4)), donde se muestran máximos de capturas a mediados de marzo y mediados de abril. Estos máximos coinciden con periodos de condiciones ambientales óptimas para el picudo (Figura 5) según los datos proporcionados por la estación meteorológica ubicada en la finca, lo que parece confirmar la correlación entre las condiciones climáticas y el comportamiento de los picudos.

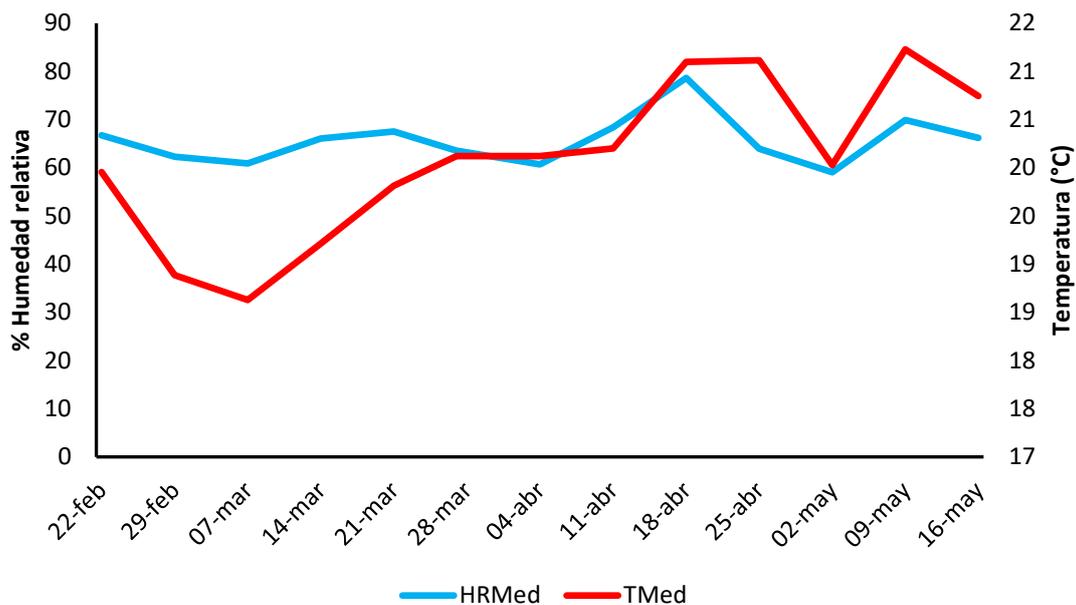


Figura 5. . Datos semanales de temperatura y humedad relativa media semanal. Fuente: Agrocabildo estación meteorológica La Quinta (2024).

Por otra parte, el descenso de capturas en ciertos periodos puede estar relacionado no sólo con la menor actividad del picudo sino también con condiciones menos favorables para la dispersión de feromonas, como baja humedad o bajas temperaturas. Una alta humedad puede mejorar la volatilidad y dispersión de las feromonas, haciendo las trampas más atractivas para los picudos. En contraste, una baja humedad puede reducir la eficacia de las feromonas, disminuyendo las capturas.

En este ensayo, las características propias de cada formato de difusor y la formulación de la feromona, que muestran gran variedad, se consideran como los factores determinantes en la capacidad de captura del insecto. Esto se refleja en las diferencias observadas en los resultados. Ajustar las formulaciones de la feromona para mejorar su rendimiento en diferentes condiciones climáticas también podría ser una estrategia efectiva para optimizar el control de picudos en diferentes condiciones ambientales (subtropicales, tropicales, etc).

Conclusiones

Cosmolure® es el formulado con mayor capacidad de captura de *C. sordidus* en todos los períodos evaluados del ensayo, seguido por los compuestos de las marcas AOMI® Cosmopol y Pherodis, cuyos valores medios de capturas son ligeramente inferiores, pero sin diferencias estadísticas significativas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al personal de la finca experimental “La Quinta Roja” por su colaboración y a Alfredo Falcón Delgado y Ana Rodríguez Miguel (personal contratado por el programa de empleo “Nuevas Oportunidades de Empleo” por su ayuda en la realización y toma de datos durante la realización de este ensayo.

Bibliografía

Alpizar, M., D., Rodríguez, V. (2000). Feromonas y otros atrayentes de insectos en los cultivos de Costa Rica. *Guápiles, Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería. sp.*

Armendáriz, I., Landázuri, P. A., Taco, J. M., Ulloa, S. M. (2016). Efectos del control del picudo negro (*Cosmopolites sordidus*) en el plátano. *Agronomía mesoamericana*, 319-327.

Beauhaire, J., Ducrot, P.-H., Malosse, C., Rochat, D., Ndiege, I. O., Otieno, D. O. (1995). Identification and synthesis of sordidin, a male pheromone emitted by *Cosmopolites sordidus*. *Tetrahedron letters*, 36(7), 1043-1046.

Budenberg, W.J., Ndiege, I.O., Karago, F.W. (1993). Evidence for volatile male-produced pheromone in banana weevil *Cosmopolites sordidus*. *Journal of Chemical Ecology*. 19, 1905-1916.

Cabrera, R. (2016). Control de picudo negro de la platanera con trampas de feromonas. *Revista Agropalca*, 32, 21-25.

Cultesa (2024). *Catálogo de variedades*.

Díaz, A. P. B., Suárez, E. H., Paris, M., Medina, M. P., González, S. P. (2021). Evaluación de organismos entomopatógenos para el manejo del picudo de la platanera (*Cosmopolites sordidus*) en condiciones de campo. Información Técnica. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias ICIA, 40.

Díaz, A. P. B., Suárez, E. H., Paris, M., Medina, M. P., González, S. P. (2021). Evaluación de organismos entomopatógenos para el manejo del picudo de la platanera (*Cosmopolites sordidus*) en condiciones de campo. Información Técnica. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias ICIA, 40.

Ducrot, P. H. (1996). Efficient Synthesis of Sordidin, A Male Pheromone Compound Emitted by *Cosmopolites Sordidus*. *Synthetic communications*, 26(21), 3923–3928.

Eisinga, R., Heskes, T., Pelzer, B., Te Grotenhuis, M. (2017). Exact p-values for Pairwise Comparison of Friedman Rank Sums, with Application to Comparing Classifiers, *BMC Bioinformatics*, 18-68.

Enders, D., Breuer, I., Nühning, A. (2005). First Asymmetric Synthesis of (+)-Sordidin and (-)-7-epi-Sordidin, Aggregation Pheromones of the Banana Weevil *Cosmopolites Sordidus*. *European Journal of Organic Chemistry*, 13, 2677–2683.

Gold, C:S., Messiaen, S. (2000). El picudo negro del banano *Cosmopolites sordidus*. *Hoja divulgativa*, 4, 1-4.

Jayaraman, S., Ndiege, I. O., Oehlschlager, A. C., Gonzalez, L. M., Alpizar, D., Falles, M., Ahuya, P. (1997). Synthesis, analysis, and field activity of sordidin, a male-produced aggregation pheromone of the banana weevil, *Cosmopolites sordidus*. *Journal of Chemical Ecology*, 23, 1145-1161.

López-Cepero, J., Puerta, M., Piedra, A. (2014). Guía para la gestión integrada de plagas en platanera. *Santa Cruz de Tenerife: Cuadernos Divulgativos COPLACA*, 2, 44.

Manzanilla, E., Martínez, G. (2005). El gorgojo negro del plátano. *Revista de difusión de tecnología agrícola, pecuaria, pesquera y acuícola*.

Ministerio de Agricultura, alimentación y Medio ambiente. (2016). *Guía de Gestión integrada de Plagas en el cultivo de la platanera*. MAPA.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2024). *Consulta de determinados medios de defensa fitosanitaria para el control de *Cosmopolites sordidus**. Registro de Determinados Medios de Defensa Fitosanitaria.

Montesdeoca, M. (1998). *Empleo de la hormona de agregación Sordidin como método de captura y lucha contra *Cosmopolites sordidus* Germar (Coleoptera: Curculionidae)*. (Doctoral dissertation, Tesis de ingeniero agrónomo. Valle de Guerra, España. Universidad de La Laguna).

Nogueroles Andreu, C., López-Cepero, J., Rodríguez Serrano, M. (2014). *Cultivo ecológico de la platanera*. Sociedad Española de Agricultura Ecológica (SEAE). Serie: Producción Vegetal Ecológica. ISBN: 978-84-942437-2-1.

Perera González, S., Díaz González, Y., Linares Quintero, A.M. (2018). Estudio comparativo de feromonas de picudo negro de la platanera (*Cosmopolites sordidus*).

Perera González, S., Rodríguez Serrano, M., Padilla Cubas, A. (2018). Ensayo de eficacia de hongos entomopatógenos en el control del picudo de la platanera (*Cosmopolites sordidus*) en condiciones de campo.

Reddy, G. V. P., Cruz, Z. T., Guerrero, A. (2009). Development of an efficient pheromone-based trapping method for the banana root borer *Cosmopolites sordidus*. *Journal of Chemical Ecology*, 35, 111–117.

Rhino, B., Dorel, M., Tixier, P., Risède, J. M. (2010). Effect of fallows on population dynamics of *Cosmopolites sordidus*: toward integrated management of banana fields with pheromone mass trapping. *Agricultural and Forest Entomology*, 12(2), 195–202.

Robinson, J. C., Galán Saúco, V. (2012). *Plátanos y bananas*. Ediciones Mundi-Prensa.

Sanfiel, P. D., González, S. P., Mesa, D. R. (2019). Estudio comparativo de feromonas de agregación de picudo de la platanera (*Cosmopolites sordidus*). *Agrícola vergel: Fruticultura, horticultura, floricultura*, 422, 237-241.

Sepúlveda-Cano, P. A., López-Núñez, J. C., Soto-Giraldo, A. (2008.). Efecto de dos nematodos entomopatógenos sobre *Cosmopolites sordidus* (Coleoptera: Dryophthoridae). *Revista Colombiana de Entomología*, 34(1), 62-67.

Tinzaara, W., Dicke, M., van Huis, A., Gold, C. S. (2002). Use of infochemicals in pest management with special reference to the banana weevil, *Cosmopolites sordidus* (Germar) (Coleoptera: Curculionidae). *International Journal of Tropical Insect Science*, 22(4), 241-261.

Tinzaara, W., Tushemereirwe, W., Kashaija, I. (2000). Efficiency of pheromones and trap types in the capture of the banana weevil *Cosmopolites sordidus* Germar in Uganda. *Uganda Journal of Agricultural Sciences*. 5(1), 91-95.

Velázquez Barrera, M.C., Hernández Suárez, E., Carnero Hernández, A., Perera González, S. (2015). *Estudio comparativo de feromonas de picudo de la platanera (Cosmopolites sordidus) en Tenerife*.

Ventura, L. B., Santos, A., Cabrera, R. P., Lopes, D. J. H., Mexia, A. (2012). Ensaio de eficácia de duas feromonas na captura de adultos de *Cosmopolites sordidus* Germar. [Efficacy of two pheromones in the capture of adults of *Cosmopolites sordidus* Germar. *Revista de Ciências Agrárias*, 35(2), 287-291.

Yadav, J. S., Reddy, K. B., Prasad, A. R., Rehman, H. U. (2008). Stereoselective synthesis of (+)-sordidin, the male-produced aggregation pheromone of the banana weevil *Cosmopolites sordidus*. *Tetrahedron*, 64(9), 2063–2070.

Estudio de los cambios fisiológicos durante el desarrollo del Finger Lime (*Citrus australasica*)

A.M. Solivella-Poveda¹, P.J. Zapata¹ y M.J. Giménez¹

¹ Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental de la Universidad Miguel Hernández (CIAGRO-UMH), Carretera de Beniel, Km. 3,2, 03312, Orihuela, Alicante, España.

ana.solivella@goumh.umh.es

Resumen

Los parámetros de calidad de los cítricos cambian a lo largo de su desarrollo, siendo los sólidos solubles totales (SST) y la acidez titulable (AT) unos de los marcadores más importantes de la maduración. Para garantizar la máxima calidad, estos frutos deben recolectarse en una etapa de madurez adecuada. En este sentido, pese al incremento de la popularidad del Finger Lime (*Citrus australasica*), se desconoce cómo influye su estado de desarrollo sobre la fisiología y calidad del fruto, siendo por tanto la caracterización de los estados de desarrollo del Finger Lime el principal objetivo del presente estudio. Para ello, los frutos se clasificaron en diez estados de desarrollo diferentes, de acuerdo con el color externo, y se determinó la tasa de respiración, la firmeza, el color externo, así como los SST y AT del zumo. En el flavedo se cuantificaron los fenoles totales, los carotenoides y la actividad antioxidante total. Los resultados mostraron que los cambios más importantes se produjeron en los primeros estados, destacando principalmente un incremento de la AT y la firmeza. Además, se observó un descenso del nivel de carotenoides conforme avanzaba el estado de desarrollo del fruto, así como del ángulo Hue, en este caso a partir del estado siete, lo que se traduce en una tonalidad más rojiza. Por otro lado, las particularidades de este fruto vinculadas a su tamaño podrían explicar las diferencias encontradas respecto al desarrollo de otros cítricos, así como la ausencia de diferencias significativas para algunos parámetros evaluados entre los diferentes estados. En conclusión, los cambios más significativos generalmente se produjeron en los primeros estados de desarrollo y aunque existían diferencias externas de color, no se observaron diferencias significativas para la AT y firmeza a partir del tercer estado.

Palabras clave: *Citrus australasica*, fisiología, calidad, desarrollo

Study of physiological changes during the development of Finger Lime (*Citrus australasica*)

Abstract

The quality parameters of citrus fruit change throughout their development, with total soluble solids (TSS) and titratable acidity (TA) being among the most important markers of ripening. To ensure maximum quality, these fruits must be harvested at an appropriate stage of ripeness. In this sense, despite the increasing popularity of the Finger Lime (*Citrus australasica*), it is not known how its developmental stage influences the physiology and quality of the fruit, therefore the characterisation of the developmental stages of the Finger Lime is the main objective of the present study. For this purpose, the fruits were classified into ten different developmental stages, according to external colour, and respiration rate, firmness, external colour, as well as juice TSS and TA, were determined. In the flavedo, total phenols, carotenoids and total antioxidant activity were quantified. The results showed that the most important changes occurred in the early stages, mainly an increase in TA and firmness. In addition, a decrease in the level of carotenoids was observed as the stage of fruit development progressed, as well as in the Hue angle, in this case from stage seven onwards, resulting in a more reddish hue. On the other hand, the particularities of this fruit linked to its size could explain the differences found with respect to the development of other citrus fruits, as well as the absence of significant differences for some of the parameters evaluated between the different stages. In conclusion, the most significant changes generally occurred in the early stages of development and although there were external differences in colour, no significant differences were observed for TA and firmness from the third stage onwards.

Keywords: *Citrus australasica*, physiology, quality, development

Introducción

El género *Citrus* pertenece a la familia *Rutaceae*, la cual, desde su localización original, las áreas tropicales y subtropicales del sudeste asiático, se extendió al resto del mundo (Aznar et al., 2022). Actualmente es uno de los cultivos frutales más difundidos a nivel mundial (FAO, 2021) y comprende un gran número de especies, variedades, cultivares e híbridos. En este sentido, el Finger Lime (*Citrus australasica*), es una de las siete especies arbustivas endémicas nativas de Australia (Delort y Yuan, 2018; Aznar et al., 2022). Se encuentra muy extendido en toda la costa este de Australia, sobre todo desde el sureste de Queensland hasta el noreste de Nueva Gales del Sur, creciendo principalmente en la selva tropical y subtropical (Delort y Yuan, 2018; Denaro et al., 2020). Sin embargo, el cultivo de este cítrico se ha extendido a otras zonas del mundo, entre ellas la región mediterránea (Aznar et al., 2022).

El inicio y transcurso de la floración del Finger Lime, así como su maduración y recolección, dependen en gran medida de la localización del cultivo y, por ende, de las condiciones climáticas. En la costa norte de Nueva Gales del Sur, la floración comienza en junio y puede extenderse hasta principios de octubre, según el cultivar. En cambio, en las regiones costeras cálidas, esta etapa también puede darse esporádicamente durante primavera y verano. Por otro lado, la maduración del fruto se produce entre diciembre y mayo y su recolección, principalmente, entre marzo y mayo (Delort y Yuan, 2018).

Este fruto presenta una morfología fusiforme, semejante a la de un dedo (a la que hace referencia su nombre, "Lima de Dedo"), un endocarpio compuesto por vesículas ovoides que recuerdan al caviar (por lo que también es llamado caviar cítrico), escasa presencia de albedo y diversidad del color tanto del flavedo como de la pulpa (Aznar et al., 2022), que pueden variar desde el verde o el amarillo hasta el púrpura, rosa o rojo, más o menos intensos, según factores como la variedad, cultivar, época de floración o incluso las condiciones climáticas (Hardy et al., 2010). Así mismo, al comparar entre distintas selecciones de pulpa roja o blanca, se han observado diferentes niveles de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante, aunque los resultados globales muestran que el fruto en sí mismo presenta una destacada cantidad de compuestos beneficiosos para la salud (Adhikari et al., 2021). Junto al contenido en sustancias que contribuyen al sistema antioxidante del fruto, factores como el contenido en sólidos solubles totales (SST) y la acidez (A), cuya relación (SST/A) es considerada como índice de madurez, influyen significativamente en la calidad de los cítricos (Agustí et al., 2020).

Teniendo en cuenta que el conocimiento sobre el desarrollo de los frutos adquiere gran importancia a la hora de garantizar una adaptación óptima a las condiciones climáticas y geográficas, optimizar sus parámetros de calidad, establecer la temporada de comercialización y satisfacer las necesidades de los consumidores (Terol et al., 2019), así como la escasa información disponible sobre Finger Lime y el previsible incremento de su cultivo y consumo (Aznar et al., 2022), el principal objetivo del presente estudio ha sido evaluar la influencia del estado de desarrollo del Finger Lime sobre sus principales parámetros fisiológicos y de calidad.

Materiales y Métodos

Material vegetal y diseño experimental

Las muestras de Finger Lime (*C. australasica* F. Muell.), variedad IVIA 150 injertada sobre un portainjerto de *Citrus macrophylla*, se recolectaron el 25 de octubre de 2023 en una finca experimental situada en El Siscar (Santomera, Región de Murcia, España) y se trasladaron al laboratorio del Grupo de Post-Recolección de la Universidad Miguel Hernández para su clasificación y posterior análisis. Los frutos se clasificaron en 10 estados de desarrollo (S) diferentes de acuerdo con su color externo (Figura 1). Para cada estado de desarrollo se obtuvieron tres réplicas de diez frutos y se determinó la tasa de respiración, firmeza, color, sólidos solubles totales, acidez titulable, contenido fenólico total, carotenoides totales y actividad antioxidante total.



Figura 1. Escala de los estados de desarrollo de Finger Lime (*C. australasica*).

Tasa de respiración y parámetros fisicoquímicos

La tasa de respiración (TR) se cuantificó mediante un cromatógrafo de gases (Shimadzu 14B-GC) acoplado a un detector de conductividad térmica de acuerdo con la metodología descrita por Gutiérrez-Pozo et al. (2023), modificando el número de frutos empleado por cada réplica, diez frutos en cada réplica y tres réplicas por cada estado de desarrollo, y el volumen del bote empleado, siendo de 0,580 litros. Los resultados se expresaron como mg de CO₂ kg⁻¹ h⁻¹. La firmeza se midió individualmente en cada fruto mediante un texturómetro XT.XT plus Texture Analyser (Stable Microsystems, Godalming, Reino Unido) acoplado a una placa de acero que, mediante la aplicación de una fuerza, provocaba una deformación del 5 % del diámetro del fruto. Los resultados se expresaron como la relación entre la fuerza aplicada y la distancia recorrida para dicha deformación (N mm⁻¹) (Serna-Escolano et al., 2023). Las coordenadas colorimétricas del espacio de color CIELAB* (Luminosidad (L*), coordenada rojo-verde (a*) y coordenada amarillo-azul (b*)) se determinaron mediante un colorímetro Minolta (CR-400; Minolta, Japón), realizando tres mediciones en el diámetro ecuatorial del fruto. Los resultados se expresaron como ángulo Hue (°Hue), calculado como arctg (b*/a*). En todos los casos, los resultados se expresaron como media ± error estándar (ES). Por otro lado, se realizó una agrupación en lotes de seis frutos, obteniendo tres réplicas por estado y se obtuvo el zumo de cada una de ellas, que se utilizó para medir por duplicado los SST y la acidez titulable (AT). Para determinar el contenido en SST se utilizó un refractómetro digital HI 96811 (Hanna Instruments, EE.UU.) y la AT se determinó mediante la valoración de 0,5 mL de zumo diluido en 25 mL de agua destilada con NaOH 0,1 mM hasta pH 8,1 utilizando un valorador automático (OMNIS, Metrohm AG, Herisau, Suiza). Los resultados (media ± ES) de SST y AT se expresaron como °Brix y % de ácido cítrico, respectivamente. El flavedo de los frutos que constituían cada réplica se mezcló y congeló para el posterior análisis de compuestos bioactivos.

Contenido fenólico total, carotenoides totales y actividad antioxidante total

El contenido fenólico total (CFT) se midió homogeneizando 2 g de flavedo congelado con 15 mL de agua:metanol (2:8, v/v) conteniendo 2,0 mM NaF. Tras centrifugar los extractos a 10 000 r.p.m. y 4 °C durante 15 min, se midió el CFT de cada una de las tres réplicas por duplicado utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteau (Gutiérrez-Pozo et al., 2023). Los resultados (media ± ES) se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (GAE) por 100 g de peso fresco (PF). Por otro lado, la actividad antioxidante total (AAT) se cuantificó tanto en la fase hidrosoluble (AAT-H) como en la liposoluble (AAT-L) a partir de una misma extracción. Brevemente, 2 g de flavedo se homogeneizaron en 10 mL de tampón fosfato y 5 mL de acetato de etilo, y se centrifugaron a 10 000 r.p.m. durante 15 min a 4 °C. La fracción superior se utilizó para cuantificar la AAT-L mientras que la inferior para la cuantificación de la AAT-H utilizando el sistema enzimático compuesto por la sal de diamonio 2,2'-azino-bis-(ácido 3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) (ABTS), la enzima peroxidasa y su sustrato oxidante, peróxido de hidrógeno. La absorbancia se midió a 730 nm en un espectrofotómetro. Los resultados (media ± ES), obtenidos a partir del duplicado de cada una de las tres réplicas realizadas, se expresaron como mg equivalentes de Trolox (ácido 6-hidroxi-2, 5, 7, 8-tetrametilcroman-2-carboxílico) (TE) por 100 g de PF. Finalmente, los carotenoides totales se determinaron en el extracto lipofílico obtenido en la misma extracción llevada a cabo para medir la AAT-L, mediante la lectura de la absorbancia a 450 nm y se expresaron como mg por 100 g de PF, siendo la media ± ES de los duplicados obtenidos para cada una de las tres réplicas.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó con el programa SPSS, versión 20 (IBM Corp., Armonk, NY, USA). Los datos fueron expresados como la media ± ES. Se realizó un análisis de varianza

(ANOVA) y se utilizó un test de rangos múltiple (HSD de Tukey) para determinar diferencias significativas ($p < 0,05$) entre estados de desarrollo.

Resultados y Discusión

Tasa de Respiración

La mayor TR se obtuvo en los primeros (S1 y S2, $75,22 \pm 2,54$ y $62,68 \pm 2,63$ mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹, respectivamente) y últimos estados (S9 y S10, $60,22 \pm 3,86$ y $53,69 \pm 1,77$ mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹, respectivamente); sin embargo, el décimo estado no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$) respecto a S3, S5 y S6, ni S9 respecto a este último (Figura 2).

El primer periodo del desarrollo de los cítricos se caracteriza por una alta división celular. Ello implica la aceleración del metabolismo, que induce una TR más alta, en comparación con etapas posteriores. En este sentido, a lo largo de esta primera etapa y la sucesiva el metabolismo básico de los frutos cambia, promoviéndose el almacenamiento de reservas, que se fortalece durante la maduración, tercera etapa (Tadeo et al., 2008). De manera que, en los frutos en periodo de maduración la TR se atenúa (Sun et al., 2019). Una ligera aproximación de este patrón se pudo observar entre S1 y S8; sin embargo, S9 fue el tercer estado con mayor TR, lo cual podría relacionarse con los cambios asociados a una maduración avanzada. Además, ciertos estudios han reportado que la TR puede verse ligeramente aumentada durante la maduración como consecuencia de cambios producidos en el fruto, como el viraje de color (Eaks, 1970), lo cual podría explicar los incrementos observados en S6 y S9.

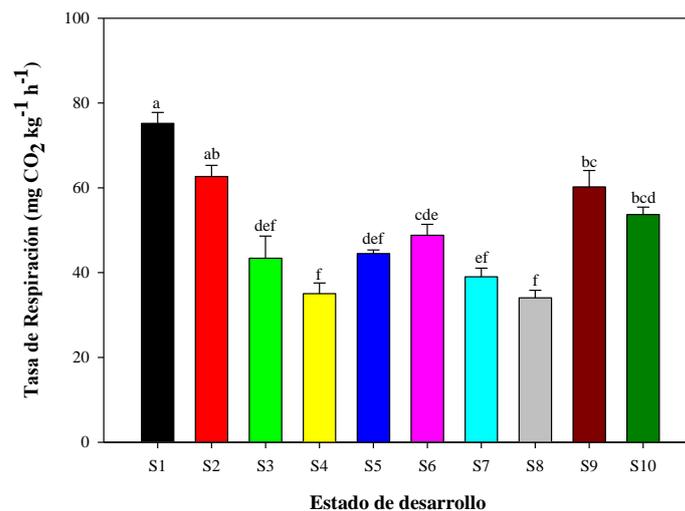


Figura 2. Influencia del estado de desarrollo (S1-S10) de Finger Lime sobre su Tasa de Respiración (mg CO₂ kg⁻¹h⁻¹). Los datos son la media ± ES. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre estados de desarrollo.

Parámetros fisicoquímicos

Los resultados de color obtenidos mostraron un incremento del °Hue durante los primeros estados hasta S3 y S4, a partir de los cuales los valores de este parámetro descendieron hasta el noveno y décimo estado (Figura 3). De manera que, el color externo de los frutos viró entre tonalidades verdes y amarillentas en los estados iniciales y adquirió tonalidades cada vez más rojizas desde el séptimo estado hacia el final del desarrollo.

La atenuación de las totalidades verdes podría deberse al proceso de desverdización, caracterizado principalmente por la degradación de clorofilas (Lu et al., 2024), y la aparición de tonalidades cada vez más rojizas podría relacionarse con la síntesis y acumulación de antocianinas (Butelli et al., 2017).

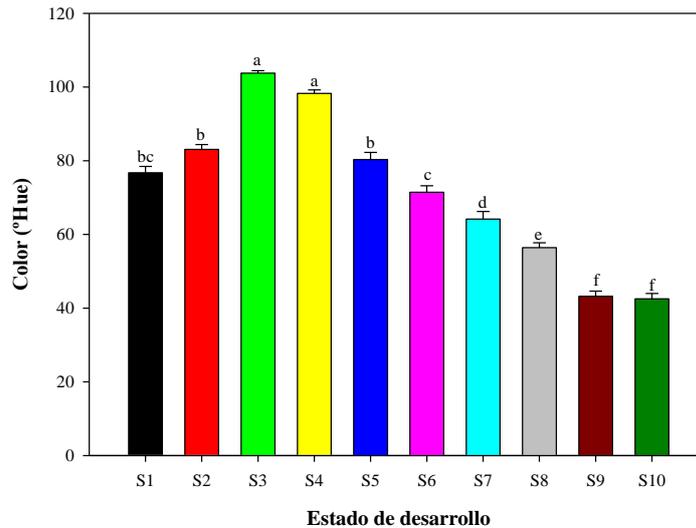


Figura 3. Influencia del estado de desarrollo (S1-S10) de Finger Lime sobre su color externo (°Hue). Los datos son la media \pm ES. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre estados de desarrollo.

Con respecto a la firmeza, los dos primeros estados de desarrollo presentaron los valores más bajos ($p < 0,05$), seguidos por el S3, que no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$) respecto a S5, S6, S7 y S9. Estos últimos tampoco mostraron diferencias significativas respecto a S4, S8 y S10 (Figura 4).

El incremento de la firmeza registrado durante los primeros estados de desarrollo podría relacionarse con un aumento de volumen y adquisición de una mayor turgencia por parte de las células vegetales, derivando en un incremento de la compacidad de los tejidos del fruto (Agustí et al., 2020). Asimismo, se ha visto que el tamaño del fruto podría influir sobre la firmeza, pues, los frutos más pequeños, que se encontraban principalmente en los primeros estados y, por tanto, poseían un menor desarrollo fisiológico, presentaban vesículas menos desarrolladas y con menor contenido de zumo que los frutos grandes. Ello podría influir en la turgencia de dichas vesículas, así como en la compacidad del endocarpio, llegando a observar espacios en el interior de algunos frutos.

Por otro lado, generalmente, el avance de la maduración implica una disminución en la firmeza de los frutos como consecuencia de una amplia gama de mecanismos que pueden diferir entre especies e incluso entre cultivares que pertenecen a la misma especie (Valero y Serrano, 2013). Sin embargo, de acuerdo con los resultados representados en la Figura 4, no se puede concluir esta tendencia en Finger Lime, ya que, a partir del tercer estado (frutos con tamaño medio similar) la firmeza se mantuvo relativamente estable, sin diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los distintos estados (S4-S10).

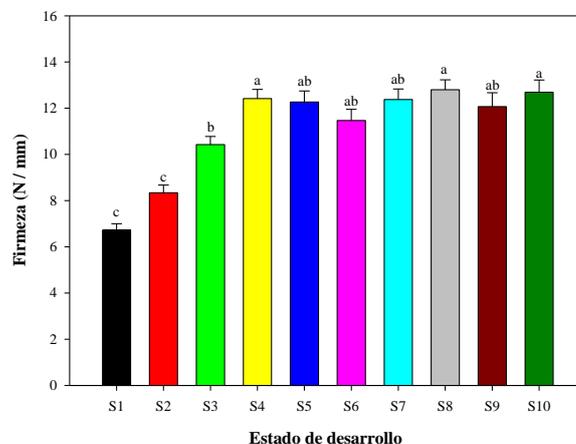


Figura 4. Influencia del estado de desarrollo (S1-S10) de Finger Lime sobre su Firmeza (N/mm). Los datos son la media \pm ES. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre estados de desarrollo.

Por otro lado, se observó un incremento de la AT en los primeros estados (Figura 5), encontrándose los valores más bajos en el S1, seguido del S2 y los más elevados en el resto de los estados (S3-S10), que no presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre ellos.

El ácido orgánico mayoritario asociado a la acidez de la pulpa en los cítricos es el ácido cítrico. Generalmente sus niveles aumentan durante los primeros estados de desarrollo y descienden durante la maduración como consecuencia de su dilución y metabolización (Sadka et al., 2019). Este último fenómeno adquiere mayor importancia tras la recolección, pues, mientras el fruto permanece en el árbol existe un suministro de sustancias encargado de compensar las pérdidas que se generan en el fruto. Sin embargo, este descenso no ha sido registrado, posiblemente debido a que el Finger Lime comparte un modelo fisiológico más semejante al limón, en el que a pesar de que su acidez también desciende hacia el final de su desarrollo (Serna-Escolano et al., 2022), a diferencia de otros cítricos, el ácido cítrico permanece en concentraciones consistentemente elevadas (Hussain et al., 2017; Agustí et al., 2020).

Por otro lado, los resultados obtenidos para este parámetro a partir del S3 (éste incluido) se encontraron dentro del rango reportado por Bowman et al. (2019) desde la primera cosecha (25 de junio) hasta la cuarta y última (4 de septiembre), con valores que oscilaron entre 4,5 y 7,2 %, aproximadamente.

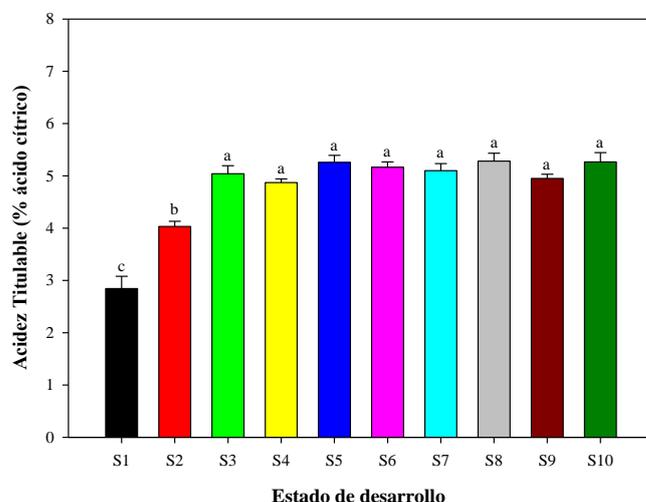


Figura 5. Influencia del estado de desarrollo de Finger Lime (S1-S10) sobre su Acidez Titulable (% ácido cítrico). Los datos son la media \pm ES. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre estados de desarrollo.

Con respecto a los SST, S1, S2 y S8 fueron los estados con un mayor contenido en sólidos solubles totales, sin presentar diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) respecto a S5, S7 y S10, cuyos valores oscilaron entre $18,55 \pm 0,18$ y $19,88 \pm 0,37$ °Brix (Figura 6). En cambio, S6 fue el estado con menor contenido en SST ($15,53 \pm 0,15$ °Brix). Estos resultados distan de los valores observados en otros trabajos. Concretamente, Wang et al. (2019) evaluaron el contenido en SST de los cultivares 'XiangBin' y 'LiSiKe' obteniendo valores de $37,92 \pm 2,50$ y $36,54 \pm 3,03$ °Brix, respectivamente. En cambio, en otro estudio los niveles de SST del cultivar 'Minnie Finger Lime' eran inferiores a los registrados en el presente estudio, encontrando un incremento desde el 8,2 % en la primera cosecha hasta el 9,5 % en la cuarta cosecha y un valor promedio de las cuatro cosechas del 8,7 % (Bowman et al., 2019). Estas diferencias podrían asociarse principalmente a los diferentes cultivares empleados.

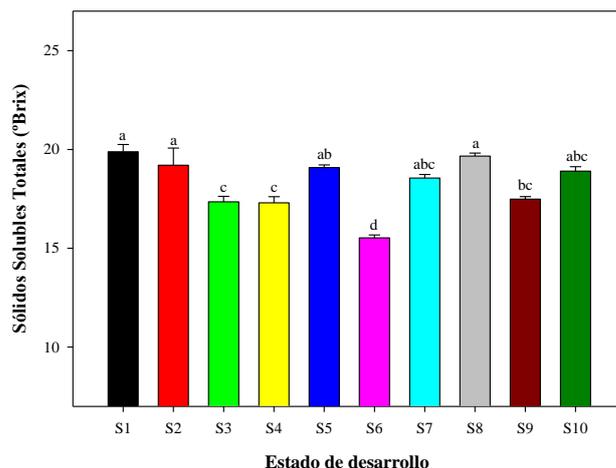


Figura 6. Influencia del estado de desarrollo (S1-S10) de Finger Lime sobre su contenido en Sólidos Solubles Totales (°Brix). Los datos son la media \pm ES. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre estados de desarrollo.

Contenido fenólico total, carotenoides totales y actividad antioxidante total

Los valores para el CFT se encontraron en un rango de $236,33 \pm 10,41$ a $312,30 \pm 7,17$ mg GAE 100 g^{-1} de PF, siendo S1 y S5 los que presentaron el menor y mayor CFT, respectivamente. S1 no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$) respecto a S2, S3, S4, S7 ni S10; del mismo modo, no se observaron diferencias significativas entre S5 y S3, S6, S8 y S9 (Figura 7). Así pues, se obtuvo una tendencia ligeramente ascendente, sobre todo hasta S5.

Los resultados del presente estudio, especialmente para S5, fueron similares a los reportados por Johnson et al. (2022), que determinaron el CFT en el flavedo de cinco cultivares de Finger Lime. Los resultados mostraron valores de 351 ± 10 mg GAE 100 g^{-1} de PF en el cultivar Durhams Emerald y de 317 ± 6 mg GAE 100 g^{-1} de PF en Chartreuse. Los valores obtenidos en Rhyne Red, Red Champagne y en un cultivar híbrido que comprende un cruce entre *C. australasica* x (*C. hystrix* x *C. medica*) fueron superiores, con valores por encima de los 400 mg GAE 100 g^{-1} de PF. Sin embargo, valores inferiores fueron observados por Adhikari et al. (2021), entre 35 y 55 mg GAE 100 g^{-1} de PF, que evaluaron el CFT en la piel de cuatro selecciones de Finger Lime: de pulpa roja (cultivar tipo *sanguinea*), de pulpa blanca, de un híbrido de pulpa roja y de un cultivar tipo sanguínea comercialmente disponible. Por lo tanto, el CFT en Finger Lime puede depender tanto de la selección o cultivar como de la metodología para su análisis.

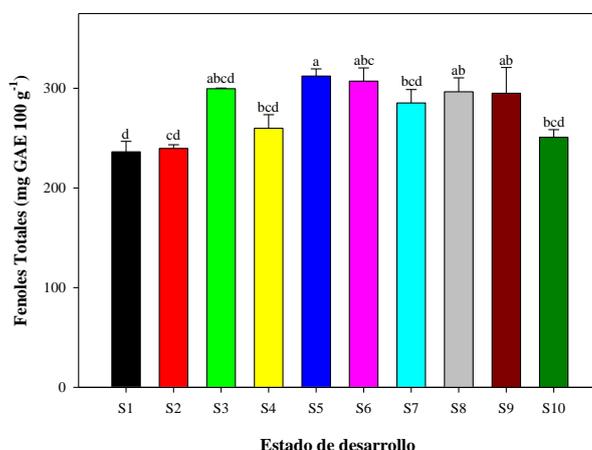


Figura 7. Influencia del estado de desarrollo (S1-S10) de Finger Lime sobre su Contenido Fenólico Total (mg GAE 100 g^{-1} de PF). Los datos son la media \pm ES. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre estados de desarrollo.

En cuanto al contenido en carotenoides, se observó un descenso con el avance del desarrollo, desde una concentración de $1,762 \pm 0,005$ a $0,298 \pm 0,021$ mg 100 g^{-1} de PF (Figura 8).

Durante la maduración de los cítricos, se produce un viraje de color como consecuencia de la degradación de las clorofilas del flavedo e incremento de la presencia de carotenoides. Conesa et al. (2019) encontraron un incremento del valor de las coordenadas de color a^* y b^* y descenso del $^{\circ}\text{Hue}$, acompañados de una disminución de la concentración de carotenoides en la piel del limón del cultivar 'Fino 49' durante su maduración, pasando de 21 a principios de octubre a valores de 7 y 3 mg kg^{-1} en enero, dependiendo del año de cosecha, concentraciones similares a las observadas en Finger Lime. Asimismo, señalaron un aumento de la concentración de β -criptoxantina, que alcanzó los 2,51 mg kg^{-1} .

Por otro lado, de acuerdo con Nakandala et al. (2024), que evaluaron el genoma relacionado con la coloración rojo/naranja de cinco cultivares de Finger Lime (*C. australasica* cv 1, *C. australasica* cv 2 (Rainbow), *C. australasica* cv 3 (Red champagne), *C. australasica* cv 4 (Red Finger lime) y *C. australasica* cv 5 (Ricks red)), los colores de piel y pulpa de los cinco cultivares podrían estar regulados a nivel de transcripción por genes reguladores de antocianinas y β -citraurina, un apocarotenoide, posiblemente derivado de la β -criptoxantina, que como se ha visto, incrementa durante la maduración del limón.

De manera que, tanto la degradación de clorofilas, como los pigmentos β -criptoxantina y antocianinas podrían relacionarse con el incremento de la tonalidad rojiza del Finger Lime observada en el presente estudio (Figura 3).

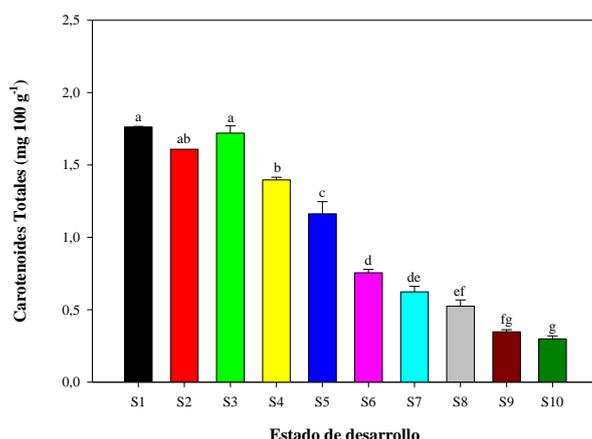


Figura 8. Influencia del estado de desarrollo de Finger Lime (S1-S10) sobre su Contenido en Carotenoides Totales (mg 100 g^{-1} de PF). Los datos son la media \pm ES. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre estados de desarrollo.

La AAT-H mostró un aumento a lo largo del desarrollo, siendo los estados comprendidos entre S1 y S4 los que presentan los valores más bajos, S5-S8, junto con S3, los intermedios y S9 y S10 los más elevados. En cambio, en el caso de la AAT-L, S6 presentó los valores más elevados, sin presentar diferencias significativas ($p > 0,05$) respecto a S5 y S10 y, aunque los valores más bajos se registraron en los dos primeros estados e incrementaron hasta S6, posteriormente descendieron en S7 y se mantuvieron estables hasta S9. Además, cabe destacar que la AAT-L fue inferior a la AAT-H (Figura 9).

La suma de la AAT-H y AAT-L representaría la AAT, que permite comparar estos resultados con los bibliográficos. Los valores reportados por Cáceres-Vélez et al. (2022) son considerablemente inferiores a los obtenidos en el presente estudio, 92 mg TE 100 g^{-1} frente a 323 - 464 mg TE 100 g^{-1} de PF, lo que puede relacionarse con el análisis de diferentes cultivares o con el método de extracción empleado. En este sentido, Aznar et al. (2022) informaron sobre las diferencias en la AAT de Finger Lime medida mediante el ensayo de capacidad de reducción férrica según el agente empleado en la partición líquido-líquido de la fracción acuosa obtenida tras la extracción con metanol:agua (80:20 (v/v)) y evaporación del disolvente, obteniendo valores de $176,43 \pm 0,15$ mg TE/100 g de peso seco (PS) en la fracción de acetato de etilo, frente a $0,20 \pm 0,00$ mg TE/100 g PS en la fracción de hexano.

Por otro lado, se observó que los compuestos fenólicos contribuyen a la AAT-H, sobre todo en los primeros estados de desarrollo. La variación en el CFT también se reflejó en la AAT evaluada en otros estudios (Aznar et al., 2022). Sin embargo, a la AAT-H también contribuyen otros compuestos como algunas vitaminas hidrosolubles, entre ellas el ácido ascórbico, presentando el Finger Lime verde 0,26 y el rosa 0,91 mg g⁻¹ de PF (Konczak et al., 2010). Por otro lado, puesto que los carotenoides son sustancias liposolubles, cabría esperar cierta correlación positiva entre su concentración y la AAT-L; sin embargo, en este caso la AAT-L podría depender en mayor medida de otras sustancias liposolubles con actividad antioxidante, como los tocoferoles, siendo la cantidad de vitamina E en Finger Lime verde y rosa de, aproximadamente, 0,521 y 2,360 mg 100 g⁻¹ de PF, respectivamente (Konczak y Roulle. 2011).

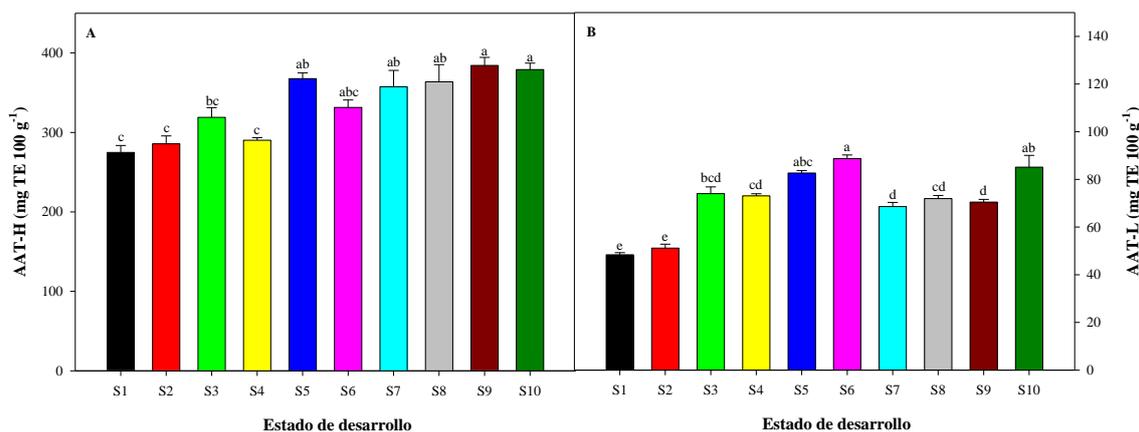


Figura 9. Influencia del estado de desarrollo (S1-S10) de Finger Lime sobre su Actividad Antioxidante (mg TE 100 g⁻¹ de PF) medida en la fase (A) hidrosoluble (AAT-H) y (B) liposoluble (AAT-L). Los datos son la media \pm ES. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre estados de desarrollo.

Conclusiones

El proceso de desarrollo de Finger Lime destaca por presentar los cambios más significativos en los primeros estados de desarrollo, sobre todo en lo que respecta a la acidez titulable y la firmeza, que incrementaron hasta el tercer estado. También incrementó el contenido fenólico total desde el primer hasta el quinto estado de desarrollo, reflejándose en los valores de actividad antioxidante medida en la fase hidrosoluble. Tras dichos incrementos, la evolución de estos parámetros permaneció relativamente estable. Sin embargo, en el caso del color externo de los frutos, además de encontrarse una variación entre tonalidades verdes y amarillas durante el inicio del desarrollo, se produjo un viraje a tonalidades rojizas hacia el final del desarrollo. Así pues, considerando los resultados del presente estudio podría ser recomendable recolectar el Finger Lime entre el quinto y décimo estado de desarrollo, atendiendo a la clasificación realizada. Sin embargo, se requieren futuros estudios para determinar la vida útil poscosecha de los frutos en dichos estados con el fin de ofrecer la máxima calidad y vida útil a los consumidores.

Bibliografía

Adhikari, B., Dutt, M., Vashisth, T., 2021. Comparative phytochemical analysis of the fruits of four Florida-grown finger lime (*Citrus australasica*) selections. Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie/Food Science & Technology. 135, 110003. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110003>

Agustí, M., Mesejo, C., Reig, C., 2020. Citricultura, 3^a ed. Mundi-Prensa.

Aznar, R., Rodríguez-Pérez, C., Rai, D. K., 2022. Comprehensive characterization and quantification of antioxidant compounds in Finger Lime (*Citrus australasica* L.) by HPLC-QToF-MS and UPLC-MS/MS. Applied Sciences. 12(3), 1712. <https://doi.org/10.3390/app12031712>

- Bowman, K. D., McCollum, G., Plotto, A., Bai, J., 2019. Minnie Finger Lime: a new novelty citrus cultivar. *HortScience*. 54(8), 1425-1428. <https://doi.org/10.21273/hortsci13622-18>
- Butelli, E., Garcia-Lor, A., Licciardello, C., Casas, G. L., Hill, L., Recupero, G. R., Keremane, M., Ramadugu, C., Krueger, R., Xu, Q., Deng, X., Fanciullino, A., Froelicher, Y., Navarro, L., Martin, C., 2017. Changes in anthocyanin production during domestication of *Citrus*. *Plant Physiology*. 173(4), 2225-2242. <https://doi.org/10.1104/pp.16.01701>
- Cáceres-Vélez, P. R., Ali, A., Fournier-Level, A., Dunshea, F. R., Jusuf, P. R., 2022. Phytochemical and safety evaluations of Finger Lime, Mountain Pepper, and Tamarind in Zebrafish Embryos. *Antioxidants*. 11(7), 1280. <https://doi.org/10.3390/antiox11071280>
- Conesa, A., Manera, F., Brotons, J., Fernandez-Zapata, J., Simón, I., Simón-Grao, S., Alfosea-Simón, M., Nicolás, J. M., Valverde, J., García-Sánchez, F., 2019. Changes in the content of chlorophylls and carotenoids in the rind of Fino 49 lemons during maturation and their relationship with parameters from the CIELAB color space. *Scientia Horticulturae*. 243, 252-260. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.08.030>
- Delort, E., Yuan, Y., 2018. Finger lime/The Australian Caviar— *Citrus australasica*. Elsevier eBooks. 203-210. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803138-4.00025-3>
- Denaro, M., Smeriglio, A., Xiao, J., Cornara, L., Burlando, B., Trombetta, D., 2020. New insights into *Citrus* genus: From ancient fruits to new hybrids. *Food Frontiers*. 1(3), 305-328. <https://doi.org/10.1002/fft2.38>
- Eaks, I. L., 1970. Respiratory response, ethylene production, and response to ethylene of citrus fruit during ontogeny. *Plant Physiology*. 45(3), 334-338. <https://doi.org/10.1104/pp.45.3.334>
- FAO, 2021. Citrus Fruit Statistical Compendium 2020. Rome.
- Gutiérrez-Pozo, M., Serna-Escolano, V., Giménez-Berenguer, M., Giménez, M. J., Zapata, P. J., 2023. The preharvest application of essential oils (carvacrol, eugenol, and thymol) reduces fungal decay in lemons. *Agriculture*. 13(7), 1437. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071437>
- Hardy, S., Wilk, P., Viola, J., Rennie, S., 2010. Growing Australian native finger limes. *Primefact*. 979, 1-11.
- Hussain, S. B., Shi, C., Guo, L., Kamran, H. M., Sadka, A., Liu, Y., 2017. Recent advances in the regulation of citric acid metabolism in citrus fruit. *Critical reviews. Plant Sciences*. 36(4), 241-256. <https://doi.org/10.1080/07352689.2017.1402850>
- Johnson, J. B., Batley, R., Manson, D., White, S., Naiker, M., 2022. Volatile compounds, phenolic acid profiles and phytochemical content of five Australian finger lime (*Citrus australasica*) cultivars. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie/Food Science & Technology*. 154, 112640. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112640>
- Konczak, I., Roulle, P., 2011. Nutritional properties of commercially grown native Australian fruits: Lipophilic antioxidants and minerals. *Food Research International*. 44(7), 2339-2344. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.02.023>
- Konczak, I., Zabaras, D., Dunstan, M., Aguas, P., 2010. Antioxidant capacity and hydrophilic phytochemicals in commercially grown native Australian fruits. *Food Chemistry*. 123(4), 1048-1054. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.05.060>
- Lu, Y., Shen, X., Li, Y., Xu, Y., Chen, Y., Chen, Y., Hu, X., Li, X., Sun, X., Gong, J., 2024. Regulation of chlorophyll and carotenoid metabolism in citrus fruit. *Horticultural Plant Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2024.02.004>
- Nakandala, U., Furtado, A., Masouleh, A. K., Smith, M. W., Williams, D. C., Henry, R. J., 2024. The genome of *Citrus australasica* reveals disease resistance and other species specific genes. *BMC Plant Biology*. 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04988-8>

Sadka, A., Shlizerman, L., Kamara, I., Blumwald, E., 2019. Primary metabolism in citrus fruit as affected by its unique structure. *Frontiers in Plant Science*. 10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01167>

Serna-Escolano, V., Giménez, M. J., García-Pastor, M. E., Dobón-Suárez, A., Pardo-Pina, S., Zapata, P. J., 2022. Effects of degreening treatment on quality and shelf-life of organic lemons. *Agronomy*. 12(2), 270. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020270>

Serna-Escolano, V., Gutiérrez-Pozo, M., Dobón-Suárez, A., Zapata, P. J., Giménez, M. J., 2023. Effect of preharvest treatments with sodium bicarbonate and potassium silicate in Navel and Valencia oranges to control fungal decay and maintain quality traits during cold storage. *Agronomy*. 13(12), 2925. <https://doi.org/10.3390/agronomy13122925>

Sun, Y., Singh, Z., Tokala, V. Y., Heather, B., 2019. Harvest maturity stage and cold storage period influence lemon fruit quality. *Scientia Horticulturae*. 249, 322-328. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.056>

Tadeo, F. R., Cercós, M., Colmenero-Flores, J. M., Iglesias, D. J., Naranjo, M. A., Ríos, G., Carrera, E., Ruiz-Rivero, O., Lliso, I., Morillon, R., Ollitrault, P., Talon, M., 2008. Molecular physiology of development and quality of *Citrus*. *Advances in Botanical Research*. 147-223. [https://doi.org/10.1016/s0065-2296\(08\)00004-9](https://doi.org/10.1016/s0065-2296(08)00004-9)

Terol, J., Nueda, M. J., Ventimilla, D., Tadeo, F., Talon, M., 2019. Transcriptomic analysis of *Citrus clementina* mandarin fruits maturation reveals a MADS-box transcription factor that might be involved in the regulation of earliness. *BMC Plant Biology*. 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12870-019-1651-z>

Valero, D., Serrano, M., 2013. Growth and ripening stage at harvest modulates postharvest quality and bioactive compounds with antioxidant activity. *Stewart Postharvest*. 9(3), 1-8. <https://doi.org/10.2212/spr.2013.3.7>

Wang, Y., Ji, S., Zang, W., Wang, N., Cao, J., Li, X., Sun, C., 2019. Identification of phenolic compounds from a unique citrus species, finger lime (*Citrus australasica*) and their inhibition of LPS-induced NO-releasing in BV-2 cell line. *Food and Chemical Toxicology*. 129, 54-63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2019.04.006>

Efecto de tratamientos pre-cosecha con sorbitol sobre la calidad y producción de nectarina cv. Garcima

A. Guirao¹, A. Solana-Guilabert¹, J.M. Valverde¹, H.M. Díaz-Mula¹, D. Martínez-Romero¹

¹ Instituto de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO), Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), Ctra. Beniel Km. 3.2, 03312 Orihuela, Alicante, España. e-mail: a.guirao@umh.es

Resumen

Las nectarinas Cv. Garcima (*Prunus persica* (L). Batsch) se caracterizan por la ausencia de vellosidades en su piel a diferencia de otros frutos del género *prunus* como el melocotón. Murcia es la principal región de cultivo en España, produciendo el 27.5 % de nectarinas en 2022. La recolección temprana de estos frutos conlleva una serie de desventajas en la calidad comercial, como menor concentración de azúcares, menor síntesis de pigmentos, color y minerales frente a frutos tardíos. Los polialcoholes juegan un importante papel en la fisiología vegetal, siendo capaces de transportar nutrientes hacia los frutos, que actúan como sumideros de azúcares y otros compuestos. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de aplicaciones foliares de sorbitol al 2 % y 5 % empezadas a aplicar en distintos momentos fenológicos en pre-cosecha y evaluar su efecto sobre la calidad y producción en el momento de la recolección. Se seleccionaron 7 árboles por dosis de sorbitol y estado fenológico de partida. Los estados fenológicos seleccionados se dan 2 semanas después de la floración completa, en el cambio de color del fruto y 2 semanas antes de la recolección, realizando 2 aplicaciones en cada estado fenológico. Para determinar la calidad de las nectarinas se llevan a cabo ensayos fisicoquímicos como el color, la tasa respiratoria, tasa de etileno, sólidos solubles totales, acidez total e índice de madurez. Los resultados muestran que los tratamientos con sorbitol adelantan la producción manteniendo o incluso mejorando los parámetros de calidad con valores de sólidos solubles totales y acidez más altos que el grupo control, sin embargo, la aplicación de menor concentración (2 %) fue más adecuada para el mantenimiento de la firmeza frente al tratamiento 5 % de sorbitol y control. Estas diferencias son más pronunciadas cuando los tratamientos comienzan en el estado fenológico más temprano. Por otra parte, no hubo diferencias significativas respecto al color externo e interno de los frutos tratados frente al grupo control. De esta manera se muestra que los tratamientos con sorbitol 2% son efectivos para el mantenimiento de la calidad en el momento de la recolección además de promover una cosecha más temprana y mejor calidad.

Palabras clave: polioles, *Prunus persica* L. nectarina, rendimiento, azúcares, respiración.

Effect of pre-harvest sorbitol treatments on nectarine cv. Garcima quality and production

Abstract

Nectarines Cv. Garcima (*Prunus persica* (L). Batsch) are characterized by the absence of fuzz on their skin unlike other fruits of the *prunus* genre such as the peach. Murcia is the main growing region in Spain, producing 27.5 % of nectarines in 2022. Early harvesting of these fruits entails some disadvantages in commercial quality, such as lower concentration of sugars, lower synthesis of pigments, color and minerals compared to late harvest fruits. Polyalcohols play an important role in plant physiology, being capable of transporting nutrients to the fruits, which act as sinks for sugars and other compounds. The objective of this work is to evaluate the effect of foliar applications of 2 % and 5 % sorbitol started to be applied at different phenological moments before harvest and to evaluate its effect on quality and production at the time of harvest. 7 trees were selected by sorbitol dose and initial phenological state. Phenological stages were 2 weeks after flowering phase, at color change and 2 weeks before commercial harvest date. 2 applications were made in each phenological stage. To determine the quality of nectarines, physicochemical tests are carried out such as color, respiratory rate, ethylene rate, total soluble solids, total acidity and maturity index. The results show that sorbitol treatments advance production while maintaining or even improving quality parameters with higher total soluble solids and acidity values than the control group, however, the application of a lower concentration (2 %) was more suitable for maintenance of

firmness compared to 5 % sorbitol treatment and control. These differences are wider when treatments begin at the earliest phenological stage. On the other hand, there were no significant differences regarding the external and internal color of the treated fruits compared to the control group. Thus, it is shown that treatments with 2 % sorbitol are effective in maintaining quality at the time of harvest in addition to promoting an earlier harvest and better quality.

Keywords: polioles, *Prunus persica* L. nectarina, yield, sugars, respiration.

Introducción

La nectarina (*Prunus persica* (L). Batsch) se trata de un fruto climatérico caracterizado por su sabor dulce, la jugosidad de la pulpa y la ausencia de vellosidades a diferencia de otras frutas del género *prunus*. Además, es un fruto valorado por el consumidor debido al contenido en vitamina C, compuestos fenólicos, carotenoides y otros compuestos bioactivos que han demostrado ser beneficiosos para la salud humana (Gil et al., 2002). En España, los frutos de hueso tienen un gran peso, siendo el principal productor europeo (42 % de la producción) en 2023 con un volumen de 1.74 millones de toneladas, de las cuales aproximadamente el 30 % corresponden a nectarina, incrementando la proporción con respecto al 27.5 % de 2022 (MAPA, 2023).

Es conocido que, desde el momento de la cosecha, los productos vegetales dependen de sus reservas para regular sus funciones fisiológicas hasta el final de su vida útil. Los polioles como el sorbitol son compuestos orgánicos con una estructura molecular similar a los azúcares con varios grupos -OH en su estructura. Tienen un rol fundamental en la fisiología vegetal puesto que actúan como osmo-protectores, crioprotectores y secuestrantes de especies reactivas de oxígeno (Pleyerová et al., 2022), además de haber demostrado tener función de transporte de minerales relativamente inmóviles en las plantas como zinc (Zhang et al., 2013), boro (Will et al., 2011) o calcio (Guirao et al., 2024). Algunas frutas como es el caso del género *prunus* son capaces de acumular sorbitol de forma significativa como reserva. Aunque la aplicación de polioles se ha practicado en otras ocasiones, la variabilidad metabólica de acumulación de sustratos entre especies frutales ocasiona la necesidad de determinar los efectos fisiológicos, así como la cantidad y el momento de aplicación óptimos de sorbitol para la nectarina. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, el objetivo de este trabajo es determinar el efecto en la producción, así como en la calidad de la fruta en el momento de la cosecha tras aplicar tratamientos de sorbitol a concentraciones del 2 % y del 5 % y a partir de 3 estados fenológicos diferenciados que van desde la floración hasta la maduración comercial.

Materiales y Métodos

Metodología

Los tratamientos se llevaron a cabo en la Región de Murcia, concretamente en la finca Agrícola Don Fernando (Frutas Esther, S.A.) ubicada en el municipio de Molina de Segura. Las nectarinas seleccionadas fueron de la variedad ‘Garcima’. Los tratamientos consistieron en aplicaciones foliares de concentraciones de sorbitol (Barcelonesa de Drogas y Productos Químicos SAU, España) al 2 % y al 5 %. Se utilizó mochila pulverizadora de 15 litros de capacidad y como mojante éter de alcohol poliglicol 20 % p/v (Elogium, Sipcarn Iberia SL, España). Los árboles control se pulverizaron únicamente con agua y mojante.

Se seleccionaron 21 árboles dispuestos en fila para cada tratamiento. Los tratamientos se aplicaron en distintos momentos fenológicos del fruto. En el estado 1 (E1) los tratamientos se aplicaron 2 semanas tras la floración en los árboles y se trataron solo 7 árboles a partir de este día hasta el día de la recolección comercial. Los árboles del estado 2 (E2) se comenzaron a aplicar en el viraje de color del fruto de verde a amarillo y rojo, un mes y medio después de la floración hasta la recolección comercial. El estado 3 (E3) se aplicó a los últimos 7 árboles de cada tratamiento y estas aplicaciones fueron desde que los frutos alcanzaron un diámetro comercial igual o superior a 56 mm (3 meses desde la floración), hasta el día de la recolección comercial. Se aplicaron los tratamientos cada 2

semanas, de forma que en cada estado se realizaron 2 aplicaciones, llegando a acumular 6, 4 y 2 tratamientos en E1, E2 y E3, respectivamente.

Tras una semana desde la última aplicación, se seleccionaron frutos comercialmente maduros de cada concentración y en cada estado de aplicación y se trasladaron al laboratorio del Departamento de Tecnología Agroalimentaria de la Universidad Miguel Hernández (Orihuela, Alicante) para realizar las determinaciones y los análisis de calidad de la nectarinas como: el color, tasa de respiración y de etileno, sólidos solubles totales, acidez total e índice de madurez.

Producción

La producción se midió escalonadamente de acuerdo con la recogida comercial de la empresa productora. Solo los frutos con diámetro ≥ 66 mm y sin color verde se recogieron en cada recolección. En total fueron 7 recolecciones en las que se determinaron los kg de fruta de cada tratamiento con las especificaciones mencionadas anteriormente.

Color

Se determinó el color midiendo los parámetros L^* , a^* y b^* en el espacio de color CIELAB con un colorímetro CR200 (Konica Minolta, Japón). Se realizó la media de 3 lecturas de la superficie de cada fruto con una rotación de 120° en cada lectura. Para el color interno, se abrieron los frutos y se midió el color de la pulpa, alrededor del hueso, también rotando el fruto y haciendo la media de 3 lecturas. El tamaño de muestra fue $n = 16$ y los resultados se muestran como ángulo Hue (H^*), croma (C^*) y luminosidad ($L^* \pm ES$).

Tasa de respiración y etileno

Los frutos se introdujeron en botes cilíndricos estancos de 3.7 L de capacidad con un septum incorporado para la extracción de muestras. Tras 1 h, se tomaron las muestras de aire con jeringuillas de 1 mL de capacidad. Las muestras fueron inyectadas en un cromatógrafo de gases Shimadzu CG-14B con detector de conductividad térmica y a un cromatógrafo de gas GC 2010 con detector de ionización de llama. Se introdujeron 4 frutos por bote y cada tratamiento se hizo por triplicado. Los resultados se expresan como $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1} \pm ES$ para la tasa respiratoria y $\text{nmol kg}^{-1} \text{ h}^{-1} \pm ES$ para la tasa de etileno.

Firmeza

Para el análisis de firmeza se colocaron horizontalmente los frutos y se sometieron a una fuerza de deformación del 5 % con una sonda plana de 10 mm de diámetro acoplada a un analizador de textura TX-XT2i (Stable Microsystems, Godalming, RU). Esta deformación se aplicó de forma paralela a la costura del fruto y en ambas caras de cada fruto. Los resultados se expresan como $\text{N mm}^{-1} \pm ES$ ($n=16$).

Sólidos solubles totales, acidez total e índice de maduración

Las nectarinas fueron homogeneizadas y con un paño de tela se extrajo el zumo del cual se midieron los sólidos solubles totales (SST), la acidez total (AT) y el índice de madurez (IM). Los zumos se extrajeron de 3 réplicas por tratamiento y cada réplica contenía 4 frutos.

Para la determinación de SST, se utilizó un refractómetro Atago PR-101 (Atago Co. Ltd., Tokyo, Japón) y para la AT un titulador automático (785 DMP Titrino, Metrohm), empleando una solución de NaOH al 0.1N y hasta llegar a un pH de 8.1. El índice de madurez se calculó mediante la ecuación (1). Los resultados se expresan en $^\circ \text{Brix} \pm ES$ para los SST y $\text{g eq. ác. málico } 100 \text{ g}^{-1} \pm ES$ para la AT.

$$\text{IM} = \text{SST } (^\circ \text{Brix}) / \text{AT } (\text{g eq. ác. málico } 100 \text{ g}^{-1}) \quad (1)$$

Análisis estadístico

Se empleó el programa SigmaPlot V. 11 para Windows como software para el análisis de datos. Se sometieron los diferentes tratamientos a la prueba estadística ANOVA de una vía junto a la prueba de Tukey para encontrar diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

Resultados y Discusión

En cuanto a la producción, en la Tabla 1 se puede apreciar que el tratamiento control junto a los tratamientos con las dosis bajas de sorbitol (2 %) en cualquier estado tienen la producción más baja, mientras que la producción de los tratamientos al 5 %, especialmente en los estados 2 y 3 son superiores al control en 5.34 % y 3.65 %, respectivamente. A partir del tercer pase, los tratamientos en todos los estados tienen mayor tasa de cosecha que el control, del cual se recolectó la mayoría de los frutos en los últimos dos pases, 37.05 % y 38.98 %, respectivamente. La mayor diferencia de cosecha se da en el pase 5, donde el control ha cosechado el 24.01 % de sus frutos mientras que en el resto de los tratamientos se ha cosechado entre el 29.43 % y el 37.20 %.

El sorbitol podría mejorar el transporte y acumulación de minerales y otros electrolitos en el fruto. Esto repercutía en un incremento del tamaño de los y adelanto de la cosecha. En otros trabajos como el de Conde et al. (2024) la aplicación de polioles estimuló enzimas como el ABA, y las enzimas implicadas en la ruta de los fenilpropanoides, especialmente la PAL. Además, obtuvo incrementos en el contenido de antocianinas, compuestos fenólicos, ácido fértrico, E-resveratrol, E-piceatanol, y más compuestos en el exocarpo de uva, poniendo de manifiesto la capacidad bioestimulante de los tratamientos con polioles.

Tabla 1. Producción (kg árbol⁻¹) en cada pase de recolección para cada estado y dosis de aplicación.

	Estado 1		Estado 2		Estado 3		
	Control	2 %	5 %	2 %	5 %	2 %	5 %
1° Pase	0.102	0.36	0.51	0.35	0.30	0.41	0.13
2° Pase	0.69	0.41	1.06	0.63	0.48	0.75	0.80
3° Pase	0.89	1.28	2.09	1.23	1.26	1.34	1.38
4° Pase	1.69	2.07	2.12	2.41	2.79	2.28	3.36
5° Pase	2.74	3.30	4.85	3.43	3.69	3.69	2.43
6° Pase	9.43	9.53	9.05	11.5	10.4	9.20	10.5
7° Pase	9.91	8.26	5.83	4.33	7.85	5.10	7.74
Total	25.5	25.2	25.5	23.9	26.8	22.8	26.4

El transporte de minerales por parte del sorbitol aplicado, como ocurre en el trabajo de Guirao et al. (2024) también podría promover la maduración temprana de los frutos. En otras frutas como la granada se ha observado aumentos de la producción con la aplicación de otros minerales como el zinc y el boro sin grandes efectos en los parámetros de calidad y contenido en antocianinas (Davaranah et al., 2016) así como en minerales como el fósforo y potasio, los cuales además de aumentar el rendimiento, también aumentaron la acidez total, el ácido ascórbico, contenido en compuestos fenólicos y contenido en antocianinas (Maity et al., 2022).

Tabla 2. Firmeza, tasa de respiración, tasa de etileno, sólidos solubles totales, acidez total, índice de madurez y color externo e interno de los tratamientos en el momento de la recolección.

	Estado 1			Estado 2		Estado 3	
	Control	2 %	5 %	2 %	5 %	2 %	5 %
Firmeza (N mm ⁻¹)	22.2±0.78 a	25.8±1.27 a	22.3±1.02 a	24.6±1.19 a	22.8±1.01 a	21.9±0.86 a	22.7±1.20 a
Tasa respiración (mg CO ₂ kg ⁻¹ h ⁻¹)	39.2±2.85 a	40.5±2.73 a	41.8±0.83 a	36.5±2.74 a	44.0±1.85 a	38.1±2.16 a	38.1±1.20 a
Tasa de etileno (nmol kg ⁻¹)	0.65±0.26 b	0.74±0.58 b	8.11±3.00 a	7.39±4.25 a	0.30±0.09 b	7.79±3.44 a	7.99±0.97 a
SST (° Brix)	9.64±0.06 b	9.83±0.11 b	10.8±0.10 a	9.70±0.08 b	9.98±0.05 b	9.97±0.10 b	9.85±0.06 b
AT (g eq. ác. málico 100 g ⁻¹)	1.26±0.01 b	1.31±0.01 a	1.31±0.02 a	1.26±0.01 b	1.32±0.01 a	1.27±0.01 b	1.22±0.01 b
IM	7.64±0.03 b	7.52±0.08 b	8.15±0.07 a	7.69±0.03 b	7.59±0.05 b	7.84±0.07 a	8.09±0.14 a
L* externo	51.6±1.49 a	51.9±1.55 a	50.1±1.48 a	52.0±1.45 a	52.3±1.33 a	51.1±1.46 a	49.1±1.47 a
h* externo	53.5±2.93 a	56.8±3.27 a	52.3±3.07 a	58.5±3.50 a	56.0±2.60 a	54.9±3.44 a	50.1±3.10 a
C* externo	43.1±0.61 a	41.1±0.63 a	41.5±0.56 a	40.6±0.64 a	42.0±0.83 a	42.3±0.52 a	42.6±0.74 a
L* interno	69.2±0.78 a	67.9±0.75 a	69.4±0.44 a	68.5±0.84 a	68.1±0.77 a	66.3±0.86 a	68.7±0.95 a
h* interno	97.9±0.97 a	97.5±0.88 a	95.2±1.00 a	95.9±0.96 a	95.6±0.61 a	94.5±1.17 a	96.2±0.88 a
C* interno	40.7±0.60 a	40.8±0.67 a	41.0±0.52 a	40.7±0.62 a	40.4±0.36 a	38.8±0.59 a	38.8±1.16 a

Respecto a los parámetros de calidad expuestos (Tabla 2), se aprecia que no hay diferencias significativas entre el control y los tratamientos con respecto a la firmeza. En cuanto al color, hay que destacar que no existen diferencias significativas externas o internas.

Tampoco lo hay respecto a la tasa respiratoria. Sí existen diferencias en cuanto a la tasa de etileno, aunque los valores son muy bajos (< 10 nmol kg⁻¹) en cualquier caso. Los frutos, como hemos indicado anteriormente, se cosechan cuando alcanzan la coloración propia de la variedad y un tamaño igual o superior a 66 mm. A pesar de adelantar la cosecha, no se provocan daños o estrés, o factores que activen enzimas hidrolíticas o que activen la producción de etileno auto catalítico y que podrían afectar a la calidad de la fruta.

Sin embargo, en relación con los SST (Tabla 2), todos los tratamientos tuvieron mayor contenido que el tratamiento control, si bien, solo el tratamiento del estado 1 al 5 % de dosis fue significativamente mayor, es decir, los frutos que más dosis y más aplicaciones recibieron. Este fenómeno puede tener su explicación en que el sorbitol puede acelerar el metabolismo de la sacarosa como explican Zhou et al. (2023). La acidez total actúa de la misma manera que los SST, teniendo los valores más altos en el estado más temprano, y sigue siendo significativamente más alto que el control en el estado 2 con la dosis más alta (5 %). Parece que se da una relación entre la producción de ácidos orgánicos y la dosis aplicada junto a una aplicación más temprana. Consecuentemente, el índice de madurez más alto lo expresan los frutos del estado 1 al 5 %. De la misma manera, en otro trabajo las aplicaciones foliares de sorbitol y complejo sorbitol-calcio tuvieron el mismo efecto en el incremento de SST y acidez en uva de mesa ‘Doña María’ (Guirao et al., 2024).

Conclusiones

Los tratamientos con sorbitol han demostrado adelantar la cosecha en todos los casos. Este efecto es destacable en estados de aplicación más tempranos. Además, ha mostrado una dosis-dependencia entre la concentración de sólidos solubles totales y acidez en los frutos con la dosis de sorbitol y la aplicación en los estados fenológicos más tempranos. Por otra parte, no ocasionaron defectos fisiológicos de firmeza y respiración ni tampoco provocaron cambios en el color.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del trabajo de investigación PID2022-137282OB-I00 financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.

Los autores agradecen a la Generalitat Valenciana, Conselleria de Educación, Universidad y Empleo por las becas de doctorado de Alberto Guirao Carrascosa (CIACIF/2022/270) para realizar estudios de doctorado y al Fondo Social Europeo por la cofinanciación de dichas becas.

Bibliografía

Conde, A., Badim, H., Dinis, L.T., Moutinho-Pereira, J., Ferrier, M., Unlubayir, M., Lanoune, A., Gerós, H., 2024. Stimulation of secondary metabolism in grape berry exocarps by a nature-based strategy of foliar application of polyols. *OENO One* 58, 1. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2024.58.1.7537>.

Davarpanah, S., Tehranifar, A., Davarynejad, G., Abadía, J., Khorasani, R., 2016. Effects of foliar applications of zinc and boron nano-fertilizers on pomegranate (*Punica granatum* cv. Ardestani) fruit yield and quality. *Sci. Hortic* 210, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.07.003>.

Gil, M.I., Tomás-Barberán, F.A., Hess-Pierce, B., Kader, A.A., 2002. Antioxidant Capacities, Phenolic Compounds, Carotenoids, and Vitamin C Contents of Nectarine, Peach, and Plum Cultivars from California. *J. Agric. Food Chem* 50, 17, 4976–4982. <https://doi.org/10.1021/jf020136b>.

Guirao, A., Valverde, J.M., Díaz-Mula, H.M., Valero, D., Serrano, M., Martínez-Romero, D., 2024. Role of Pre-Harvest Sorbitol–Calcium Treatments in Controlling Berry Drop in Bagged Table Grapes of the “Doña María” Variety. *Horticulturae* 10, 7, 698. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10070698>.

Maity, A., Marathe, R.A., Sarkar, A., Basak, B.B., 2022. Phosphorus and potassium supplementing bio-mineral fertilizer augments soil fertility and improves fruit yield and quality of pomegranate. *Sci. Hortic* 303, 111234. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111234>.

MAPA, 2023. Boletín fruta de hueso campaña 2023. https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/frutas-y-hortalizas/Documentos_fruta_hueso_2023.aspx/ (consultado el 08 de septiembre de 2024).

Will, S. Eichert, T. Fernández, V. Römheld, V., 2011. Absorption and mobility of foliar-applied boron in soybean as affected by plant boron status and application as a polyol complex. *Plant Soil* 344, 283–293. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0746-6>.

Zhang, Y. Fu, C. Yan, Y. Cheng, S., 2013. Zinc sulfate and sugar alcohol zinc sprays at critical stages to improve apple fruit quality. *Hort. Tech.* 23, 490–497. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.23.4.490>.

Zhou, H., Su, M., Du, J., Zhang, X., Li, X., Zhang, M., Hu, Y., Huan, C., Ye, Z., 2023. Crucial roles of sorbitol metabolism and energy status in the chilling tolerance of yellow peach. *Plant Physiol. Bioch.* 204, 108092. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108092>.

Recursos Fitogenéticos, Mejora, Biotecnología y Producción Vegetal

Estudio de la diversidad genética en almendro (*Prunus dulcis* (Miller) D.A. Webb)

Francisco J. Gómez-López¹, Federico Dicenta², Pedro J. Martínez-García³

Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, 30100, Murcia, España,
fjgomez@cebas.csic.es ; fdicenta@cebas.csic.es; pjmgarcia@cebas.csic.es

Resumen

El almendro *Prunus dulcis* (Miller) D.A. Webb, pertenece al género *Prunus* y a la familia *Rosaceae*. Es una especie alógama (necesita de la polinización cruzada) en origen, esto junto con la posible hibridación con otras especies durante su domesticación y dispersión hacen que el almendro presente una amplia diversidad genética. Sin embargo, la identificación de algunos genotipos auto-compatibles, la prioridad de obtener nuevas variedades atocompatibles y el uso recurrente de los mismos genitores en los programas de mejora, está generando una pérdida de la diversidad genética. Las secuencias de 27 genotipos (de almendro, melocotonero e híbridos), importantes como fuentes de autocompatibilidad en el programa de mejora de la Universidad de California, Davis, ocho variedades del CEBAS-CSIC y cuatro genotipos de la colección del INRAE, se utilizaron para analizar la diversidad genética y estructura poblacional. Los resultados mostraron que las accesiones de almendro tenían aproximadamente 4 veces más diversidad nucleotídica que las accesiones de melocotonero analizadas. También se observó que la diversidad nucleotídica se redujo ligeramente en las accesiones del programa de mejora de UC Davis en comparación con las variedades tradicionales españolas. Además, se obtuvo un valor de 0.295 del índice de fijación entre muestras de almendro y melocotonero, mostrando una diferenciación entre especies, mientras que se obtuvo un valor de 0.086 entre poblaciones de almendro, indicando una divergencia mínima entre ellas. Con el análisis de transcritos ubicados en regiones de alta/baja diversidad nucleotídica y fijación significativas, se observó que los procesos relacionados con el mantenimiento y desarrollo del meristemo, así como los procesos asociados con la regulación de la ubiquitinación o la regulación de la modificación de proteínas, eran significativos para la alta diversidad nucleotídica en variedades tradicionales de almendro. Por otro lado, los procesos asociados con la latencia, el desarrollo y la maduración de los frutos, se conservan entre almendro y melocotonero.

Palabras clave: Diversidad, fijación, poblaciones

Study of genetic diversity in *Prunus dulcis* (Miller) D.A. Webb

Abstract

The almond *Prunus dulcis* (Miller) D.A. Webb belongs to the *Prunus* genus and the *Rosaceae* family. Almond is a naturally allogamous species (needs cross-pollination), this together with the possible hybridizations with other species during its domestication and spread means that almond species have a wide genetic diversity. However, the identification of some self-compatible genotypes, the priority of obtaining new self-compatibles varieties and the recurrent use of the same genitors in breeding programs is leading to a loss of genetic diversity. The sequence of 27 genotypes (almond, peach, and hybrids) which are important sources of self-compatibility from the University of California, Davis breeding program, 8 varieties from CEBAS-CSIC, and 4 genotypes from the INRAE collection, were used to analyze the genetic diversity and population structure. The results showed that the almond accessions had approximately four times more nucleotide diversity than the analyzed peach accessions. It was also observed that nucleotide diversity slightly decreased in the accessions from the UC Davis breeding program compared to traditional varieties. Additionally, a fixation index value of 0.295 was obtained between almond and peach genotypes, indicating differentiation between species, while a value of 0.086 was obtained between almond populations, indicating minimal divergence among them. With the analysis of transcripts located in significant regions of high/low nucleotide diversity and fixation, it was observed that processes related to the maintenance and development of the meristem, as well as processes associated with the regulation of ubiquitination or the regulation of protein modification, were significant for the high nucleotide

diversity in traditional almond varieties. On the other hand, the processes associated with dormancy, development, and fruit ripening are conserved between almond and peach.

Keywords: Diversity, fixation, populations

Introducción

El almendro (*Prunus dulcis* Mill. D.A. Webb) es una especie perteneciente a la familia *Rosaceae*, y al género *Prunus*, al igual que otras especies dentro del género como el melocotonero (*Prunus persica*), cerezo (*Prunus avium*) o el albaricoquero (*Prunus armeniaca*) (Socias i Company et al., 2017). El almendro, al igual que las especies del género *Prunus*, se caracteriza por ser una especie diploide, con 8 pares de cromosomas ($2n = 16$), con un tamaño haploide del genoma estimado en 252-254 Mpb (Castanera et al., 2024). A diferencia de otras especies de *Prunus*, el almendro se caracteriza por ser de forma natural una especie alógama, auto-incompatible, lo que ha generado que el almendro sea una especie con una alta diversidad genética y una especie muy heterogénea, mostrando una alta variabilidad para caracteres como el tamaño del árbol, floración, época de floración o tamaño y forma de las semillas entre otros respecto a otras especies del género *Prunus*. Además, otra diferencia importante es que el almendro es recolectado por su semilla, en lugar del mesocarpo, como ocurre en otros frutales de hueso, siendo la almendra un producto muy consumido debido a su alto valor nutricional y sus propiedades nutraceuticas (Kodad, 2017; Socias i Company et al., 2017; Castanera et al., 2024). En cuanto a la producción mundial de almendra, siguiendo la tendencia de los últimos años, Estados Unidos fue el mayor productor de almendra a nivel mundial (76%, 1,29 millones de toneladas) en la campaña 2022/2023, seguido por Australia (9%) y España (4%) (Almond Board of California, 2024)

El lugar de origen del almendro sigue siendo objeto de controversia debido a su naturaleza alógama. Una de las teorías propuestas establece que el origen del almendro cultivado se produjo a través de sucesivas hibridaciones con especies cercanas al almendro de la región de Asia Central, como *Prunus fenzliana*, propuesto por muchos autores como el antecesor del almendro cultivado (Ladizinsky, 1999; Zeinalabedini et al., 2010). Tras su domesticación, el almendro fue dispersado por Asia, Mediterráneo y posteriormente a Norte América y Australia a través de migraciones humanas, comercio y colonizaciones. Durante este proceso de dispersión, debido a la aparición de mutaciones e hibridaciones con especies cercanas silvestres locales, el almendro se ha adaptado a diferentes condiciones ambientales locales, proporcionando la aparición de diferencias genéticas que proporcionan ventajas adaptativas, como resistencias a enfermedades o diferencias en la época de floración y maduración (Gradziel, 2011).

En cuanto a la relación con el resto de las especies del género *Prunus*, *P. persica* es la especie más cercana al almendro, cuya divergencia se estima que ocurrió aproximadamente hace 2,5-5,88 millones de años (Badenes y Parfitt, 1995; Velasco et al., 2016; Alioto et al., 2020). Además, de esta relación, se ha comprobado que ambas especies poseen un elevado nivel de sintenia, siendo el orden de sus genes similar a lo largo de los cromosomas, siendo capaces de hibridar y obtener una descendencia fértil (Alioto et al., 2020), característica que ha sido empleada por el programa de mejora de UC Davis (California) para introducir en el almendro el carácter de la autocompatibilidad.

A pesar de esto, el almendro y el melocotonero poseen una gran diferencia en cuanto a diversidad genética, siendo la diversidad genética del almendro hasta siete veces superior a la diversidad genética del melocotonero (Velasco et al., 2016). Esta notable diferencia es atribuida principalmente al diferente sistema reproductivo que poseen ambas especies. Mientras que el almendro es una especie alógama de forma natural (incrementa el intercambio de alelos), el melocotonero es una especie autógama, es decir, es capaz de autopolinizarse, produciéndose un incremento de la fijación de los alelos.

Sin embargo, el estudio realizado por Pérez de los Cobos et al. (2021) observó que “Nonpareil”, “Tuono”, “Cristomorto” y “Mission” aportaban casi el 50% de la carga genética total de 220 genotipos analizados de nuevas variedades elite generadas en los diferentes programas de mejora de almendro.

Estos resultados mostraron una reducción de la diversidad genética, debida principalmente al uso continuo de los mismos genitores y descendientes como progenitores para la obtención de nuevas variedades élite de almendro, incrementado por consiguiente la consanguinidad y los efectos negativos que ello conlleva, cómo una reducción del crecimiento vegetativo, enanismo, flores estériles o reducción en el cuajado del fruto (Alonso y Socias i Company, 2007; Martínez-García et al., 2009). Además, la presencia del mismo fondo genético en todas las variedades puede conducir al monocultivo, y la aparición de una enfermedad que amenace a la producción global de almendra.

Por ello, el objetivo de este trabajo se basa en analizar y evaluar la estructura poblacional de accesiones de almendro y melocotonero, así como estudiar la diversidad nucleotídica y el índice de fijación entre accesiones de almendros y melocotoneros e identificar regiones significativas para la diversidad nucleotídica y el índice de fijación, así como transcritos y funciones asociadas a dichos transcritos.

Materiales y Métodos

Para el estudio se emplearon secuencias pair-ends procedentes de 39 genotipos (12 almendros procedentes de colecciones del CEBAS-CSIC e INRAE, y cuatro almendros, 13 híbridos almendro × melocotonero, tres híbridos de almendro y siete melocotoneros del programa de mejora genética de UC Davis).

Se realizó un análisis de la calidad de las secuencias con el programa FASTQC v.0.12.1 (Andrews, 2010) y se realizó el alineamiento de las lecturas frente al genoma del cultivar de almendro “Nonpareil” (D’amico-Willman et al., 2022) empleando el software BWA v.07.17 (Li y Durbin, 2009). A continuación, cada uno de los ficheros BAM obtenidos fueron filtrados por MAPQ ≥ 40 y fueron eliminadas las lecturas duplicadas y los alineamientos no primarios empleado el programa Samtools v.1.12 (Li et al., 2009). Después, se realizó la identificación de variantes con el programa Bcftools v.1.9 (Li et al., 2009) obteniendo un archivo VCF el cual fue filtrado empleando diferentes programas: Bcftools para filtrar por profundidad de cobertura (DP) y localización en cromosomas del almendro. También se empleó el software Plink v.1.90b7.2 (Chang et al., 2015) para filtrar por frecuencia del alelo menor (MAF ≥ 0.05), variantes genotipadas para todos los individuos (--geno = 0) y por desequilibrio de ligamiento (--indep-parwise 50 5 0.2). Además, se eliminaron del archivo VCF todas aquellas variantes que poseían una indeterminación (N) en el alelo de referencia o alternativo.

Para el análisis de la estructura de la población, se estudió la estructura poblacional empleando el software fastStructure v1.0. (Raj et al., 2014), empleando estructuras de 1 a 10 clústeres (K), empleando el script “chooseK.py” para la elección del mejor número de clústeres. Además, con el set de SNPs identificados, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) y se calculó el coeficiente de “Identidad por Estado” (IBS) con el paquete SNPRelate (Zheng et al., 2012) de R, obteniendo un dendograma.

La diversidad nucleotídica (π), se calculó para las diferentes poblaciones y subpoblaciones identificadas empleando ventanas de 10 kb con el software VCFTools v.0.1.16 (Danecek et al., 2011). También, se empleó dicho programa para el cálculo del índice de fijación (F_{ST}) empleando ventanas de 10 kb. Para la identificación de regiones de alta y baja π significativas, se estandarizó el valor de cada ventana empleando la Ecuación (1) a una distribución normal $N(0,1)$ (Bonamente, 2017). Para la identificación de regiones de alto y bajo F_{ST} se empleó el mismo método, aplicando la Ecuación (2). Se estableció como umbral de significancia un intervalo de confianza del 95%, considerando valores superiores ($z \geq 1,96$) o inferiores ($z \leq -1,96$) como regiones estadísticamente significativas.

$$z = \frac{\pi - \bar{\pi}}{\sigma_{\pi}} \quad (1)$$

$$z = \frac{F_{St} - \bar{F}_{St}}{\sigma_{F_{St}}} \quad (2)$$

Se identificaron los transcritos localizados en estas regiones significativas (π y F_{ST}) entre especies y clústeres empleando el fichero de anotación (gft) del genoma de “Nonpareil” (D’amico-Willman et al., 2022) y un script de creación propia en Python. Finalmente, se realizó un análisis de enriquecimiento de términos GO sobre los transcritos identificados en dichas regiones significativas empleando el paquete de R ClusterProfiler (Yu et al., 2012), empleando la ontología de procesos biológicos (BP) para el enriquecimiento.

Resultados y Discusión

Tras el alineamiento de las lecturas y el filtrado, se obtuvieron 39 archivos BAM, siendo el porcentaje de lecturas alineadas variable entre los distintos genotipos (61,53%-75.08%). Dichos archivos fueron empleados para la identificación de variantes, donde se obtuvo un total de 368,467 variantes, de las cuales 336.682 fueron variaciones de un único nucleótido (SNPs) y 31.785 fueron pequeñas inserciones/deleciones (INDELs). Dado que el genoma de “Nonpareil” tiene un tamaño de 254,410,722 pb, el ratio obtenido es de 1 variante cada 690 pb. Anteriormente, los estudios de diversidad genética en almendro han utilizado marcadores moleculares de baja densidad como los marcadores microsatélites o SSRs (por sus siglas en inglés Simple Sequence Repeats) (Fernández i Martí et al., 2015; Martínez-Gómez et al., 2003; Zeinalabedini et al., 2010) y más recientemente los marcadores SNPs. En este sentido, estos estudios previos han utilizado un conjunto de 93,119 SNPs (Pavan et al., 2021) o 54,112 SNPs (Pérez de los Cobos et al., 2023) para analizar la diversidad, nuestro estudio ha permitido descubrir y utilizar un mayor número de SNPs de alta calidad (336,682) para estudiar la diversidad genética entre almendro y melocotonero y entender la estructura poblacional en diferentes programas de mejora a nivel mundial.

Empleando el total de variantes identificadas, el análisis de estructura poblacional reveló que el número de grupos/clústeres que mejor explicaba la estructura de la población era $K=3$ (Figura 1). Se observó que todos los genotipos de melocotonero pertenecían al Clúster1. Respecto a los genotipos procedentes del programa de mejora de la UC Davis, se agruparon en el Clúster2, aunque algunos genotipos presentaron una pequeña proporción alélica del Clúster3 (Titán, Almd14, Mono). Además, Almd15 y *P. fenziliana* mostraron una elevada identidad genética del Clúster3, y una baja identidad genética con el Clúster1. Los genotipos tradicionales de origen español (Garrigues, AtochaM, DelCid, Peraleja y Ramillete), italiano (Almd25/Tuono) y la silvestre *P. webbii* se agruparon en el Clúster3, mientras que las variedades de origen francés (Beraude, Saintcharles, Tardiveverdiere y Cotedor) presentaron una mezcla (admixture) mayoritaria del Clúster3 y del Clúster2. El genotipo G34 mostró una mezcla del Clúster3, del Cluster2 y del Cluster1. Para definir las poblaciones y subpoblaciones, se agruparon los distintos genotipos en base a su mayor valor de proporción alélica, obteniendo 3 subpoblaciones: genotipos de melocotonero (Clúster1), genotipos procedentes del programa americano y *P. fenzlinana* (Cluster2) y genotipos tradicionales junto *P. webbii* y los híbridos (Clúster3).

Empleando el set de SNPs identificados para la elaboración del PCA (Figura 2) y del dendograma a partir del cálculo del coeficiente IBS entre muestras (Figura 3), se observó una separación clara entre los genotipos de almendro y melocotonero por el PC1, que explicaba el 16,68% de la variabilidad total. También se observó la agrupación de los genotipos de melocotonero en un clado/grupo diferente al resto de genotipos de almendro. El dendograma reveló además una división o agrupación de los genotipos por su origen geográfico. Se observó un clado separado del resto de genotipos de almendro formado por la especie silvestre *P. webbii* y dos de los híbridos (G20 y G19). Además, se observó un clado formado por los genotipos tradicionales de origen italiano y español, separado de los genotipos franceses y genotipos procedentes del programa de mejora de UC Davis. *P. fenzliana* y el híbrido G34 formaron un pequeño clado entre los genotipos de origen francés y el gran clado formado por los genotipos americanos, que a su vez se dividió en distintos subgrupos. Destaca en el dendograma la proximidad, mayor similitud, de los genotipos americanos con los genotipos franceses comparado con los genotipos de origen español.

Estos resultados observados en el análisis de la estructura poblacional, PCA y dendograma mostraron una diferenciación clara entre los genotipos de almendro y melocotonero debido a que son especies totalmente diferentes que divergieron hace aproximadamente 2,5-5,88 millones de años (Velasco et al., 2016; Alioto et al., 2020). Además, en el dendograma se ha podido observar una diferenciación entre los genotipos de origen americano y los genotipos tradicionales procedentes de Europa (genotipos franceses, españoles e italiano) que ya fue observado en otros trabajos como el de Pavan et al. (2021) y más recientemente el trabajo de Pérez de los Cobos et al. (2023), que mostró esta separación entre genotipos. Además, junto con los resultados observados en el análisis de la estructura poblacional, se ha observado una relación entre los genotipos franceses y americanos (Figura 1 y Figura 3). Resultados anteriores mostraron que los genotipos americanos se originaron a partir de genotipos franceses (Pavan et al. 2021; Pérez de los Cobos et al. 2023), lo que se ha confirmado en este trabajo, en el cual los genotipos franceses presentaron mezcla del Clúster2 (clúster americano) y el Clúster3.

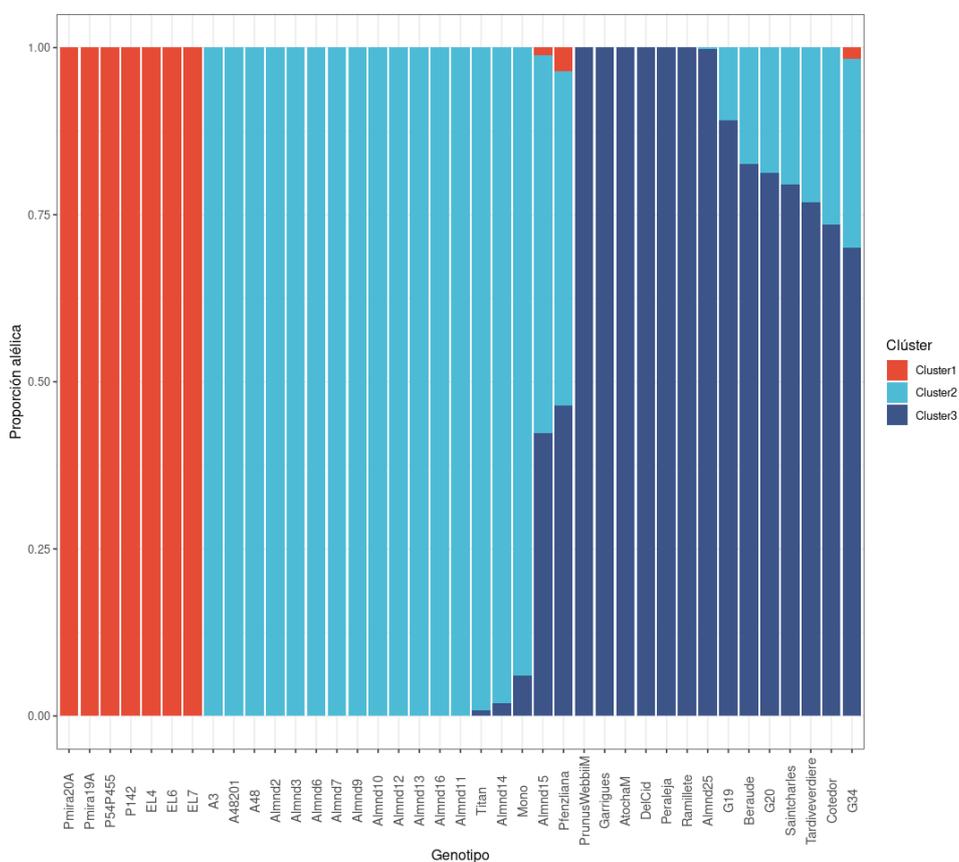


Figura 1. Gráfico de barras de la estructura poblacional obtenido en fastStructure

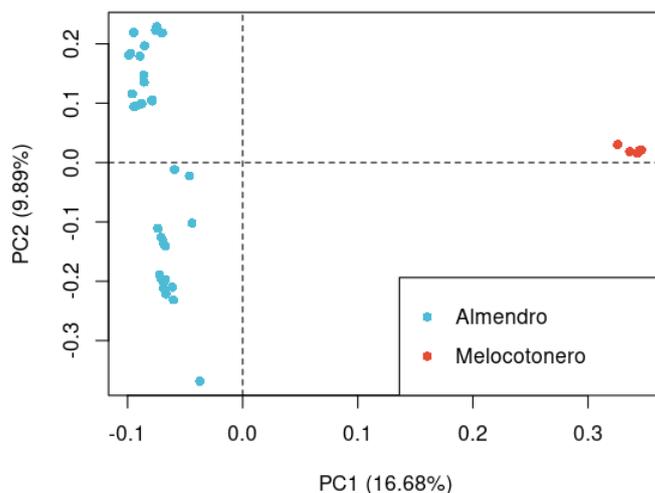


Figura 2. Análisis de Componentes Principales (PCA) realizado con el set de SNPs y el paquete SNPRelate.

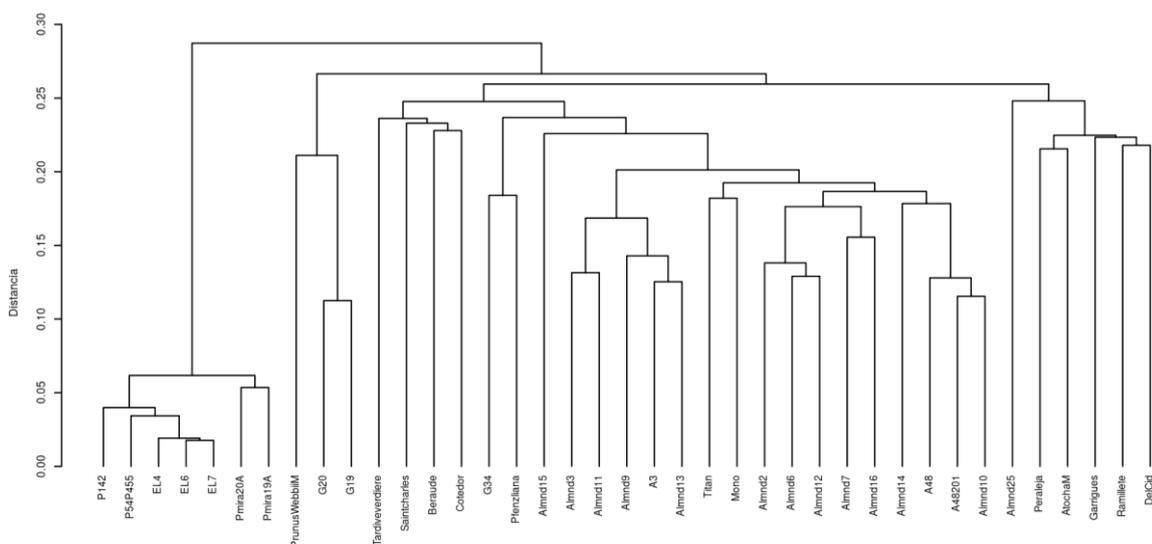


Figura 3. Dendrograma obtenido partir del coeficiente IBS entre pares de genotipos.

También se ha observado una división de los genotipos en base a diferentes orígenes: América, España-Italia y Francia, que coinciden con la historia de diseminación del cultivo (Fernández i Martí et al., 2015; Pavan et al., 2021; Pérez de los Cobos et al., 2023).

El análisis de la diversidad nucleotídica (π) reveló que la π en los genotipos de almendro fue 3.93 veces superior a la observada en los genotipos de melocotonero (Tabla 1). Además, se observó una leve reducción (1,17) de la π en los genotipos procedentes del programa de mejora genética de la UC Davis (Clúster2) respecto a los genotipos tradicionales (Clúster3). Respecto a los valores observados para el estadístico F_{ST} , se obtuvo un valor de $F_{ST} = 0,295$ entre almendro y melocotonero, lo que indicó una notable diferenciación entre las poblaciones de genotipos de almendro y melocotonero. En cambio, se observó un valor de $F_{ST} = 0,086$ entre los genotipos del programa de mejora de UC Davis (Clúster2) y los genotipos tradicionales (Clúster3), mostrando una leve diferenciación entre estos grupos de almendros. La elevada π observada en el almendro en comparación con el melocotonero

está en concordancia con resultados obtenidos en los trabajos realizados por Martínez-Gómez et al. (2003) y Velasco et al. (2016). Se observó un mayor nivel de π en los genotipos de almendro en comparación con los genotipos de melocotonero analizados, siendo incluso la π siete veces superior en el almendro (Velasco et al., 2016), consecuencia del diferente sistema reproductivo que tienen ambas especies (el almendro es alógamo mientras que el melocotonero es autógamo). Respecto a los valores obtenidos para el estadístico F_{ST} , el valor observado entre los genotipos de almendro y melocotonero (0,295) reflejó una separación entre los genotipos de almendro y melocotonero, mientras que el valor obtenido para el F_{ST} entre los genotipos del Clúster2 y Clúster3 fue reducido (0,086). Trabajos como el realizado por Fernández i Martí et al., (2015) o Velasco et al. (2016) reportaron también valores altos para el estadístico F_{ST} entre almendros y melocotoneros ($F_{ST} = 0,230$ y $F_{ST} = 0,586$), reflejando esta división entre especies.

Tabla 1. Resultados de diversidad nucleotídica media obtenidos tras el análisis con VCFTools

Grupo	$\pi \times 10^{-3}$
Almendro	0,498
Melocotonero	0,127
Clúster2	0,444
Clúster3	0,520

Posteriormente, se identificaron las regiones significativas para la π a lo largo del genoma de todos los genotipos, identificando los transcritos presentes en el total de esas regiones diferenciadas (Tabla 2). Además, respecto al estadístico F_{ST} , se identificaron regiones altamente significativas (regiones diferenciadas) y regiones estadísticamente significativas con un valor F_{ST} reducido (regiones conservadas) lo largo del genoma (regiones diferenciadas) entre los grupos de almendro y melocotonero. Respecto a la comparación para los genotipos del Clúster2 y Clúster3, únicamente se identificaron regiones altamente significativas para el F_{ST} , identificando además el número de transcritos localizados en dichas regiones (Tabla 2).

Tabla 2. Número de regiones y transcritos significativos para la π y el F_{ST}

Regiones	Número de regiones	Transcritos identificados
Alta π para los genotipos de almendro	910	1,434
Alta π para los genotipos de melocotonero	890	1,492
Alta π para los genotipos del Cluster2	1,001	1,596
Alta π para los genotipos del Cluster3	907	1,425
Alto F_{ST} entre genotipos de almendro y melocotonero	319	493
Bajo F_{ST} entre genotipos de almendro y melocotonero	1,254	1,915
Alto F_{ST} entre genotipos del Cluster2 y Cluster3	1,130	1,828

Tras la identificación de los transcritos en cada una de las regiones significativas, se realizó en análisis de enriquecimiento de los términos GO asociados a los transcritos. De todas las regiones identificadas (Tabla 3), únicamente se obtuvieron resultados significativos (p -valor $\leq 0,05$) para procesos biológicos asociados a transcritos identificados en regiones de alta π para los genotipos del Clúster3 y regiones de bajo F_{ST} entre genotipos de almendro y melocotonero. En regiones de alta π para los genotipos del Clúster3 se encontraron enriquecidos procesos biológicos relacionados con el mantenimiento y desarrollo meristemo (GO:0010073 y GO:0048507) respectivamente, con un p -valor ajustado de 0,0183 para ambos. Además, se identificaron términos GO enriquecidos relacionados con procesos de regulación positiva de la ubiquitinación de proteínas (GO:0031398), regulación positiva de la actividad de la proteína ubiquitina ligasa (GO:1904668), regulación de la ubiquitinación de proteínas (GO:0031396) y la regulación de la actividad ubiquitina-proteína transferasa (GO:0051438), ambos términos con un p -valor ajustado de 0,05. Por otro lado, respecto a las regiones significativas identificadas para un valor bajo de F_{ST} reducido (regiones conservadas) entre los genotipos de almendro y melocotonero, se encontraron transcritos enriquecidos en términos GO asociados a procesos de latencia, maduración y desarrollo de la semilla (GO:0010162, GO:0010431 y

GO:0048316 con p-valores de 0.002, 0.002 y 0.003 respectivamente), así como el propio proceso de la latencia (GO:0022611, p-valor ajustado de 0,002). También, se encontró enriquecido el proceso de desarrollo del fruto entre almendros y melocotoneros (GO:0010154, p-valor ajustado de 0,0003).

El enriquecimiento de términos GO asociados a transcritos identificados en regiones altamente significativas para la π mostró una alta diversidad en transcritos asociados al mantenimiento y desarrollo del meristemo. Esta alta diversidad puede deberse a las diferencias existentes entre las variedades tradicionales en el carácter de la época de floración, ya que el proceso de requerido para la transición desde las yemas vegetativas en estado de latencia hasta su diferenciación a meristemo floral depende de diferentes requerimientos de frío y calor (Fadón et al., 2015). Por ello, un amplio rango de fechas para la floración puede estar asociada a una elevada diversidad en los genes involucrados en estas rutas. Además, los procesos biológicos significativos identificados relacionados con la ubiquitinación y modificación de proteínas pueden estar asociados a una alta diversidad en los procesos de control de la metilación de los elementos transponibles (TEs), ya que, la modificación de proteínas como las histonas, está involucrada en la remodelación de la cromatina y la metilación del ADN (Fresnedo-Ramirez et al., 2023). Los TEs presentan un papel importante en el proceso de especiación de los almendros, los cuales han tenido una importante contribución en la variabilidad fenotípica de los almendros (Alioto et al., 2020), por lo que, el enriquecimiento en estos procesos puede estar asociado a una mayor diversidad.

Por otro lado, el análisis de enriquecimiento en términos GO de los transcritos asociados a regiones conservadas (bajo F_{ST}) entre los genotipos de almendro y melocotonero reveló que, los procesos relacionados con la latencia, maduración y desarrollo de la semilla, así como el propio proceso de latencia y el proceso de desarrollo del fruto se encuentran conservados entre el almendro y melocotonero. La dormancia de las yemas, al igual que el de las semillas, es un mecanismo de defensa muy conservado en las especies del género *Prunus*, con el objetivo de proteger a los árboles de heladas durante el invierno (Fadón et al., 2015; Fresnedo-Ramirez et al., 2023). Por último, el enriquecimiento de transcritos asociados al proceso biológico de desarrollo del fruto puede sugerir un proceso conservativo durante el desarrollo del fruto entre el almendro y el melocotonero, al igual que ha sido sugerido en varias especies de *Prunus* (García-Gómez et al., 2021).

Conclusiones

La identificación de un elevado número de SNPs (336,682) ha permitido observar una clara separación entre los genotipos de almendro y melocotonero. Además, se ha observado una pequeña subdivisión entre los genotipos de almendro procedentes del programa de mejora genética de almendro de la UC Davis y las variedades tradicionales, observando además una diferenciación genética en base al origen geográfico. Por otro lado, se observó que los genotipos americanos tienen su origen probablemente en el germoplasma europeo, más concretamente a partir del germoplasma francés. El análisis de la diversidad genética reveló una elevada diversidad de los genotipos de almendro respecto al melocotonero, basado principalmente en su diferente sistema reproductivo. También se observó una ligera reducción de la diversidad nucleotídica de las variedades procedentes del programa de UC Davis respecto a las variedades tradicionales, lo que resalta la pérdida de la diversidad en el programa de mejora del almendro americano debido al uso continuo y repetido de los mismos genitores y descendientes para obtener nuevas variedades. Por último, la identificación de procesos biológicos enriquecidos asociados a regiones de alta diversidad nucleotídica y regiones conservadas entre almendro y melocotonero puede ayudar a identificar genes asociados a dichos procesos, y a la posibilidad de introducir diversidad empleando genotipos de almendros y genotipos de especies relacionadas como el melocotonero,

Agradecimientos

Agradecer al Ministerio de Ciencia, Investigación y Universidades por la beca FPU (FPU22/02784) otorgada a Francisco José Gómez López para la realización de este trabajo.

Bibliografía

- Alioto, T., Alexiou, K. G., Bardil, A., Barteri, F., Castanera, R., Cruz, F., Dhingra, A., Duval, H., Fernández i Martí, Á., Frias, L., Galán, B., García, J.L., Howad, W., Gómez-Garrido, J., Gut, M., Julca, I., Morata, J., Puigdomènech, P., Ribeca, P., Rubio-Cabetas, M.J., Vlasova, A., Wirthensohn, M., García-Mas, J., Gabaldón, T., Casacuberta, J.M., Arús, P., 2020. Transposons played a major role in the diversification between the closely related almond and peach genomes: results from the almond genome sequence. *Plant J.* 101(2), 455–472. <https://doi.org/10.1111/TPJ.14538>
- Alonso, J.M., Socias i Company, R., 2007. Negative inbreeding effects in tree fruit breeding: Self-compatibility transmission in almond. *Theor. Appl. Genet.* 115(2), 151-158. <https://doi.org/10.1007/s00122-007-0532-2>
- Almond Board of California, 2024. Annual Publications: Almond Almanac. https://www.almonds.com/sites/default/files/2023-12/Almanac_2023.pdf (accessed 19 June 2024)
- Badenes, M.L., Parfitt, D.E., 1995. Phylogenetic relationships of cultivated *Prunus* species from an analysis of chloroplast DNA variation. *Theor. Appl. Genet.* 90, 1035-1041.
- Bonamente, M. (2017). Hypothesis Testing and Statistics, in: *Statistics and Analysis of Scientific Data* (pp. 117-146). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6572-4_7
- Castanera, R., de Tomás, C., Ruggieri, V., Vicient, C., Eduardo, I., Aranzana, M.J., Arús, P., Casacuberta, J.M., 2024. A phased genome of the highly heterozygous “Texas” almond uncovers patterns of allele-specific expression linked to heterozygous structural variants. *Hortic. Res.* 11(6). <https://doi.org/10.1093/hr/uhae106>
- Chang, C.C., Chow, C.C., Tellier, L.C., Vattikuti, S., Purcell, S.M., Lee, J.J., 2015. Second-generation PLINK: rising to the challenge of larger and richer datasets. *GigaScience*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/s13742-015-0047-8>
- D’Amico-Willman, K.M., Ouma, W Z., Meulia, T., Sideli, G.M., Gradziel, T.M., Fresnedo-Ramírez, J., 2022. Whole-genome sequence and methylome profiling of the almond [*Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb] cultivar “Nonpareil”. *G3 Genes Genomes Genet.* 12(5). <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkac065>
- Fadón, E., Herrero, M., & Rodrigo, J. (2015). Flower Bud Dormancy in *Prunus* Species, in: *Advances in Plant Dormancy* (pp. 123-135). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14451-1_6
- Fernández i Martí, A., Font i Forcada, C., Kamali, K., Rubio-Cabetas, M.J., Wirthensohn, M., Socias i Company, R., 2015. Molecular analyses of evolution and population structure in a worldwide almond [*Prunus dulcis* (Mill.) D.A. Webb syn. *P. amygdalus* Batsch] pool assessed by microsatellite markers. *Genet. Resour. Crop Evol.* 62(2), 205-219. <https://doi.org/10.1007/s10722-014-0146-x>
- Fresnedo-Ramírez, J., Anderson, E.S., D’Amico-Willman, K., Gradziel, T.M., 2023. A review of plant epigenetics through the lens of almond. *Plant Genome*, 16(4), e20367. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20367>
- Gradziel, T. M., 2011. Origin and dissemination of almond. *Horticultural reviews*.
- Kodad, O., 2017. Chemical composition of almond nuts. *Almonds: botany, production and uses*, 428-448.
- Ladizinsky, G., 1999. On the Origin of Almond. *Genet. Resour. Crop Evol.* 46(2), 143-147. <https://doi.org/10.1023/A:1008690409554>
- Li, H., Durbin, R., 2009. Fast and accurate short read alignment with Burrows-Wheeler transform. *Bioinformatics*, 25(14), 1754-1760. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btp324>
- Li, H., Handsaker, B., Wysoker, A., Fennell, T., Ruan, J., Homer, N., Marth, G., Abecasis, G., Durbin, R., 1000 Genome Project Data Processing Subgroup, 2009. The Sequence Alignment/Map format and SAMtools. *Bioinformatics*, 25(16), 2078-2079. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btp352>

Martínez-García, P. J., Ortega, E., Dicenta, F., 2009, October. Effects of inbreeding on productivity in almond. In V International Symposium on Pistachios and Almonds 912 (pp. 331-335).

Martínez-Gómez, P., Arulsekhar, S., Potter, D., Gradziel, T.M., 2003. An extended interspecific gene pool available to peach and almond breeding as characterized using simple sequence repeat (SSR) markers. *Euphytica*, 131(3), 313-322. <https://doi.org/10.1023/A:1024028518263>

Raj, A., Stephens, M., Pritchard, J. K., 2014. fastSTRUCTURE: Variational Inference of Population Structure in Large SNP Data Sets. *Genetics*, 197(2), 573-589. <https://doi.org/10.1534/genetics.114.164350>

Socias i Company, R., Ansón, J.M., Espiau, M.T., 2017. Taxonomy, botany and physiology, in: *Almonds: Botany, Production and Uses*. CABI International, Boston, pp. 1-42.

Pavan, S., Delvento, C., Mazzeo, R., Ricciardi, F., Losciale, P., Gaeta, L., D'Agostino, N., Taranto, F., Sánchez-Pérez, R., Ricciardi, L., Lotti, C., 2021. Almond diversity and homozygosity define structure, kinship, inbreeding, and linkage disequilibrium in cultivated germplasm, and reveal genomic associations with nut and seed weight. *Hort. Res.* 8, 15. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-00447-1>

Pérez de los Cobos, F., Martínez-García, P. J., Romero, A., Miarnau, X., Eduardo, I., Howad, W., Mnejja, M., Dicenta, F., Socias i Company, R., Rubio-Cabetas, M.J., Gradziel, T.M., Wirthensohn, M., Duval, H., Holland, D., Arús, P., Vargas, F. J., Batlle, I., 2021. Pedigree analysis of 220 almond genotypes reveals two world mainstream breeding lines based on only three different cultivars. *Hortic. Res.* 8, 11. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-00444-4>

Pérez de los Cobos, F., Coindre, E., Dlah, N., Quilot-Turion, B., Batlle, I., Arús, P., Eduardo, I., Duval, H., 2023. Almond population genomics and non-additive GWAS reveal new insights into almond dissemination history and candidate genes for nut traits and blooming time. *Hort. Res.* 10(10), uhad193. <https://doi.org/10.1093/hr/uhad193>.

Velasco, D., Hough, J., Aradhya, M., Ross-Ibarra, J., 2016. Evolutionary genomics of peach and almond domestication. *G3 Genes Genomes Genet.* 6(12), 3985-3993.

Yu, G., Wang, L.G., Han, Y., He, Q.Y., 2012. ClusterProfiler: an R package for comparing biological themes among gene clusters. *Omic*s, 16(5), 284–287. <https://doi.org/10.1089/omi.2011.0118>

Zeinalabedini, M., Khayam-Nekoui, M., Grigorian, V., Gradziel, T. M., & Martínez-Gómez, P. (2010). The origin and dissemination of the cultivated almond as determined by nuclear and chloroplast SSR marker analysis. *Sci. Hortic.* 125(4), 593-601. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.05.007>

Zheng, X., Levine, D., Shen, J., Gogarten, S.M., Laurie, C., Weir, B.S., 2012. A high-performance computing toolset for relatedness and principal component analysis of SNP data. *Bioinformatics*, 28(24), 3326-3328. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bts606>

Recursos genéticos en auyama (*Cucurbita moschata* (Duchesne ex Lam.) Duch. ex Poir. Una revisión.

J. Ortiz¹ y S. García-Martínez²

¹ Calle Padre Rogelio Roselle 1, Bayona, Santo Domingo Oeste, República Dominicana. Estudiante de Doctorado en Ciencias Agroalimentarias, Facultad de Ciencias Agronómicas y Veterinarias, Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), en colaboración con la Universidad Miguel Hernández de Elche, España.

Correo electrónico: jortiz63@uasd.edu.do

² CIAGRO-UMH. Carretera de Beniel, km 3,2, 03312 Orihuela (Alicante), España. Profesor titular Universidad Miguel Hernández de Elche

Resumen

Una alternativa para contribuir a enfrentar los retos del crecimiento poblacional y el aumento continuo de la demanda de alimentos, son los recursos genéticos para la agricultura y la alimentación los cuales se consideran patrimonio de la humanidad y su pérdida supone una grave amenaza para la estabilidad de los ecosistemas, el desarrollo agrícola y la seguridad alimentaria. Es imprescindible disponer de recursos genéticos con variabilidad genética para garantizar el desarrollo de sistemas de producción sostenible, eficiente y competitivo; esto implica coleccionar, conservar, caracterizar, documentar los atributos o características de las accesiones y colecciones para su utilización de una forma racional y sostenible. Este artículo es una revisión sobre la importancia de coleccionar y conservar los recursos genéticos de la auyama (*Cucurbita moschata* (Duchesne ex Lam.) Duch. ex Poir, la cual es una especie alógama originaria de América y de importancia alimenticia en la República Dominicana. Para esta revisión se recopiló, analizó y sistematizó información disponible en bases de datos electrónicas sobre los recursos genéticos de la auyama, con la finalidad de conocer su diversidad genética y oportunidades de uso en programas de mejora genética, considerando la variabilidad genética, conservación, utilización y desafíos y acciones futura.

Palabras clave: Mejoramiento vegetal; Biodiversidad; Cucurbitáceas; Cambio climático; Banco de germoplasma

Genetic resources in pumpkin (*Cucurbita moschata* (Duchesne ex Lam.) Duch. ex Poir. A review

Abstract

An alternative to help face the challenges of population growth and the continuous increase in demand for food are genetic resources for agriculture and food, which are considered heritage of humanity and their loss represents a serious threat to the stability of ecosystems, agricultural development and food security. It is essential to have genetic resources with genetic variability to guarantee the development of sustainable, efficient and competitive production systems; This involves collecting, conserving, characterizing, and documenting the attributes or characteristics of accessions and collections for their use in a rational and sustainable way. This article is a review on the importance of collecting and conserving the genetic resources of the pumpkin (*Cucurbita moschata* (Duchesne ex Lam.) Duch. ex Poir), which is an allogamous species native to America and of nutritional importance in the Dominican Republic. For this review, information available in electronic databases on the genetic resources of the pumpkin was collected, analyzed and systematized, with the purpose of knowing its genetic diversity and opportunities for use in genetic improvement programs, considering genetic variability, conservation, use and challenges and future actions.

Keywords: Plant breeding; Biodiversity; Cucurbitaceae; Climate change; germoplasm Bank

Introducción

El aumento mundial de la población presiona el aumento de la producción de alimentos nutritivos y proveedores de calorías y el principal objetivo de la agricultura es aumentar la producción de alimentos

de manera sostenible para garantizar la seguridad alimentaria, sin embargo, se depende de una cantidad limitada de especies vegetales.

Especies de la familia botánica de las Cucurbitaceae constituyen un grupo vegetal de importancia económica, nutricional, medicinal y cultural. Esta familia está compuesta por especies que proveen cultivos nutritivos, saludables y sabrosos, tales como: auyamas o zapallos (*Cucurbita moschata* (Duchesne ex Lam.) Duch. ex Poir), sandías (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. y Nakai), melones (*Cucumis melo* L.) y pepinos (*Cucumis sativus* L.), entre otros, Salma (2006) y Bramel y Krishnan (2019).

Se conocen unas 1,000 especies de cucurbitáceas de las cuales unas 10 especies se consideran de importancia económica, las cuales son consumidas y comercializadas globalmente y unas 23 especies tienen importancia local. Todas son cultivadas por sus frutos y semillas que se caracterizan por su diversidad genética expresada en tamaños, formas y colores de la fruta, y que son consumidas de diferentes formas: madura como el caso de las calabazas, inmaduro como el caso de los zuchinni, cruda como el caso del melón, cocida como el caso de la auyama y escabeche como el caso de los pepinillos. Otros usos incluyen: frutas crudas, semillas nutritivas, aceite, fruta cocida, edulcorante, estropajo y medicinal, Chomicki et al. (2020).

Cucurbita pepo, *Cucurbita maxima*, *Cucurbita moschata* (Duchesne ex Lam.) Duch. ex Poir y *Cucurbita argyrosperma* representan las cuatro especies domesticadas más importante del género cucúrbita. En el año 2022, la producción mundial de especies comerciales de calabazas, zapallos o auyamas y calabacines, fue de 22.81 millones de toneladas (mt), de las cuales los países asiáticos produjeron 11.52 mt, en Europa 4.83 mt, en América 3.51 mt (que incluye a Norteamérica 1.16 mt, en Centroamérica 0.88 mt y en el Caribe 0.46 mt), en África 2.72 mt, y en Oceanía 0.23 mt, FAOSTAT (2024).



Figura 1. Variabilidad morfológica de frutos auyama (*Cucurbita moschata*) para comercialización en el mercado municipal de San José de Ocoa, República Dominicana.

La auyama (*Cucurbita moschata* (Duchesne ex Lam.) Duch. ex Poir) es un cultivo ancestral de la familia de las cucurbitáceas con un alto valor nutricional y económico y es una alternativa para contribuir con la seguridad alimentaria. La auyama es reconocida por su valor alimenticio y nutritivo (proveedor de carbohidratos, vitaminas, fósforo y minerales), por sus propiedades medicinales en enfermedades cardiovasculares, de la visión y cáncer de piel y de estómago, entre otros y su multiplicidad de uso para consumo directo, como materia prima en la industria, como artesanías y para la decoración, Blanco (2010).

La auyama es parte de la dieta alimenticia del consumidor dominicano con una alta demanda para consumo en forma de víveres (hervidos), ya sea de forma independiente o acompañando otros platos,

tales como: sopas, pure, habichuelas y en la repostería. Es altamente valorada por sus aportes en provitaminas A y betacaroteno, indicador de un alto valor nutritivo con propiedades antioxidantes y es rica en sólidos solubles, azúcares, fósforo y minerales, Ortiz y Nova (2024), Rodríguez *et al.* (2018).

La Hispaniola es la segunda isla tropical más grande del Caribe con orografía de bosques y sabanas, llanuras y valles y montañas, que comparten dos países: la República Dominicana al este y la República de Haití al oeste. La Hispaniola no es un centro de origen de especies de cucurbitáceas, por lo tanto, no se cuenta con especies silvestres, sin embargo, por el alto consumo *per capita* de auyama en ambos países (> 3.88 kg), por la biología reproductiva de las cucúrbitas que tienen flores unisexuales separadas en la misma planta que favorecen la polinización cruzada o la alogamia, la polinización entomófila de sus flores y el crecimiento rastrero y extendido de sus tallos, favorecen que se cuente con una alta riqueza de recursos genéticos del cultivo, MMARN (2012), Ortiz y Nova, (2024) y MA (2024b).

Cucurbita moschata es una especie domesticada importante en República Dominicana, teniendo en cuenta el área sembrada y su alto valor nutritivo en vitamina A, carbohidratos, fósforo y minerales. La producción actual depende de las variantes locales, lo cual por su alta heterocigocidad dificulta predecir la productividad, calidad y producción. En República Dominicana el cultivo se caracteriza por su amplia dispersión, distribuido en todos los ecosistemas existentes en la isla en campos de agricultores, conucos y huertos caseros. La producción local fresca es para autoconsumo y comercialización a nivel de mercados, supermercados, pulperías y tricicleros, Ortiz y Nova (2024).

De acuerdo a MA (2024), en el año 2022 en la República Dominicana se sembraron 86,591 tareas (5,446 hectáreas) de auyamas en plantaciones formales, con una producción de 1,179,530 qq (53,615 tm), especialmente, en las regionales agropecuarias: este, central y sur del país. Sin embargo, se estima que debido a la producción informal en explotaciones locales conocidas como “conucos” para autoconsumo la producción total del cultivo es subestimada.

En la isla La Hispaniola la mayoría de las explotaciones para producir el cultivo de auyama es realizado por agricultores en sistema de producción agrícola sostenible, donde los agricultores siembran variedades locales que se caracterizan por su alta variabilidad en morfología y sabor para autoconsumo y para satisfacer las demandas de los consumidores, Ortiz y Nova (2024). Gomes *et al* (2020) destaca que en Brasil la variabilidad genética de *C. moschata* está estrechamente ligada a los agricultores familiares, quienes seleccionan e intercambian semillas e hibridación natural propia de la especie promueve su variabilidad.

Esta revisión tiene como objetivo recopilar, analizar y sistematizar información disponible sobre los recursos genéticos de la auyama, con la finalidad de conocer su diversidad genética y oportunidades de uso en programas de mejora genética.

Metodología

Los autores realizaron una búsqueda bibliográfica en bases de datos electrónicas como AJOL, Google Scholar, ScienceDirect, Scopus y Web of Science. Durante la búsqueda se combinaron adecuadamente varios términos y palabras de texto libre como "*Cucurbita moschata* recursos genéticos. Diversidad genética", "Utilización de los recursos genéticos de *Cucurbita moschata*" y "Conservación de los recursos genéticos de *Cucurbita moschata*". Los autores trataron de obtener la información más actualizada de los temas buscados, pero no se discriminó por el tiempo, sino que consideraron todos los artículos para esta revisión. Cada artículo identificado se revisó de manera independiente para determinar la calidad de la información y extraer información relevante para la revisión.

Resultados y Discusión

Diversidad Genética de la “Cucurbita moschata”

La diversidad genética se refiere al número total de características genéticas dentro de una especie. A mayor diversidad genética de una especie las probabilidades de sobrevivir debido a cambios ambientales son mayores. Una especie donde la diversidad genética es menor el riesgo frente a los cambios es mayor.

Cuando el tamaño de una población se reduce, aumenta la reproducción entre organismos emparentados y se reduce la diversidad genética. La diversidad genética se puede medir utilizando la diversidad de genes, la heterocigocidad, o el número de alelos por locus, Biodiversidad Mexicana (2024).

En una revisión minuciosa sobre el origen y domesticación de las cucurbitáceas realizada por Chomicki *et al.* (2020), detalla que especies de la familia de las cucurbitáceas se reportan en los continentes de América, Asia y África, desde unos 11,000 años atrás. Dentro de la familia de las Cucurbitaceae se conocen unos 90 géneros y se ha identificado más de 750 especies, donde el género *Cucurbita* es uno de los más importante con unas 27 especies, Ceron *et al.* (2010).

De las cuatro especies domesticadas más importante del género cucúrbita de la familia de las cucurbitáceas (*Cucurbita pepo*, *Cucurbita máxima*, *Cucurbita moschata* y *Cucurbita argyrosperma*), se desconoce el ancestro silvestre de *Cucurbita moschata*, sin embargo, análisis de mtDNA combinado con información disponible sugiere que tiene su origen en tierras bajas del norte de Suramérica, particularmente en Colombia, donde se encuentra una alta diversidad genética de la especie y donde se encuentran frutos con características primitivas, tales como: semillas negras y pequeñas, tallos con cortezas lignificadas y verrugosas y frutos amargos, Sanjur *et al.* (2002).

Cerón *et al* 2020 explican que la adaptación ambiental de *C. moschata* es en lugares cálidos, con altitud menor de 1000 m; *C. pepo* para localidades con altitud superior a 1000 m; *C. ficifolia* para zonas con alturas superior a los 1300 m y *C. máxima* en lugares con clima templado.

Aunque no se conoce cuándo fue introducida la auyama a la isla Hispaniola, se conoce que el pueblo nativo de los taínos utilizaba la palabra auyama al momento de la llegada de los españoles a la isla Hispaniola (García 2010), probablemente la auyama fue introducida desde el norte y centro de Colombia y Venezuela, países ubicados en el norte de Suramérica.

La semilla o material de siembra utilizados por los productores dominicanos de auyama proviene de mercados locales y selecciones propias, presentando una gran variabilidad en forma, tamaño y color de fruto, grosor y textura de pulpa, color y tamaño de la semilla, etc. Los recursos genéticos de *C. moschata* en la República Dominicana no se han sido colectado ni evaluado formalmente, no se dispone de información sobre caracterización morfo-agronómica, caracterización fisiológica, bioquímica, molecular y citogenética, la documentación de la fase de caracterización es insuficiente en un alto porcentaje, lo mismo sucede con la sistematización de la documentación, Ortiz y Nova (2024).

Variabilidad morfológica

En un programa de recursos genéticos de *C. moschata*, la caracterización morfológica es una de las primeras estrategias utilizadas para estudiar la diversidad genética, caracterizar plantas cultivadas y conservar los recursos genéticos, Onamu *et al.* (2012). Estos rasgos están bajo control genético, con múltiples genes que influyen en la expresión de sus fenotipos.

C. moschata se caracteriza por su diversidad morfológica importante para alcanzar los niveles de adaptación a diferentes ecosistemas tropicales donde es cultivada y a las preferencias de los consumidores. Esta diversidad es expresada en características de los frutos, tales como: forma y tamaño de frutos, color de cascara y calidad de masa y rasgos vegetativos. La diversidad del cultivo es mantenida por los agricultores tradicionales, quienes son capaces de reconocer variantes morfológicas e identificar segregantes espontáneos en sus morfotipos, y seleccionar en cada ciclo de siembra los frutos de los que obtendrán su semilla, con base en las características preferidas de color y forma, Canul (2005) y Ruelas *et al.* (2015).

Ruelas *et al.* 2015, utilizó 43 descriptores morfológicos sobre fruto, semilla, hoja, flor, cotiledón, hábitos de crecimiento de la planta, y características del tallo, de los cuales 29 corresponden a variables cualitativas y 14 cuantitativas que fueron propuestos por Esquinas y Gulick (1983) y Villanueva (2007), indicando que las características que explican la diversidad encontrada fueron: el tamaño de hoja, grosor y número de semillas, peso y ancho de fruto.

La Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV, en inglés), entidad intergubernamental que normaliza la protección de la propiedad intelectual de las nuevas variedades de

plantas, lista 37 descriptores para el registro de obtentor de nuevas variedades de *C. moschata*, UPOV (2007) y el Grupo de Trabajo en Cucurbita del Programa Cooperativo Europeo para Recursos Fitogenéticos (ECPGR), programa de cooperación entre 43 países europeos, para la conservación a largo plazo y facilitar la utilización de recursos fitogenéticos para la alimentación y la agricultura (RFAA), utilizando información de Bioversity (antiguamente IBPGR/IPGRI1) elabora una lista mínima de 13 descriptores que consideran importantes para la caracterización morfológica de las especies de *C. maxima*, *C. pepo*, *C. moschata*, *C. ficifolia* y *C. argyrosperma*, ECPGR (2008).

Marcadores moleculares y genómica

Para la caracterización tradicional de los recursos genéticos se utilizan características o rasgos morfológicos y su comportamiento o sus respuestas agronómicas las cuales están sujetas a la variabilidad ambiental y fenológica de las accesiones. Hoy en día se dispone de herramientas biotecnológicas para facilitar la caracterización de la diversidad genética en *C. moschata* que son eficientes si comparadas a los métodos tradicionales. Los marcadores moleculares permiten genotipificar los recursos genéticos con precisión, Méndez-López (2019).

Los marcadores genéticos moleculares son herramientas utilizadas para comprender mejor la estructura genética de la *C. moschata*, detectar variaciones a nivel de su ADN e identificar individuos o accesiones. Marcadores moleculares como repeticiones de secuencias simples (SSR), polimorfismos de un solo nucleótido (SNP) y polimorfismos de longitud de fragmentos amplificados (AFLP). Estos marcadores permiten la identificación de polimorfismos a nivel de ADN, lo que ayuda a identificar polimorfismo en el genoma de la planta, Tarnowski (2022).

Los marcadores moleculares son herramientas de gran utilidad en la identificación de accesiones para estudiar relaciones evolutivas, para la evaluación de variabilidad genética, mapeo genético y selección asistida en programas de mejora genética, Carrodeguas-González y Zuñiga-Orozco (2020).

El genoma de las de *Cucurbita* es relativamente pequeño, de unos 337.41 Mpb/C a 422.5 Mpb/C, Lira *et al.* (2018). Las tecnologías de secuenciación de nueva generación (NGS) han revolucionado el estudio de los genomas, pues permiten la lectura de millones de secuencias de ADN de forma masiva y paralela en un menor lapso y a menor costo por base, Rubio *et al* (2020).

Conservación de los recursos genéticos de “*Cucurbita moschata*”

En cada país tropical donde *C. moschata* es un cultivo importante se cultivan variantes de importancia local, sin embargo, no en todos se desarrollan acciones formales de conservación en bancos de recursos genéticos. Entre los países que mantienen banco de recursos genéticos, se comparte información y en algunos casos se puede llegar a compartir simientes de las accesiones.

Información sobre recursos genéticos de *C. moschata* puede ser accedida a través de plataforma digitales como la auspiciadas por el Tratado Internacional sobre los Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura (Tirfaa), que estableció la plataforma GeneSys que es una base de datos mundial sobre información de recursos genéticos, la cual es alimentada por los centros internacionales del Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional (CGIAR), por el Sistema Nacional de Germoplasma Vegetal (NPGS) de los Estados Unidos de América y el catálogo Eurisco del Programa Cooperativo Europeo para Recursos Genéticos de Plantas (ECPGR), los institutos nacionales de investigación agrícola e instituciones públicas y privadas. Al 9 de septiembre 2024, GeneSys tiene información sobre 15,442 accesiones registradas en su plataforma sobre de *C. moschata*, de las cuales 4,524 accesiones son originarias de Brasil, 896 de Guatemala y 825 de México, GeneSys (2024). Adicionalmente, se conserva semilla de *C. moschata* en la Bóveda Mundial de Semillas de Svalbard (Svalbard Global Seed), donde al 9 de septiembre 2024 se registran 1,199 accesiones procedentes de 58 países.

La conservación de los recursos genéticos de *C. moschata* más importante es *ex situ*, la conservación *in situ* que implica mantener las plantas de la especie en sus hábitats naturales es prácticamente nula, sin embargo, en México se desarrolla un proyecto de conservación de recursos genéticos promoviendo la

conservación in situ mediante el cultivo de razas locales adaptadas a ecosistemas específicos, Conabio (2024).

La conservación *ex situ* se centra en el almacenamiento de material genético en bancos de genes, bóvedas de semillas y jardines botánicos. Una estrategia utilizada para resguardar los recursos genéticos de plantas y conservar la diversidad genética son los bancos de recursos genéticos, en los cuales se conservan *ex situ* principalmente en forma de semilla. Estos bancos de recursos genéticos están generalmente localizados alrededor de los centros de diversidad y se conserva semilla procedente de los países e instituciones interesadas. Iniciativas mundiales como el depositario de la Bóveda Mundial de Semillas de Svalbard y el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Catie) en Costa Rica, albergan accesiones de *C. moschata*. Estas colecciones sirven como repositorios genéticos para futuras investigaciones y mejoramientos, lo que garantiza que la diversidad genética no se pierda debido a la destrucción del hábitat o al cambio climático. En la Tabla 1 aparecen otras instituciones internacionales que resguardan accesiones de *C. moschata*.

Para conservar una colección de recursos genéticos como la auyama a base de simientes, se requiere de personal capacitado, adecuadas infraestructuras para el almacenamiento, realizar análisis de viabilidad y regenerar o refrescar las colecciones (sembrarlas en campo o bajo condiciones controladas) para garantizar la viabilidad y vitalidad de la simiente.

Tabla 1. Instituciones internacionales que resguardan accesiones de *C. moschata*

Institución	País	Número de accesiones
Unidad de Conservación de Recursos Genéticos de plantas de la Universidad de Georgia	Estados Unidos de América	294
Banco de Semillas Forestales, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Catie)	Costa Rica	877
Banco de Germoplasma, Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola (ICTA)	Guatemala	163
Banco Nacional de Germoplasma Vegetal, Universidad Autónoma de Chapingo	México	
Real Jardín Botánico de Madrid	España	2
Royal Botanical Garden, Kew	Inglaterra	13

Utilización de los recursos genéticos de “*Cucurbita moschata*”

Mejora genética. Uno de los principales usos de los recursos genéticos en *C. moschata* es para la mejora vegetal que se focaliza en incrementar el rendimiento, la tolerancia y resistencia a plagas y enfermedades y mejorar la calidad de los frutos para consumo maduro o inmaduros. Los recursos genéticos necesarios para los programas de mejora genética se conservan en bancos y colecciones de germoplasma de varios países. El sabor y la calidad de la fruta son características prioritarias en las instituciones de investigación agrícola del sector privado. Sin embargo, el relevo generacional del personal especializado es un desafío, en adición a problemas de manejo de las colecciones que incluyen: conservación, caracterización, documentación y el depósito de las colecciones de accesiones, Paris (2016).

Resiliencia climática. Los cultivos son afectados por las consecuencias del cambio climático expresadas en aumento del calentamiento global, cambios en los patrones climáticos estacionales y en los factores bióticos y abióticos que se traducen en disminuir las cosechas, reducir el rendimiento y calidad de los productos agrícolas y el aumento de la incidencia de las plagas y las enfermedades, Ayyogari *et al* (2014). Olarewaju *et al.* (2023) indica que la diversidad genética de las cucurbitáceas es imprescindible para el desarrollo de cultivares resistentes o tolerantes al clima a través de métodos tradicionales de mejora genética. Accesiones con características de resistencia al calor y tolerancia a la sequía pueden incrementar la capacidad de resiliencia de las cucurbitáceas.

Desafíos y acciones futuras

El aprovechamiento de la diversidad genética en los recursos genéticos de *C. moschata* ofrece una herramienta para mejorar la productividad, la calidad y la tolerancia a plagas y enfermedades en un ambiente de manejar las consecuencias del cambio climático, de limitados recursos disponibles y una demanda cada día mayor de alimentos. Sin embargo, desafíos importantes a enfrentar incluyen la erosión genética y la pérdida de diversidad genética por la disminución de uso de variedades locales o tradicionales por los agricultores; enfrentar las consecuencias del cambio climático como cambio en los patrones pluviométricos, sequías y altas temperaturas; la presencia de plagas y enfermedades emergentes y el reto de producir aplicando prácticas agrícolas sostenibles y eficientes en el uso del agua, nutrientes y plaguicidas.

Las acciones futuras en torno a los recursos genéticos de *Cucurbita moschata* deben orientarse en estos apartados: organizar y coordinar en los países donde se utilizan para crear e integrar acciones encaminadas a promover colecciones locales, su conservación, caracterización utilizando herramientas biotecnológicas modernas, documentación y su uso racional y sostenible para apoyar los sistemas de producción agrícola en la mejora genética y el desarrollo de sistemas de producción sostenibles para enfrentar las consecuencias del cambio climático y asegurar la seguridad alimentaria a largo plazo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (Mescyt) de la República Dominicana por la financiación doctoral del autor de esta revisión.

Declaración de intereses en competencia

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran interpretarse como un potencial conflicto de intereses.

Disponibilidad de datos

No se utilizaron datos para la investigación descrita en el artículo.

Bibliografía

Ayyogari, K.; Sidhya, P.; Pandit, M. 2014. Impact of Climate Change on Vegetable Cultivation - A Review. Department of Vegetable Crops, Bidhan Chandra Krishi Viswavidyalaya, Mohanpur, West-Bengal, IN. International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology 7 (1): 145-155. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: DOI : [10.5958/j.2230-732X.7.1.020](https://doi.org/10.5958/j.2230-732X.7.1.020)

Biodiversidad Mexicana, MX, 2024. Diversidad genética. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: <https://www.biodiversidad.gob.mx/genes/divgenetica>

Blanco, E. 2010. Mejoramiento genético de zapallo *Cucurbita moschata*: obtención de un nuevo cultivar con fines de consumo en fresco adaptado a las condiciones del Valle del Cauca. Universidad Nacional de Colombia. Facultad De Ciencias Agropecuarias. Palmira, CO. (En línea). Revisado el 16 de abril 2024. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/69999/7275007.2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Bramel, P.; Krishnan, S. 2019. Systematic assessment for conservation and utilization of crop genetic resources. In *Sustaining Global Food Security: The Nexus of Science and Policy*; Zeigler, R.S., Ed.; CSIRO Publishing: Clayton, Victoria, AU. Pp 3–14. (En línea). Revisado el 16 de abril 2024. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Sarada-Krishnan-3/publication/337856472_Systematic_assessment_for_conservation_and_utilisation_of_crop_genetic_resources/links/5f8cfae792851c14bcd299be/Systematic-assessment-for-conservation-and-utilisation-of-crop-genetic-resources.pdf

Canul, J.; Ramírez, P.; Castillo, F.; Chávez, J. 2005. Diversidad morfológica de calabaza cultivada en el centro-oriente de Yucatán, México. Sociedad Mexicana de Fitogenética, Chapingo, MX. Revista Fitotecnia Mexicana 28 (4): 339-349. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/610/61028406.pdf>

Carrodegua-González, A.; Zuñiga-Orozco, A. 2020. Bases para la mejora genética en *Gerbera hybrida*. Repertorio Científico 23(2): 51-62. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: DOI: <https://doi.org/10.22458/rc.v23i2.3000>

Cerón, L.; Legaria, J.; Villanueva, C.; Sahagún, J. 2010. Diversidad genética en cuatro especies mexicanas de calabaza (*Cucurbita* spp.). Revista fitotecnia mexicana 33(3): 189-196. (En línea). Revisado el 7 de septiembre del 2024. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802010000300002&lng=es&tlng=es.

Chomicki, G.; Schaefer, H.; Renner, S. 2020. Origin and domestication of Cucurbitaceae crops: insights from phylogenies, genomics and archaeology. New Phytologist 226: 1240–1255. (En línea). Revisado el 7 de septiembre 2024. Disponible en: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/nph.16015> doi: 10.1111/nph.16015

Conabio (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, MX). 2024. Auyama *Cucurbita moschata*. (En línea). Revisado el 7 de septiembre 2024. Disponible en: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/bioseguridad/pdf/20835_especie.pdf

Díez, M.; Picó, B.; Nuez, F. 2002. Cucurbit genetic resources in Europe. Ad hoc meeting, 19 January 2002, Adana, Turkey. International Plant Genetic Resources Institute, Rome, IT. 64 p. (En línea). Revisado el 7 de septiembre 2024. Disponible en: https://www.ecpgr.org/fileadmin/bioversity/publications/pdfs/835_Cucurbit_genetic_resources_in_Europe.pdf

ECPGR (European Cooperative Programme for Plant Genetic Resources). 2008. Minimum descriptors for *Cucurbita* spp., cucumber, melon and watermelon (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: https://www.ecpgr.org/fileadmin/templates/ecpgr.org/upload/NW_and_WG_UPLOADS/Cucurbits_DescriptorLists.pdf

Esquinas, A.; Gulick, P. 1983. Genetic resources of *Cucurbitaceae* International Board for Plant Genetic Resources. A global report. IBPGR Secretariat 105 p. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/bitstreams/5a8a5351-8184-4381-828d-cccc6bf6896a/download>

Esquinas-Alcazar, J.T.; Gulick, P.J. (1983) Genetic resources of *Cucurbitaceae*. A global report. IBPGR Secretariat. 105 p. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: <https://cgspace.cgiar.org/bitstreams/5a8a5351-8184-4381-828d-cccc6bf6896a/download>

Eunae Yoo, Mesfin Haile, Ho-Cheol Ko, Yu-Mi Choi, Gyu-Taek Cho, Hee-Jong Woo, Xiaohan Wang, Pilmo Sung, Jundae Lee, Jungu Lee, Nayoung Ro. 2023. Development of SNP markers for *Cucurbita* species discrimination. Scientia Horticulturae 318. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112089>

FAOSTAT. 2024. Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (En línea). Revisado el 7 de septiembre 2024. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/OCL>

García, R. 2010. Voces de bohío. Vocabulario de la cultura taína. Archivo General de la Nación. Impresiones Alfa y Omega, Santo Domingo, DO. 158 p. (En línea). Revisado el 7 de septiembre del 2024. Disponible en: https://manicatotainoculturalcenter.weebly.com/uploads/1/2/6/7/12676875/voces_del_bohio.pdf

Genesys. 2024. Plataforma con catálogo Eurisco con información sobre recursos genéticos de plantas del Programa Cooperativo Europeo para Recursos Genéticos de Plantas (ECPGR, por sus siglas en inglés). (En línea). Revisado el 7 de septiembre del 2024. Disponible en: <https://www.genesys-pgr.org/>

Gomes, R.; Machado, J.; de Almeida, C.; Chagas, R.; de Oliveira, R.; Delazari, F.; da Silva, D. 2020 Brazilian germplasm of winter squash (*Cucurbita moschata* D.) displays vast genetic variability, allowing identification of promising genotypes for agro-morphological traits. *PLoS One*. 15(6): e0230546. (En línea). Revisado el 9 de

septiembre 2024. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7282630/> doi: 10.1371/journal.pone.0230546. PMID: 32516347; PMCID: PMC7282630.

Grumet, R.; McCreight, J.; McGregor, C.; Weng, Y.; Mazourek, M.; Reitsma, K.; Labate, J.; Davis, A.; Fei, Z. 2021. Genetic Resources and Vulnerabilities of Major Cucurbit Crops. *Genes*. 2021; 12(8):1222. <https://doi.org/10.3390/genes12081222>

Hernández C.; Labate, J.; Reitsma, K.; Fabrizio, J.; Bao, K.; Fei, Z.; Grumet, R.; Mazourek, M. 2023. Characterization of the USDA *Cucurbita pepo*, *C. moschata*, and *C. maxima* germplasm collections. *Front Plant Sci* 14: 2023. (En línea). Revisado el 7 de septiembre 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1130814>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423823002613>

Kesh, H.; Yadav, S. 2022. Recent advances in genetics and breeding of pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 98(2): 141-158. (En línea). Revisado el 7 de septiembre 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/14620316.2022.2097961>

Lee H-Y, Jang S, Yu C-R, Kang B-C, Chin J-H, Song K. Population Structure and Genetic Diversity of *Cucurbita moschata* Based on Genome-Wide High-Quality SNPs. *Plants*. 2021; 10(1):56. <https://doi.org/10.3390/plants10010056>

Lira, S.; Eguiarte, F.; Montes, H. 2018. Diversidad genética de las especies de Cucurbita en México e hibridación entre plantas genéticamente modificadas y especies silvestres de Cucurbita. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Informe Final SNIB-CONABIO. Proyecto No. KE004. México, MX. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.15468/etuupn>

MA (Ministerio de Agricultura, DO). 2024. Siembra-Cosecha-Produccion-y-Rendimientos-2002-2022. Ministerio de Agricultura. Santo Domingo, DO. (En línea). Revisado el 16 de abril 2024. Disponible en: <https://agricultura.gob.do/wp-content/uploads/2019/04/2.2-CONSOLIDADO-REGIONAL-SC-y-P-DE-PRODUCTOS-AGRICOLAS-2000-2022.xlsx>

MA (Ministerio de Agricultura, DO). 2024b. Consumo Estimado Per-Cápita de Productos Agropecuarios (Frescos) 2015 - 2019 (En Libras). Ministerio de Agricultura. Santo Domingo, DO. (En línea). Revisado el 16 de abril 2024. Disponible en: <https://agricultura.gob.do/wp-content/uploads/2020/03/10.2-Consumo-PerCapita-Anual-de-Productos-Agropecuarios-2015-2019.xlsx>

Martínez, R. 2009. Sistemas de producción agrícola sostenible. *Tecnología en Marcha* 22 (2): 23-39. 17 p. (En línea). Revisado el 7 de septiembre 2024. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4835851.pdf>

Méndez-López, A. 2019. Diversidad genética de genotipos partenocarpicos arbustivos de calabaza mediante marcadores genéticos moleculares. *Rev. Mex. Cienc. Agríc* 10(1): 1-9. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1727>.

MMARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, DO). 2012. Atlas de Biodiversidad y Recursos Naturales de la República Dominicana. Impresión: Amigo del Hogar, C por A., Santo Domingo, DO. 122 p. (En línea). Revisado el 7 de septiembre 2024. Disponible en: <https://ambiente.gob.do/app/uploads/2016/10/ATLAS-2012.pdf>

Olarewaju, O.; Fajinmi, O.; Arthur, G.; Coopoosamy, R.; Naidoo, K. 2023. Effect of climate change on the production of Cucurbitaceae species in North African countries. *Journal of Agriculture and Food Research* 14: 100742. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100742> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154323002491>)

Onamu, R.; Legaria, J.; Sahagún, J.; Pérez, J. 2012. Análisis de marcadores morfológicos y moleculares en papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista fitotecnia mexicana* 35 (4): 267-277. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v35n4/v35n4a3.pdf>

Ortiz, J.; Nova, S.; Celado, R. 2024. Evaluación morfológica de variantes locales de auyama (*Cucurbita moschata* (*Duchesne ex Lam.*) *Duch. ex Poir.* En memorias de la 57va Reunión Anual de la Caribbean Food Crop Society (CFCS), celebrada del 15 al 19 de julio 2024 en Bávaro, Punta Cana, República Dominicana. (En línea). Revisado el 7 de septiembre 2024. Disponible en: https://www.cfcs1963.org/s/01Programa_Resumenes_CFCS_2024.pdf#page=28

Paris, H. 2016. Genetic Resources of Pumpkins and Squash, *Cucurbita* spp.. in Genetics and Genomics of Cucurbitaceae. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/311785594_Genetic_Resources_of_Pumpkins_and_Squash_Cucurbita_spp

Rodríguez, R.; Valdés, M.; Ortiz, S. 2018. Características agronómicas y calidad nutricional de los frutos y semillas de zapallo *Cucurbita* sp. *Rev Colombiana Cienc Anim* 2018; 10(1):86-97. (En línea). Revisado el 7 de septiembre 2024. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/recia/v10n1/2027-4297-recia-10-01-00086.pdf>

Rodríguez, R.; Valdez, M.; Ortiz, S. 2018. Características agronómicas y calidad nutricional de los frutos y semillas de zapallo *Cucurbita* sp. *rev. colombiana cienc. anim. Recia* 10 (1): 86-97. (En línea). Revisado el 7 de septiembre 2024. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2027-42972018000100086 <https://doi.org/10.24188/recia.v10.n1.2018.636>.

Rubio, S.; Pacheco-Orozco, R.; Milena, Ana.; Perdomo, S.; García-Robles, R. 2020. Secuenciación de nueva generación (NGS) de ADN: presente y futuro en la práctica clínica. *Universitas Medica*, 61(2). (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/vnimedica/article/view/27461>

Ruelas, P.; Aguilar, J.; García, J.; Valdivia, R.; López, G. 2015. Diversidad morfológica de especies cultivadas de calabaza (*Cucurbita* spp.) en el estado de Nayarit. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 6(8): 1845-1856. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v6n8/2007-0934-remexca-6-08-01845-en.pdf>

Salma, A. 2006. *Las cucurbitáceas. Importancia económica, bioquímica y medicinal*. Editorial UNAL(En línea). Revisado el 7 de septiembre 2024. Disponible en: <https://ulibros.com/las-cucurbitaceas-importancia-economica-bioquimica-y-medicinal-olmxv.html>

Sanjur, O.; Piperno, D.; Andres, T.; Wessel-Beaver, L. 2002. Phylogenetic relationships among domesticated and wild species of *Cucurbita* (Cucurbitaceae) inferred from a mitochondrial gene: Implications for crop plant evolution and areas of origin. *Proc Natl Acad Sci* 99(1): 535-540. (En línea). Revisado el 7 de septiembre 2024. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC117595/> doi: 10.1073/pnas.012577299. PMID: 11782554; PMCID: PMC117595.

Svalbard Global Seed Vault. (acceso el 9 de septiembre 2024) <https://seedvault.nordgen.org/>

Tarnowski, C.; Valdez, J.; Lorello, I.; Barboza, K.; Cavagnaro, P.; Della, G. 2022. Use of morphological, biochemical and molecular markers for early identification of an interspecific cucurbit hybrid (*Cucurbita maxima* x *Cucurbita moschata*). *Horticultura Argentina* 41 (104): 84-94. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: <https://www.horticulturaar.com.ar/en/pdf/330/use-of-morphological-biochemical-and-molecular-markers-for-early-identification-of-an-interspecific-cucurbit-hybrid-cucurbita-maxima-x-cucurbita-moschata.pdf>

UPOV (Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales, SW). 2007. Guidelines for the conduct of tests for distinctness, uniformity and stability on *Cucurbita moschata* Duch. (En línea). Revisado el 9 de septiembre 2024. Disponible en: <https://www.upov.int/edocs/tgdocs/en/tg234.pdf>

Villanueva, V. C. 2007. Calabazas cultivadas. Identificación de especies, caracterización y descripción varietal. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, MX. 123 p.

Influencia de factores edafológicos en los índices de vegetación y su impacto en la productividad y calidad del aguacate (*Persea americana* Mill.)

A. Morillo-De los Santos ^{1*}, M. Serrano ², D. Martínez-Romero ² y D. Valero ²

¹ Facultad de Ciencias Agronómicas y Veterinarias. Universidad Autónoma de Santo Domingo (FCAV-UASD). Santo Domingo, República Dominicana. * e-mail: amorillo13@uasd.edu.do

² Institute for Agro-food and Agro-environmental Research and Innovation (CIAGRO) - University Miguel Hernández (UMH), Ctra. Beniel km. 3.2, 03312 Orihuela, Alicante, Spain

Resumen

El consumo y la producción mundial de aguacate han crecido notablemente debido a sus reconocidas cualidades nutricionales. En el corto plazo se proyecta como uno de los cultivos más importante en términos de volumen de comercialización. La calidad y productividad de este fruto están determinadas por diversos factores durante la cosecha, tales como disponibilidad de nutrientes, las condiciones de temperatura y humedad en el suelo, impactando directamente la gestión postcosecha, características organolépticas y la satisfacción del consumidor. Los índices de vegetación como el NDVI, NDRE, NSMI u otros, obtenidos a partir de imágenes multispectrales, ofrecen una herramienta valiosa para caracterizar los factores edafológicos en las plantaciones, permitiendo predecir la productividad y calidad de las cosechas. Los factores edafológicos tienen un impacto directo en la salud de las plantas, y los índices de vegetación proporcionan una medida cuantitativa de este estado. El equilibrio nutricional del suelo, junto con las condiciones de temperatura y humedad del ambiente, afecta los procesos fisiológicos de la planta, el rendimiento, morfometría de la fruta, resistencia a daños por enfermedades, homogeneidad y duración de la maduración de los frutos, en la conservación de sus atributos sensoriales. Este artículo de revisión analiza cómo los factores edafológicos influyen en los índices de vegetación y cómo estos pueden predecir la productividad y calidad de los frutos de aguacate, a través de una revisión sistemática de la literatura científica. Comprender la dinámica de estos factores es esencial para desarrollar planes de manejo específicos que optimicen la producción, permitan cosechar frutos homogéneos y aseguren la calidad postcosecha.

Palabras clave: Nutrición mineral, Estrés hídrico, Maduración, Recolección, Postcosecha.

Influence of edaphic factors on vegetation indices and their impact on the productivity and quality of avocado (*Persea americana* Mill.)

Abstract

The global consumption and production of avocados have grown significantly due to their recognized nutritional qualities. In the short term, it is projected to become one of the most important crops in terms of commercial volume. The quality and productivity of this fruit are determined by various factors during harvest, such as the availability of mineral nutrients, soil temperature and humidity conditions, directly impacting post-harvest management, organoleptic characteristics, and consumer satisfaction. Vegetation indices such as NDVI, NDRE, NSMI, and others, obtained from multispectral images, offer a valuable tool for characterizing edaphic factors in plantations, allowing the prediction of crop productivity and quality. Edaphic factors have a direct impact on plant health, and vegetation indices provide a quantitative measure of this state. The nutritional balance of the soil, along with ambient temperature and humidity conditions, affects the plant's physiological processes, as well as fruit yield, morphology, disease resistance, homogeneity, and ripening duration, as well as the preservation of its sensory attributes. This review article analyzes how edaphic factors influence vegetation indices and how these can predict the productivity and quality of avocado fruits through a systematic review of scientific literature. Understanding the dynamics of these factors is essential for developing specific management plans that optimize production, allow for the harvesting of homogeneous fruits, and ensure post-harvest quality.

Keywords: Mineral nutrition, Water stress, Ripening, Harvest, Post-harvest.

Introducción

El aumento del consumo global de aguacate ha impulsado su cultivo comercial en más de 60 países, gracias a sus múltiples propiedades nutricionales (Talavera et al., 2023). La producción de aguacate ha mostrado una tendencia creciente en expansión territorial. Según la FAO (2022), el área estimada de producción alcanza 884,035 hectáreas, con una producción de 8.9 millones de toneladas, y se prevé un crecimiento continuo. Sin embargo, la industria del aguacate enfrenta desafíos significativos, como el cambio climático, los altos costos de producción y la incidencia de plagas y enfermedades, que afectan la calidad y la competitividad en los mercados internacionales (Charre-Medellín et al., 2021; Díaz Castellanos, 2021).

Los niveles generales de producción y los atributos de calidad de los aguacates pueden verse afectados significativamente por una multitud de factores ambientales que abarcan una amplia gama de condiciones climáticas, tipos de suelo y prácticas agrícolas (Da Silva & Da Silva, 2023). Los factores edafológicos, que incluyen las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, juegan un papel crucial en la salud y productividad de las plantas. Los principales productores de aguacates se encuentran en regiones tropicales y subtropicales, donde las condiciones ambientales, como las edafoclimáticas, pueden variar significativamente, incluso a nivel de finca (Uriarte et al., 2018). El análisis exhaustivo de la variabilidad observada en varias plantaciones se lleva a cabo meticulosamente mediante la utilización de índices de vegetación específicos, que sirven como indicadores confiables y objetivo que proporcionan información valiosa sobre el vigor y el estado de salud de las plantas. La eficacia de los índices de vegetación para evaluar la cobertura y pronosticar el rendimiento destaca su importancia en la agricultura y la ecología, estableciéndolos como instrumentos esenciales para mejorar la eficiencia agrícola en medio del cambio climático. En consecuencia, estos índices y sus integraciones facilitan el monitoreo de las plantas y son vitales para promover la agricultura sostenible y la seguridad alimentaria mundial.

Los índices de vegetación se derivan de la reflectancia de la luz y están relacionados con el estrés de las plantas, que puede ser causado por factores abióticos, como las características del suelo, el estrés hídrico y las condiciones climáticas (Boiarskii & Sinegovskii, 2022), o por factores bióticos, como la incidencia y severidad de plagas y enfermedades (Ainunnisa & Haerani, 2023). El proceso de estimación de los diversos índices de vegetación (Tabla 1), puede llevarse a cabo utilizando imágenes capturadas por vehículo aéreo no tripulado (drones) que vuelan a altitudes controladas según el interés del operador o por satélites que orbitan permanentemente sobre la tierra a distancias predeterminadas (Meivel & Maheswari, 2021).

Existen múltiples índices de vegetación (Tabla 1), entre los que destacan el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), NDRE (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde), NSMI (Índice Normalizado de Humedad del Suelo), SAVI (Índice de Vegetación Modificado por el Suelo Ajustado), EVI (Índice de vegetación mejorado) y el MGRVI (Índice Modificado de Vegetación Verde-Roja). Estos índices permiten planificar un manejo específico por zonas, basándose en la fenología de las plantas (Rahman et al., 2022), el estado nutricional de los cultivos y la homogeneización de la cosecha. Estos índices están fuertemente correlacionados con el rendimiento de la planta, el tamaño de los frutos y su calidad para el manejo postcosecha (Guerrón et al., 2022). Este artículo de revisión tiene como objetivo analizar cómo los factores edafológicos influyen en los índices de vegetación y cómo estos pueden predecir la productividad y calidad de los frutos de aguacate.

Materiales y Métodos

En este trabajo se realiza una revisión exhaustiva bibliográfica sobre los factores edafológicos, los índices de vegetación (NDVI, NDRE, NSMI, SAVI, EVI y MGRVI), el cultivo del aguacate (*Persea americana* mill) y la calidad de la fruta. Para responder a las preguntas ¿Cómo afectan los factores edáficos (suelo) a la calidad y productividad del aguacate (*Persea americana*)? y ¿Qué papel juegan

los índices de vegetación en el monitoreo y la evaluación de la salud y productividad de los cultivos de aguacate?

Revisión de literatura

El cultivo del aguacate (*Persea americana* Mill), miembro de la familia *Lauraceae*, representa una especie perenne autóctona de Mesoamérica, caracterizada por tres variedades distintas: mexicana, guatemalteca y antillana, cada una con atributos únicos (Huaman-Alvino et al., 2021). En conjunto, estas variedades se han diseminado ampliamente como árboles de sombra en numerosos países y, en los últimos años, se han convertido en un producto agrícola estratégico, cuyo cultivo a gran escala ofrece importantes ventajas económicas. Según Acosta-Rangel et al. (2021) existen unas condiciones ideales para el cultivo de aguacates, entre estos factores determinantes están la temperatura, la humedad del suelo, contenido de nutrientes y la intensidad de la luz.

Existen numerosas variedades de aguacates, estas muestran una diversidad significativa en términos de composición nutricional (Nasri et al., 2023), características de crecimiento y rendimiento de fruto (Abebe et al., 2022) y adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales (Salameh et al., 2022). Esta diversidad se refleja en los numerosos estudios realizados en diferentes regiones, cada uno de los cuales destaca aspectos únicos de las variedades de aguacate (Vincent et al., 2020; Flores et al., 2019; Álvarez et al., 2020). Entre todas las variedades, la ‘Hass’, originada en California, EE. UU., de un cruce entre variedades mexicanas y guatemaltecas, es una de las más consumidas en todo el mundo, principalmente por su capacidad de adaptación a las condiciones ambientales y su buen comportamiento en la vida de anaquel del fruto (Charre-Medellín et al., 2021).

Los criterios que definen la calidad del fruto de aguacate varían en función de la variedad, el país de origen, y otros factores y pueden cambiar significativamente durante el transporte (Belinska et al., 2023). Según Rodríguez et al., (2023) la calidad se puede definir a partir de indicadores como el contenido de materia seca, el contenido de aceite, la presencia de trastornos internos, los atributos sensoriales, la composición mineral y el perfil de ácidos grasos. Factores como las diferencias en el suelo y el clima entre huertos, así como las prácticas de manejo de nutrientes, influyen en la productividad y tamaño del fruto. La variabilidad en el contenido de materia seca está relacionada con la edad del fruto al momento de la cosecha, mientras que la heterogeneidad en la maduración es más común en huertos de baja altitud con cosecha temprana. Además, la maduración tardía se asocia con un mayor contenido de minerales en la pulpa, un elevado nivel de ácidos oleico y linoleico en frutos cultivados a bajas temperaturas, y características sensoriales influenciadas por la edad y la composición de la pulpa.

Los factores edafológicos y la calidad del aguacate

Las características del suelo afectan significativamente el rendimiento y la calidad del aguacate, también las características organolépticas del fruto, lo que a su vez influye en la aceptación del mercado y la preferencia del consumidor (Ferreira et al., 2016). Estudios realizados por Seid et al., (2023) en Etiopía han encontrado que las propiedades fisicoquímicas del suelo, como la textura del suelo, la densidad aparente, el contenido de humedad, el pH, la conductividad eléctrica, el carbono orgánico del suelo, el nitrógeno total y el fósforo disponible son factores críticos, especialmente en la calidad de la variedad ‘Hass’.

La acumulación de nutrientes como N, P, K, Ca, Mg y otros en el mesocarpio es vital para el desarrollo de la fruta. La concentración de estos nutrientes generalmente disminuye a medida que la fruta madura, lo que resalta la importancia del suministro oportuno de nutrientes (Salazar-Reque et al., 2021). La incorporación de estos nutrientes esenciales no solo mejora el perfil nutricional de la fruta, sino que también desempeña un papel fundamental para mantener su frescura y calidad durante todo el período de almacenamiento. Elementos minerales como el boro y calcio en el suelo tiene un impacto significativo en la mejora de la calidad del aguacate al reducir los trastornos internos de la fruta, como el pardeamiento vascular y la pudrición del tallo (Escobar et al., 2019).

Los nutrientes son fundamentales para mejorar la calidad de los aguacates al aumentar varios atributos de la fruta. La investigación realizada sobre la variedad de aguacate ‘Hass’ en Ecuador por Viera et al.,

(2023) demostraron que la implementación de prácticas agrícolas sostenibles contribuye a mejorar la firmeza, los sólidos solubles, las proteínas, la fibra, las grasas, los carotenoides, el calcio, el magnesio, el zinc y el ácido esteárico de la pulpa de la fruta. Los nutrientes, como el magnesio, mostraron correlaciones positivas con el potasio y el calcio, mientras que los flavonoides se asociaron con determinados ácidos grasos. Estos resultados subrayan la importancia de los nutrientes para mejorar la calidad del aguacate, lo que lo convierte en una fuente de alimento funcional y nutricionalmente beneficiosa que fomenta la adopción de prácticas dietéticas saludables. En consecuencia, la composición de nutrientes de los aguacates es crucial para prolongar su vida útil y garantizar que sigan siendo atractivos y nutritivos para los consumidores (Lieu et al., 2024).

Además de la fertilización, la gestión adecuada del agua es esencial para la composición de la fruta. En un estudio realizado en Egipto por Darwish & Elmetwalli (2019) evaluaron la influencia del método de riego y los tipos de fertilización, encontraron que la combinación de hojarasca con fertilizante mineral en combinación con el método de riego por goteo y microaspersión resultó en un aumento del rendimiento total del aguacate por planta, las tasas de crecimiento del árbol y la calidad de la fruta. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Hartini et al., (2024) quienes determinaron que el crecimiento de la planta está fuertemente asociado a la nutrición suplementaria y la frecuencia de riego. Se observó que la aplicación de nutrientes en momentos estratégicos durante el ciclo de crecimiento maximiza la absorción y mejora la resistencia a enfermedades, lo que sugiere que una gestión adecuada de estos factores es crucial para optimizar la producción agrícola.

Maximizar la productividad está asociada a la condición nutricional de los árboles de aguacates, investigaciones realizadas por Campisi-Pinto et al., (2017) indican que las concentraciones de nutrientes presentes en las inflorescencias de los árboles de aguacate en estado de coliflor (CSI) pueden servir como predictores confiables de rendimientos que superan los 40 kg por árbol individual. Mediante el análisis de los niveles de nutrientes en el tejido del CSI, los productores agrícolas pueden corregir las posibles deficiencias de nutrientes antes de que produzcan efectos adversos sobre la retención de flores y la producción de frutos, mejorando así el rendimiento, el tamaño y la calidad de los cultivos existentes.

El componente microbiológico del suelo juega un papel relevante en especialmente en el cultivo del aguacate. Esta interacción entre las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo influye en el crecimiento de las plantas, la absorción de nutrientes y el manejo de enfermedades. La investigación realizada por Sotomayor et al., (2019) examina los efectos de *Trichoderma harzianum* y *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* sobre la absorción de nutrientes en las plántulas de aguacate. Los hallazgos revelan que *Trichoderma harzianum* mejora la absorción de N^{5+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Mn^{2+} y Cu^{2+} tanto en las raíces como en las partes aéreas, mientras que *Glomus iranicum* var. *tenuihypharum* promueve la absorción de Ca^{2+} y Fe^{3+} en las raíces. Ambos microorganismos mostraron una influencia favorable en la absorción de nutrientes. En consecuencia, la aplicación de estos microorganismos beneficiosos puede mejorar sustancialmente la absorción de nutrientes en los cultivos de aguacate, lo que podría mejorar el crecimiento, productividad de las plantas y calidad de los frutos.

Los índices de vegetación

Los índices de vegetación son herramientas clave que permiten monitorear la salud de las plantas y su respuesta a las prácticas de manejo, facilitando una gestión más precisa y sostenible de los cultivos (Beniaich et al., 2019). El cálculo de los índices de vegetación se derivan de diversas tecnologías de teledetección como son imágenes capturadas por satelitales, drones o cámaras manuales produciendo imágenes de tipo RGB, multispectrales e hiperespectrales (Lee et al., 2021).

Las imágenes hiperespectrales facilitan la evaluación rápida de las concentraciones de nutrientes en las plantas de aguacate, logrando predecir los niveles de nutrientes minerales. En sus conclusiones Hapuarachchi et al., (2023), indica que la obtención de imágenes hiperespectrales de ambas superficies foliares ha demostrado su eficacia a la hora de evaluar los niveles de nutrientes en los árboles de aguacate 'Hass'. Además, el uso de tecnologías como la teledetección puede proporcionar datos en tiempo real sobre el estado hídrico y nutricional de los aguacates, permitiendo ajustes inmediatos en las estrategias de riego y fertilización (Wu et al., 2020).

Tabla 1. Relaciones índices de vegetación influencia del suelo y relación con los criterios de calidad del fruto de aguacate.

Índice de Vegetación	Especializado en monitorear	Influencia de los factores edafológicos	Relación con el fruto y calidad	Referencias
$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$	Biomasa Vegetal	Textura, nutrientes, pH y Retención de humedad	Rendimiento y tamaño	(Ullah & Joyce, 2024; Zhang et al., 2023)
	Actividad fotosintética	Nitrógeno, pH, materia orgánica y retención de humedad	Tamaño	(Yeşiloğlu et al., 2020; Shezi et al., 2020)
$NDRE = (NIR - Red Edge) / (NIR + Red Edge)$	Contenido de Clorofila	Nutrientes (nitrógeno y magnesio), pH y retención de humedad.	Contenido de materia seca	(Boiarskii & Sinegovskii, 2022; Garrido et al., 2023)
	Estado nutricional	Nutrientes, Capacidad de Intercambio de Cationes y pH	Composición mineral y el perfil de ácidos grasos	(Carvalho et al., 2020; Hapuarachchi et al., (2023)
$NSMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	Humedad del Suelo	Textura, retención de humedad, drenaje y estructura	Atributos sensoriales (jugosidad, textura y sabor del fruto)	(Chandramohan et al., 2023; Sharma et al., 2024; Tao et al., 2023)
	Estrés Hídrico	Retención de humedad, materia orgánica y drenaje.	Aparición de trastornos internos	(Gessner et al., 2023; Ge et al., 2019; Alves et al., 2023)
	Condiciones de Crecimiento	Textura, pH, estructura y retención de humedad	Rendimientos y uniformidad	(Berry et al., 2024; Tapiavargas et al., 2024)
$SAVI = ((NIR - R) / (NIR + R + L)) (1 + L)$ Donde (L) factor de ajuste entre 0.5 y 1	Cobertura Vegetal	Nutrientes, retención de humedad, textura, estructura del suelo	Atributos sensoriales (sabor y la textura del fruto)	(Hameed et al., 2021; Suarez et al., 2021)
	Condiciones del Suelo	pH, estructura, contenido de materia orgánica y nutrientes	Composición Mineral	(Novando & Arif, 2021; Lyu et al., 2023)
$EVI = (2.5) * (NIR - R) / (NIR + 6R - 7.5B + 1)$	Densidad de Vegetación	Nutrientes y retención de agua	Rendimiento y tamaño	(Aldubai et al., 2022; Cano-Gallego et al., 2023)
	Actividad fotosintética y fenología	Nitrógeno, pH, materia orgánica y retención de humedad	Contenido de aceite y el perfil de ácidos grasos	(Guerrón et al., 2022; hezi et al., 2019)
$MGRVI = G - R / G + R$	Contenido de Clorofila	Nutrientes (nitrógeno y magnesio) y retención de humedad	Contenido de materia seca	(Tsoulis et al., 2022; Cervantes-Paz et al., 2023)
	Estrés Nutricional	Nutrientes, Capacidad de Intercambio de Cationes y pH	Trastornos internos y perfil de ácidos grasos	(Muneer et al., 2024; Alves et al., 2023)

En el cultivo del aguacate se han implementado diversas técnicas de monitoreo que, combinadas con el análisis de datos, permiten ajustar las aplicaciones de insumos y maximizar la eficiencia en el uso de recursos. Investigaciones realizadas por Guerrón et al., (2022) demostró que el índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI) y el índice de vegetación transformada (TVI) son eficaces para estimar el vigor de las plantas al correlacionarlos con el contenido de nitrógeno de las hojas. En las plantaciones de aguacate, estos índices han mostrado altos coeficientes de correlación (valores de R² de 0,93 para el NDVI y de 0,95 para el TVI), lo que indica su fiabilidad a la hora de evaluar los niveles de nitrógeno foliar y, en consecuencia, la salud de las plantas y su capacidad para producir frutos de calidad.

En un estudio realizado por Salazar-Reque et al., (2021), en aguacate de la variedad Hass en Perú, empleando imágenes RGB capturadas por drones utilizando sensores hiperespectrales, multispectrales y térmicos para diferenciar las condiciones nutricionales y del agua en las plantaciones de aguacate Hass. El índice modificado de vegetación verde-roja (MGRVI) demostró una eficacia significativa para distinguir estas condiciones. Los coeficientes de correlación del MGRVI con los niveles de nitrógeno oscilaron entre 0,63 y 0,85, lo que refleja una fuerte correlación positiva. En consecuencia, los índices de vegetación, en particular el MGRVI, son fundamentales para evaluar el estado nutricional y hídrico de los cultivos de aguacate, ya que influyen en el rendimiento del aguacate al determinar las condiciones de salud y crecimiento de las plantas.

Otros índices como el SAVI (Tabla 1) tienen el potencial de mejorar el NDVI especialmente para cultivos como el aguacate, donde el fondo del suelo la combinación con otros cultivos puede afectar significativamente al monitoreo de la vegetación (Zhen et al., 2021). Asimismo, en NSMI (Tabla 1) puede desarrollarse como un índice compuesto que incorpore el NDVI y parámetros fisiológicos como la conductancia estomática y el flujo de savia, proporcionando una herramienta integral para gestionar el estrés hídrico en las plantaciones de aguacate. Este enfoque integrado no solo ayuda a monitorear y mitigar el estrés hídrico, sino que también apoya la toma de decisiones para optimizar las prácticas de riego y, en última instancia, mejorar el rendimiento y la calidad de la fruta (Aldubai et al., 2022). Por su parte, el NDRE (Tabla 1) resultó ventajoso para estimar la biomasa debido a su capacidad para tener en cuenta los cambios en el contenido de agua de las hojas y mitigar los efectos de la heterogeneidad del suelo (Sharifi & Felegari, 2023).

Influencia del suelo en los índices de vegetación y la calidad de los frutos

La influencia del suelo en los índices de vegetación y la calidad de la fruta es multifacética e involucra la calidad del suelo, la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes, que en conjunto afectan el crecimiento de las plantas y las características de la fruta. Los trabajos de investigación presentados ofrecen información sobre cómo las diferentes condiciones y tratamientos del suelo afectan a la calidad de la fruta en varias especies de plantas (Milošević & Milošević, 2020). Además, se ha observado que la textura del suelo y su capacidad de retención de agua juegan un papel crucial en el desarrollo de las raíces, lo que a su vez influye en la salud general de la planta y en la producción de frutos de mayor tamaño y sabor.

Estudios desarrollados en Australia por Rahman et al., (2022) donde se utilizaron imágenes satelitales de alta resolución, como WorldView-3, para obtener índices de vegetación como el NDVI y el EVI (Tabla 1) determinaron como se correlacionan con parámetros de rendimiento, el peso y el número de frutos. Estos índices han demostrado una relación positiva con el rendimiento del aguacate, con valores de R^2 superiores a 0,68. Al utilizar estos índices, se crearon mapas de rendimiento y número de frutos para cada bloque de aguacate, lo que ayudó a los productores a mejorar el manejo de los huertos, la planificación de la cosecha y las decisiones de venta.

Conclusiones

Para predecir el comportamiento de los frutos, es esencial estudiar la dinámica entre los factores que influyen en su calidad, lo cual requiere un conocimiento profundo de la planta y su entorno. En particular, es necesario considerar las variaciones genéticas de las diferentes variedades de aguacates y su interacción con las condiciones climáticas, ya que estas pueden afectar no solo el crecimiento y la productividad, sino también la resistencia a enfermedades y plagas. Las características físicas, químicas y biológicas del suelo muestran un patrón de variabilidad espacial y temporal, ejerciendo un impacto significativo sobre las plantas. Este impacto puede manifestarse de múltiples maneras y en diferentes grados, a veces imperceptible para el ojo humano.

La documentación revisada, resumida en la Tabla 1, es consistente en que, por medio de los índices de vegetación, se pueden determinar con precisión algunas características del suelo. Esto se debe a la influencia que los factores edafológicos ejercen sobre el desarrollo normal de las plantas, las cuales expresan esta influencia mediante la reflectancia de la luz, perceptible especialmente mediante

el cálculo de índices. La calidad de los frutos está condicionada por las condiciones de las plantas durante la etapa de cosecha. Las condiciones edafológicas y ambientales proveen a la planta de los recursos necesarios para completar su proceso de producción. Antes de completar este proceso, podemos examinar el estado nutricional o de estrés y asociarlo a los criterios de calidad de los frutos.

La combinación de diferentes índices de vegetación ha demostrado ser capaz de determinar con precisión esta variabilidad del suelo y las plantas, facilitando la identificación de áreas con necesidades específicas de manejo. Además, el uso de tecnologías avanzadas como la teledetección y los sensores remotos puede proporcionar datos que ayuden a los agricultores a tomar decisiones informadas sobre el riego, la fertilización y el control de plagas. La mejora de la calidad de las frutas para competir en los mercados requiere que los productores desarrollen prácticas sostenibles y adaptadas a las condiciones locales, además de seleccionar variedades resistentes y utilizar los recursos de manera eficiente. La implementación de estas estrategias no solo optimiza la producción, sino que también contribuye a la conservación del medio ambiente y a la sostenibilidad a largo plazo de la agricultura.

Agradecimientos

Esta investigación se desarrolla en el marco del proyecto “Sanidad e Innovación (DR-L1137)” financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo y ejecutado por el Ministerio de Agricultura de la República Dominicana y el Consejo Nacional de Investigaciones Agropecuarias.

Bibliografía

Abebe, H., Biratu, W., Tesfay, K., Berhe, M., Gebremeskel, H., 2022. Growth and yield evaluation of avocado (*Persea americana*) varieties in lowland agro ecology of Raya Azebo, Southern zone of Tigray region, Northern Ethiopia. A. B. 5-2. <https://doi.org/10.37637/ab.v5i2.919>

Acosta-Rangel, A., Li, R., Mauk, P., Santiago, L., Lovatt, C. J., 2021. Effects of temperature, soil moisture and light intensity on the temporal pattern of floral gene expression and flowering of avocado buds (*Persea americana* cv. Hass). Sci. H, 280. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109940>

Ainunnisa, I., & Haerani, H., 2023. The identification of pests and diseases of rice plants using sentinel-2 satellite imagery data at the end of the vegetative stage. *IOP Conf. Ser.: E. E. Sci.* 1230 012148. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1230/1/012148>

Aldubai, A. A., Alsadon, A. A., Al-Gaadi, K. A., Tola, E., Ibrahim, A. A., 2022. Utilizing spectral vegetation indices for yield assessment of tomato genotypes grown in arid conditions. S. J. B. Sci, 29. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.12.030>

Álvarez, G. E. G., Gutiérrez, A. M. L., Valencia, K. Á., Mossos, P. S., Rozo, D. L. S., Hurtado, N. C., 2020. Genetic and chemical characterization of avocado commercial cultivars avocado of Risaralda Colombia. R. B. F. 42, <https://doi.org/10.1590/0100-29452020593>

Alves, A. da S., Oliveira, F. de A. de, Silva, D. D. da, Santos, S. T. dos, Oliveira, R. R. T., Góis, H. M. de M. N., 2023. Production and quality of mini watermelon under salt stress and K⁺/Ca²⁺ ratios. R. B. E. A. A. 27. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n6p441-446>

Belinska, S., Nesterenko, N., Moroz, O., Bilokon, T., Kepko, V., Shynkaruk, O., Rudyk, Y., Gruntovskyi, M., Kharsika, I., 2023. The effect of storage temperature on the quality of avocado fruits from different climatic zones. P. S. J. F Sci, 17. <https://doi.org/10.5219/1850>

Beniaich, A., Silva, M. L. N., Avalos, F. A. P., Menezes, M. D. de, Cândido, B. M., 2019. Determinação do índice de cobertura vegetal em sistemas de manejo do solo com plantas de cobertura, utilizando veículo aéreo não tripulado com câmera fotográfica digital embarcada. Semina: C A. 40, <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n1p49>

Berry, A., Vivier, M. A., Poblete-Echeverría, C., 2024. Evaluation of canopy fraction-based vegetation indices, derived from multispectral UAV imagery, to map water status variability in a commercial vineyard. I. Sci. <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00907-1>

Boiarskii, B., Sinegovskii, M., 2022. Application of NDVI and NDRE vegetation indices in the assessment of soybean productivity under nitrogen controlled-release fertilizer. VIII Conf. (ITNT), 1. <https://doi.org/10.1109/ITNT55410.2022.9848588>

Campisi-Pinto, S., Zheng, Y., Rolshausen, P. E., Crowley, D. E., Faber, B., Bender, G., Bianchi, M., Khuong, T., Lovatt, C. J., 2017. Optimal nutrient concentration ranges of ‘Hass’ avocado cauliflower stage inflorescences—Potential diagnostic tool to optimize tree nutrient status and increase yield. H. Sci, 52. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12437-17>

Cano-Gallego, L. E., Bedoya-Ramírez, S. I., Bernal-Estrada, J. A., Barrera-Sánchez, C. F., de Jesús Córdoba-Gaona, O., 2023. Yield and fruit quality of avocado grown at different planting densities in Colombia. P. A. B, 58. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2023.v58.03146>

Carvalho, L. F. D. de, Amado, T. J. C., Sobrinho, J. C., Amaral, L. de P., Pott, L. P., Piccin, M., Pedron, V. F., 2020. Nutritional status of corn plants estimated through different vegetation indices in the growth stages. REVENG, 28. <https://doi.org/10.13083/reveng.v28i.8564>

Cervantes-Paz, B., Yahia, E. M., Nuñez-Vilchis, A., 2023. Identification and quantification of fatty acids and lipid-soluble phytochemicals using GC-MS, HPLC-MS, and FTIR and their association with quality parameters during avocado ripening. J. F. Sci, 88. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16390>

Chandramohan, K., Elayapillai, P., Vijayalakshmi, G., Kaliraj, S., 2023. Evaluating the relation of NDVI, NDWI, SMI, and LAI to land and soil degradation processes—A case study of Virudhunagar district, Tamil Nadu, India. M. M. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18773-5.00040-5>

Charre-Medellín, J. F., Mas, J.-F., & Chang-Martínez, L. A. (2021). Potential expansion of Hass avocado cultivation under climate change scenarios threatens Mexican mountain ecosystems. C. P. Sci, 72. <https://doi.org/10.1071/CP20458>

Da Silva, D. F., Villa, F., & Da Silva, G. J. (2023). Climate change implications on cultivation of avocado (*Persea americana* Mill.). In *Cultivation for Climate Change Resilience, Volume 1* (pp. 164-190). CRC Press.

Darwish, W. M., & Elmetwalli, A. H. (2019). Influence of irrigation method and fertilization type on avocado yield and quality. J. Agri. Eng., 36. <https://doi.org/10.21608/mjae.2019.94445>

Díaz Castellanos, R. (2021). El mercado mundial de aguacate: 60 años del liderazgo de México y su impacto en la próxima década. T. A. J. 21. <https://doi.org/10.36105/theanahuacjour.2021v21n2.01>

Escobar, J. V., Rodriguez, P., Cortes, M., Correa, G., Escobar, J. V., Rodriguez, P., Cortes, M., Correa, G., 2019. Influencia de la materia seca como índice de madurez de cosecha y tiempo de almacenamiento en frío sobre la calidad del aguacate cv. Hass producido en la región del Trópico Alto. Inf. Tec., 30. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000300199>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2022). Producción mundial de aguacate (base de datos). https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity

Ferreira, R., Sellés, G., Saavedra, J., Ortiz, J., Zúñiga, C., Troncoso, C., Rivera, S. A., González-Agüero, M., Defilippi, B. G., 2016. Identification of pre-harvest factors that affect fatty acid profiles of avocado fruit (*Persea americana* Mill.) cv. «Hass» at harvest. S. A. J. B., 104. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.10.006>

Flores, M., Saravia, C., Vergara, C. E., Avila, F., Valdés, H., Ortiz-Viedma, J., 2019. Avocado oil: Characteristics, properties, and applications. Molecules, 24. <https://doi.org/10.3390/molecules24112172>

- Garrido, A., Conde, A., Serôdio, J., De Vos, R. C. H., Cunha, A., 2023. Fruit Photosynthesis: more to know about where, how and why. *Plants*, 12. <https://doi.org/10.3390/plants12132393>
- Ge, Y., Cheng, Z., Si, X., Ma, W., Tan, L., Zang, X., Wu, B., Xu, Z., Wang, N., Zhou, Z., Lin, X., Dong, X., Zhan, R., 2019. Transcriptome profiling provides insight into the genes in carotenoid biosynthesis during the mesocarp and seed developmental stages of avocado (*Persea americana*). *Inter. J. M. Sci.*, 20. Scopus. <https://doi.org/10.3390/ijms20174117>
- Gessner, U., Reinermann, S., Asam, S., Kuenzer, C., 2023. Vegetation stress monitor-assessment of drought and temperature-related effects on vegetation in Germany analyzing MODIS time series over 23 years. *R. S.*, 15. <https://doi.org/10.3390/rs15225428>
- Guerrón Barahona, A., Viera Arroyo, W., Campaña Cruz, D., Vásquez Rojas, L., Montufar Delgado, C., 2022. Application of plant indices (red band and near-infrared) in avocado plantations. *A. M. Agri.*, 3. <http://dx.doi.org/10.54517/ama.v3i2.2110>
- Hameed, R. S., Georg, L. E., Sayyid, B. H., 2021. Modified vegetation detection index using different-spectral signature. *Iraqi J. Sci.*, 4208. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2021.62.11.38>
- Hapuarachchi, N. S., Trueman, S. J., Kämper, W., Farrar, M. B., Wallace, H. M., Nichols, J., Bai, S. H., 2023. Hyperspectral imaging of adaxial and abaxial leaf surfaces for rapid assessment of foliar nutrient concentrations in Hass Avocado. *R. S.*, 15. <https://doi.org/10.3390/rs15123100>
- Hartini, K. S., Dalimunthe, A., Tarigan, V. A. B., Insani, A., 2024. Responses of avocado (*Persea americana*) to various doses of compost fertilizer and watering interval. *G. F. J.*, 2. <https://doi.org/10.32734/gfj.v2i01.15562>
- Huaman-Alvino, C., Chirinos, R., Gonzales-Pariona, F., Pedreschi, R., Campos, D., 2021. Physicochemical and bioactive compounds at edible ripeness of eleven varieties of avocado (*Persea americana*) cultivated in the Andean Region of Peru. *Int. J. F. Sci. Tec.*, 56. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15287>
- Lee, G., Hwang, J., Cho, S., 2021. A novel index to detect vegetation in urban areas using UAV-based multispectral images. *A. Sci.*, 11. <https://doi.org/10.3390/app11083472>
- Lieu, M. D., Phuong, T. V., Nguyen, T. T. B., Dang, T. K. T., Nguyen, T. H., 2024. A review of preservation approaches for extending avocado fruit shelf-life. *J. Agr. F. R.*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101102>
- Lyu, H., Grafton, M., Ramilan, T., Irwin, M., Wei, H.-E., Sandoval, E., 2023. Using remote and proximal sensing data and vine vigor parameters for non-destructive and rapid prediction of grape quality. *R. S.*, 15. <https://doi.org/10.3390/rs15225412>
- Meivel, S., Maheswari, S., 2021. Remote sensing analysis of agricultural drone. *J Indian Soc R. S.*, 49, 689–701. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01244-y>
- Milošević, T., Milošević, N., 2020. Soil fertility: Plant nutrition vis-à-vis fruit yield and quality of stone fruits. *En A. K. Srivastava & C. Hu (Eds.), Fruit Crops.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818732-6.00041-1>
- Muneer, M. A., Afridi, M. S., Saddique, M. A. B., Chen, X., Zaib-Un-Nisa, Yan, X., Farooq, I., Munir, M. Z., Yang, W., Ji, B., Zheng, C., Wu, L., 2024. Nutrient stress signals: Elucidating morphological, physiological, and molecular responses of fruit trees to macronutrients deficiency and their management strategies. *Sci. H.*, 329. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112985>
- Nasri, C., Halabi, Y., Hajib, A., Choukri, H., Harhar, H., Lee, L.-H., Mani, V., Ming, L. C., Goh, K. W., Bouyahya, A., Tabyaoui, M., 2023. Proximate composition, lipid and elemental profiling of eight varieties of avocado (*Persea americana*). *Sci. R.*, 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50119-y>
- Novando, G., Arif, D. A., 2021. Comparison of soil adjusted vegetation index (SAVI) and modified soil adjusted vegetation index (MSAVI) methods to view vegetation density in padang city using landsat 8 image. *Int. R. S. A. J.*, 2. <https://doi.org/10.24036/irsaj.v2i1.23>

Rahman, M. M., Robson, A., Brinkhoff, J., 2022. Potential of time-series Sentinel 2 data for monitoring avocado crop phenology. *R. S.*, 14. <https://doi.org/10.3390/rs14235942>

Rodríguez, P., Soto, I., Villamizar, J., Rebolledo, A., 2023. Fatty acids and minerals as markers useful to classify Hass avocado quality: ripening patterns, internal disorders, and sensory quality. *Hort.* 9. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9040460>

Salameh, M., Nacouzi, D., Lahoud, G., Riachy, I., El Kayal, W., 2022. Evaluation of postharvest maturity indices of commercial avocado varieties grown at various elevations along Lebanon's coast. *F. P. Sci.*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.895964>

Salazar-Reque, I., Arteaga, D., Huaman, K. G., Bustamante, S. H., 2021. A CNN-based algorithm for selecting tree-of-interest images acquired by UAV. En Cardona M. & Solanki V.K. (Eds.), *Proc. IEEE Int. Conf. Mach. Learn. Appl. Netw. Technol., ICMLANT*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., <https://doi.org/10.1109/ICMLANT53170.2021.9690556>

Seid, H., Gebrekirstos, A., Hadgu, K., Mokria, M., Hagazi, N., Dubale, W., 2023. Adaptation and growth performance of five avocado cultivars in Ethiopia. *Heliyon*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23037>

Sharifi, A., Felegari, S., 2023. Remotely sensed normalized difference red-edge index for rangeland biomass estimation. *A. Eng. A. T.*, 95. <https://doi.org/10.1108/AEAT-07-2022-0199>

Sharma, J., Prasad, R., Srivastava, P. K., Yadav, S. A., Singh, S. K., Verma, B., 2024. Development of a new vegetation modulated soil moisture index for the spatial disaggregation of SMAP soil moisture data product. *P. C. E.* 135. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103594>

Shezi, S., Magwaza, L. S., Mashilo, J., Tesfay, S. Z., Mditshwa, A., 2019. Photosynthetic efficiency and relationship to mesocarp dry matter content of 'Carmen' avocado (*Persea americana* Mill.) fruit in a cool subtropical climate. *Sci. Hort.*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.048>

Shezi, S., Magwaza, L. S., Mashilo, J., Tesfay, S. Z., Mditshwa, A., 2020. Photochemistry and photoprotection of 'Gem' avocado (*Persea americana* Mill.) leaves within and outside the canopy and the relationship with fruit maturity. *J. P. Phy.*, 246-247. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153130>

Shezi, S., Magwaza, L. S., Ncama, K., 2023. Importance of maturity indexing in postharvest management of selected subtropical and temperate fruits. En *Postharvest Management of Fresh Produce: Recent Advances* (pp. 59-79). <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91132-0.00007-1>

Sotomayor, A., Gonzáles, A., Cho, K., Villavicencio, A., Jackson, T., & Viera, W. (2019). Effect of the application of microorganisms on the nutrient absorption in avocado (*Persea americana* Mill.) seedlings. *J Korean Soc Int Agric*, 31(1), 17-24. Suarez, L., Zhang, P., Sun, J., Wang, Y., Poblete, T., Hornero, A., Zarco-Tejada, P. J., 2021. Assessing wine grape quality parameters using plant traits derived from physical model inversion of hyperspectral imagery. *Agri. F. M.*, 306. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108445>

Talavera, A., Soomi, A., Bombarely, A., Matas, A. J., Hormaza, J. I., 2023. Author Correction: Genome-Wide SNP discovery and genomic characterization in avocado (*Persea americana* Mill.) *Sci. R.* 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29346-w>

Tao, H., Sun, H., Wang, Y., Wang, X., Guo, Y., 2023. Effects of water stress on quality and sugar metabolism in 'Gala' apple fruit. *Hor. P. J.*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2022.03.008>

Tapia-Vargas, L. M., Hernández-Pérez, A., Álvarez-Hernández, J. C., Ruiz-Corral, J. A., 2024. Dynamics of moisture and nutrients in the root zone, actual evapotranspiration (ET_r), and irrigation efficiency in avocado trees of highland and midland orchards of Michoacán, México. Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202404.0007.v1>

Tsoulias, N., Saha, K. K., Zude-Sasse, M., 2022. 3D point cloud of normalized difference vegetation index (NDVI) of segmented fruit and leaves in apple production. Preprints. <https://doi.org/10.1101/2022.10.24.513567>

Uriarte M., Muscarella R., Zimmerman J. K., 2018. Environmental heterogeneity and biotic interactions mediate climate impacts on tropical forest regeneration. *G. C. Biol.* ; 24: e692–e704. <https://doi.org/10.1111/gcb.14000>

Ullah, M. A., Joyce, D. C., 2024. Avocado (*Persea americana* cv. ‘Hass’) Fruit Mineral Composition at Canopy Level towards Sustainable Quality. *Sustainability*, 16. <https://doi.org/10.3390/su16020750>

Viera, W., Gaona, P., Samaniego, I., Sotomayor, A., Viteri, P., Noboa, M., Merino, J., Mejía, P., Park, C. H., 2023. Mineral Content and Phytochemical Composition of Avocado var. Hass Grown Using Sustainable Agriculture Practices in Ecuador. *Plants*, 12. <https://doi.org/10.3390/plants12091791>

Vincent, C., Mesa, T., Munne - Bosch, S., 2020. Identification of a new variety of avocados (*Persea americana* mill. Cv. Bacon) with high vitamin e and impact of cold storage on tocochromanols composition. *Antioxidants*, 9. <https://doi.org/10.3390/antiox9050403>

Wu, D., Johansen, K., Phinn, S., Robson, A., Tu, Y.-H., 2020. Inter-comparison of remote sensing platforms for height estimation of mango and avocado tree crowns. *Int. J. A. E. Obs. and Geo*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102091>

Yeşiloğlu, T., Çimen, B., Yılmaz, B., İncesu, M., 2020. Relationship between photosynthesis and fruit quality of ‘Clemenules clementine’ mandarin variety budded on various rootstocks. *Int. J. A. E. F. Sci.*, 4. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2020.3.1>

Zhang, T., Song, J., Fan, Y., Liu, Y., Yu, S., Guo, D., Hou, T., Guo, K., 2023. Vegetation Index Research on the Basis of Tree-Ring Data: Current Status and Prospects. *Forests*, 14. <https://doi.org/10.3390/f14102016>

Zhen, Z., Chen, S., Yin, T., Chavanon, E., Lauret, N., Guilleux, J., Henke, M., Qin, W., Cao, L., Li, J., Lu, P., Gastellu-Etchegorry, J.-P., 2021. Using the Negative Soil Adjustment Factor of Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) to Resist Saturation Effects and Estimate Leaf Area Index (LAI) in Dense Vegetation Areas. *Sensors* 21. <https://doi.org/10.3390/s21062115>

**Economía Agraria. Usos del
Territorio y Desarrollo Rural.
Agricultura Sostenible y Cambio
Climático**

Utilización de Python como lenguaje de desarrollo de aplicaciones WEB para la monitorización y almacenamiento de datos de narices electrónicas

Juan J. Pérez-Solano¹ y Antonio Ruiz-Canales²

¹ Departamento de Informática. Universitat de València. Avenida de la Universidad S/N. 46100 Burjassot, Valencia: juan.j.perez@uv.es

² Departamento de Ingeniería. EPSO-Universidad Miguel Hernández de Elche, Orihuela, Alicante 03312, España, acanales@umh.es

Resumen

Internet se ha convertido en un componente esencial de la vida moderna, transformando cómo las personas se comunican, trabajan, aprenden y se entretienen. Su importancia radica en su capacidad para conectar a individuos y organizaciones a nivel global, facilitando el acceso instantáneo a una gran variedad de información y recursos. En este sentido, la aplicación de las tecnologías WEB a la monitorización y supervisión de sistemas embebidos conectados a Internet nos permite desarrollar la WEB del Internet de las Cosas (IoT). Las aplicaciones WEB ofrecen la ventaja de no requerir el desarrollo de aplicaciones del lado del cliente. Los usuarios pueden utilizar un navegador para conectarse al dispositivo IoT y supervisar o controlar su funcionamiento. Además, siempre que el diseño WEB sea compatible con HTML (Hypertext Markup Language), es posible construir un sistema de supervisión WEB multiplataforma, ya que todos los navegadores independientemente de la plataforma hardware utilizada, ya sean smartphones, ordenadores o tabletas, soportan el código HTML. Por lo tanto, utilizando esta tecnología de monitorización basada en la WEB, se pueden conseguir sistemas de monitorización multiplataforma tanto locales como remotos, permitiendo a los administradores monitorizar sistemas utilizando cualquier dispositivo que tenga un navegador WEB de forma segura.

Palabras clave: IoT, Python, VPN, Servicios WEB, Nariz Electrónica.

Python as a WEB application development language for monitoring and storing data from electronic noses

Abstract

The Internet has become an essential component of modern life, transforming how people communicate, work, learn and entertain themselves. Its importance lies in its ability to connect individuals and organizations globally, providing instant access to a wide variety of information and resources. In this sense, the application of WEB technologies to the monitoring and supervision of embedded systems connected to the Internet allows us to develop the Internet of Things (IoT) WEB. WEB applications offer the advantage of not requiring the development of client-side applications. Users can use a browser to connect to the IoT device and monitor or control its operation. Moreover, as long as the WEB design supports HTML (Hypertext Markup Language), it is possible to build a cross-platform WEB monitoring system, since all browsers regardless of the hardware platform used, whether smartphones, computers or tablets, support HTML code. Therefore, using this WEB-based monitoring technology, both local and remote cross-platform monitoring systems can be achieved, allowing administrators to monitor systems using any device that has a WEB browser in a secure manner.

Keywords: IoT, Python, VPN, WEB Services, Electronic Nose.

Revisión bibliográfica sobre la producción, socioeconomía, rentabilidad, cadena de valor e impacto ambiental del aguacate en la República Dominicana

C. A. Martínez-Mateo¹ y D. B. López-Lluch²

¹ Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD). Facultad de Agronomía y Ciencias Veterinaria (FACV), C. Cam. de Engombe, 10904. Santo Domingo, República Dominicana e-mail: cmartinez49@uasd.edu.do.

² Departamento de Economía Agroambiental, Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Carretera de Beniel, km 3.2, Orihuela, 03312, España

Resumen

Persea americana (aguacate o palta, tiene más de diez nombres comunes), es originaria de México y América Central, y es miembro de la familia de plantas con flores Lauraceae. El valor de producción bruta mundial del aguacate fue de aproximadamente 5.812 mil millones de dólares en 2018. La producción y el comercio global del cultivo de aguacate se han incrementado a un ritmo acelerado durante el período 2012-2022 (Rabobank, 2023). El valor del mercado comercial de los aguacates frescos a nivel global, por región en 2022 fue de 18 billones de dólares, respecto a los países que incluyó el estudio (América Latina 32%, Estados Unidos y Canadá 27 %, Europa 22 %, Asia 11 %, Oceanía 4 %, y África y Medio Oriente 4 %) (Rabobank, 2023). Según el estudio de Rabobank (2023), la República Dominicana es el quinto mayor productor de aguacate y se encuentra entre los diez principales países exportadores del mundo. El cultivo de aguacate tiene un gran potencial para aumentar la economía agrícola, la riqueza de los productores y la distribución de ingreso a través de empleos directos e indirectos en las regiones de producción del país. Por otro lado, la industria del aguacate (oro verde) es muy censurada por la deforestación, el excesivo consumo de agua subterránea y la contaminación del agua por el uso de plaguicidas y fertilizantes, lo que amenaza a otras especies y al medio ambiente. El Clúster de Aguacate de Cambita, San Cristóbal y asociaciones de productores de Azua buscan potencializar la producción de aguacate. Esta revisión tiene como objetivo proporcionar una descripción general del cultivo de aguacate, diagnóstico socioeconómico, viabilidad y análisis de la cadena de valor e impacto ambiental.

Palabras clave: Aguacate o palta, viabilidad, ambiente, seguridad alimentaria, sostenibilidad

Literature review on production, socioeconomics, profitability, value chain and environmental impact of avocado in the Dominican Republic

Abstract

Persea Americana (avocado or palta, has more than ten common names), is native to Mexico and Central America, and is a member of the Lauraceae family of flowering plants. The global gross production value of avocado was approximately \$5.812 billion in 2018. Global production and trade in avocado cultivation have increased at an accelerated rate during the period 2012-2022 (Rabobank, 2023). The value of the commercial market for fresh avocados globally, by region in 2022, was 18 billion of dollars, compared to the countries included in the study (Latin America 32%, United States and Canada 27%, Europe 22%, Asia 11%, Oceania 4%, and Africa and the Middle East 4%) (Rabobank, 2023). According to the Rabobank study (2023), the Dominican Republic is the fifth largest producer of avocado and is among the top ten exporting countries in the world. Avocado cultivation has great potential to increase the agricultural economy, the wealth of producers and the distribution of income through direct and indirect jobs in the production regions of the country. On the other hand, the avocado industry (green gold) is highly censored due to deforestation, excessive consumption of groundwater and water contamination due to the use of pesticides and fertilizers, which threatens other species and the environment. The Avocado Cluster of Cambita, San Cristóbal and Azua producer associations seek to boost avocado production. This review aims to provide an overview of avocado cultivation, socioeconomic diagnosis, feasibility and value chain analysis and environmental impact.

Keywords: Avocado, viability, environment, food safety, sustainability

Introducción

Esta revisión tiene como propósito tener una visión general sobre el cultivo del aguacate (*Persea americana* Mill), y el objetivo de recabar información publicada sobre la viabilidad de la producción, la cadena de valor e impacto ambiental del aguacate en la República Dominicana. El valor de la producción bruta mundial del aguacate fue de 8,4 millones de toneladas (t), por un valor cercano a 5.812 mil millones de dólares en 2018. La producción y el comercio global de este cultivo se han incrementado a un ritmo acelerado durante el período 2012-2022 (Rabobank, 2023). El valor del mercado comercial de los aguacates frescos a nivel global y por región en 2022 fue de 18 billones de dólares, respecto a los países que incluyó el estudio (América Latina 32%, Estados Unidos y Canadá 27 %, Europa 22 %, Asia 11 %, Oceanía 4 %, y África y Medio Oriente 4 %) (Rabobank, 2023).

Las exportaciones mundiales de aguacate se incrementaron en 10,6 por ciento en 2023, y alcanzaron un poco más de 2,8 millones de toneladas, debido al aumento de las áreas sembradas y cosechadas de una oferta positiva de México, el principal productor y exportador a nivel mundial, además, los datos e informaciones disponibles de este año indican el crecimiento rápido de Perú y Kenia (FAO, 2023). Las exportaciones totalizaron 1,4 millones de toneladas métricas en 2023, un aumento interanual del 17 por ciento, según el Sistema de Información (USDA, 2024; FAO, 2024). El principal importador de las exportaciones de aguacates es Estados Unidos con una participación del 81 por ciento, seguido de Canadá, Japón y España (USDA, 2024).

Según el estudio de Rabobank (2023), la República Dominicana es el quinto mayor productor de aguacate y se encuentra entre los diez principales países exportadores del mundo. En este país, la producción y las exportaciones de aguacate se expandieron en 182,75 % y 295,77 %, respectivamente; y el área sembrada creció 370 %, al pasar de 1.485,0 a 6.988,25 ha, en el mismo período 2012-2022 (MARD, 2024). En 2023, la producción creció 38%, el área sembrada 14%, la cosechada 21 % y las exportaciones 20% (MARD, 2024). Este crecimiento ha sido sostenible en los últimos diez años, donde se evidencia en el período de 2014-2023 un aumento de 257 % del volumen de las ventas de aguacate en el exterior (MARD, 2024).

El aguacate se ha convertido en un cultivo estratégico para aumentar la generación de divisas, contribuir a la subsistencia de los productores y mejorar el bienestar de vida de los productores dominicanos, lo que implica que la rentabilidad percibida por el productor es lo que ha incentivado a una mayor producción o aumento de la oferta. Entre las variedades más deseadas y exportadas del país están Semil, Hass, Choquete y Carla, seguido de Popenoe, Pollock y Doctor Dupuig. Por otra parte, los atributos del aguacate sobre el beneficio a la salud (en la visión, enfermedades cardiovasculares, y en la digestión), y los cosméticos, son los que han impulsado la demanda del producto a nivel global (Bisonó y Hernández, 2008; IICA, 2017). Esta fruta tiene grandes perspectivas en el mercado internacional, por la demanda insatisfecha en mercados de la Unión Europea de los tipos de cultivares, tanto de las variedades verdes (Green Skin) como de la variedad Hass (IICA, 2017).

La cadena de valor y su análisis son el paradigma actual del estudio de los sistemas agroalimentarios, la cual juega un papel relevante para conocer y entender el funcionamiento de los diferentes eslabones como: proveedores de insumos y servicios, productores, intermediarios (transporte, centros de acopio, procesador exportador, industria, mayoristas, detallistas), y consumidor. La cadena de valor consiste en una sucesión de acciones realizadas con el objetivo de instalar y valorizar un producto o servicio exitoso en un mercado, mediante un planteamiento económico viable (Robben, 2018).

La alta demanda del aguacate requiere de estudios que demuestren la viabilidad de la producción y su aporte a los ingresos de los productores o agricultores que no tienen identificada la producción y comercialización. En la determinación de la viabilidad de una inversión se incorpora el estudio comercial, técnico, financiero y económico mediante el comportamiento de los indicadores de rentabilidad: VAN, TIR, RB/C, principalmente (Peña et al., 2015). Estos indicadores indican si la inversión es rentable o no, o puede resultar riesgosa.

La demanda del aguacate ha provocado un aumento del área de siembra en el país, el cual, de no llevarse un manejo sostenible del cultivo de acuerdo con las condiciones y exigencias del aguacate, se puede

provocar un deterioro de los recursos naturales y daño al ambiente (Ohlau y Spiler, 2023). En varias partes del mundo, este cultivo ha tenido mala reputación por los casos de deforestación, desplazamiento de superficies de vegetación natural y escasez de agua que ha provocado, considerado por algunos como una especie de vampiro de las fuentes de agua, las cuales aumentan las externalidades negativas en la poblaciones o núcleos humanos y en los ambientes cercanos a las plantaciones de aguacate que compiten por el agua (WEF, 2020; CRI, 2023).

A pesar de conocer las generalidades del cultivo, el país no cuenta con un estudio actualizado de cuáles son los puntos críticos determinantes de la rentabilidad, productividad, ni las medidas correctivas. Al contar con estudios como éstos, se puede dotar y promover el desarrollo de capacidades a los productores y con ello, el aumento de la producción, calidad y reducción de la tasa de rechazo de la fruta (De Oleo, 2010).

Objetivo General

Realizar una revisión sobre la producción, socioeconomía, rentabilidad, cadena de valor e impacto ambiental del aguacate en la República Dominicana.

Objetivos Específicos

- 1) Revisar la estructura productiva del cultivo de aguacate.
- 2) Revisar la socioeconomía del productor de aguacate y su familia
- 3) Revisar estudios sobre la rentabilidad y viabilidad de la producción de aguacate.
- 4) Revisar la función de los actores de la cadena de valor de la producción de aguacate
- 5) Revisar estudios sobre el impacto ambiental de la producción de aguacate.

Materiales y métodos

Los autores hicieron una búsqueda bibliográfica exhaustiva (*Scopus*), en el mes de agosto 2024, con preferencia de documentos en el idioma inglés. Al colocar las palabras claves en inglés (Avocado, viability, environment, food safety, sustainability) como frase de búsqueda la base de datos no arrojó ningún documento, luego con la palabra aguacate en inglés (avocado) la base de datos arrojó 7.241 documentos. El filtrado para la obtención de las publicaciones de interés se realizó mediante una frase de búsqueda con rango de 2019-2024 con acceso abierto, agregando cada palabra clave en inglés como aguacate, producción y viabilidad, de los cuales resultaron 32 documentos de los que se escogieron los artículos y revisiones de interés. Los artículos utilizados fueron descargados en Google Académico, además se usaron publicaciones de *Science Direct*. Se accedió a cada entrada de artículo para recuperar el texto completo y revisar su contenido, incluido el título. Se utilizaron de los artículos filtrados de *Scopus* tres revistas que tienen que ver con el tema de manera directa y los demás fueron estudios nacionales sobre el aguacate. La revisión se realiza con análisis del contexto mundial y de la República Dominicana, lo que obliga a poner énfasis en los estudios realizados en el país y a nivel de otros países latinoamericanos y del mundo, como es el caso del mayor productor de aguacate del mundo que es México. También, se hizo una revisión de datos secundarios, tanto de la base de datos de FAOSTAT, de donde se realizaron análisis sobre la producción y rendimiento, así como los estudios publicados de Rabobank, y otros publicados a nivel nacional e internacional.

Resultados y Discusión

Historia y origen del Aguacate

El aguacate o palta (*Persea americana* Mill), considerado el “oro verde” por la importancia comercial de la fruta, fue domesticado hace varios miles de años en Centroamérica y presenta una historia, de aproximadamente, 10.000 años (Bhore, et al., 2021). En su etimología, la frase náhuatl (lengua nativa americana) da origen a lo que se conoce como aguacate (español), avocado (inglés) que significa

testículo, lo que denota la forma del fruto. *Persea americana* Mill (aguacate o palta, tiene más de diez nombres comunes), es originaria de las regiones tropicales y subtropicales de México y América Central, y es miembro de la familia de plantas con flores Lauraceae. Su hábitat natural abarca desde las tierras altas centrales de México, que son susceptibles a las heladas, hasta las cálidas y húmedas selvas del noroeste de Colombia. Es un árbol tropical y su fruta se caracteriza por la forma de pera de un color verde negruzco, alto valor nutricional, textura cremosa y buen sabor (Bhore et al., 2021). En Perú, los arqueólogos encontraron semillas de *Persea*, que fueron enterradas con momias incas en el año 750 a.C., y hay evidencias de que se cultiva en México desde el 1.500 a.C.

El aguacate y su distribución en el resto del mundo

En 1492, los colonizadores llegaron a América, después de América del Norte continuaron la invasión hacia el sur hasta que los invasores españoles y portugueses llegaron a América del Sur y Central en 1514. Los españoles no tardaron mucho en descubrir los frutos del aguacate en el norte de América del Sur, América Central y México (Bhore et al., 2021). El centro de origen fue el norte de México y se extendió al norte y al sur, hacia el norte en dirección al sureste de los Estados Unidos, y al sur hacia Brasil y Colombia, hasta Bolivia y Chile. La distribución del aguacate se representa en la Figura 1.

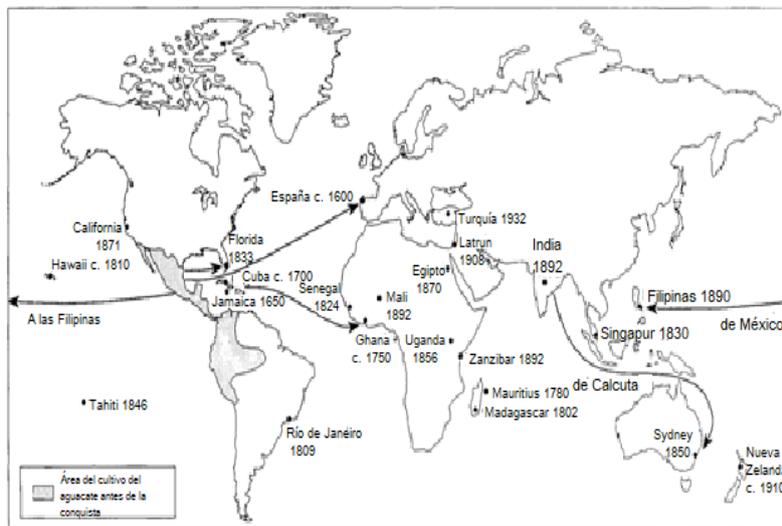


Figura 1. Distribución del aguacate después de la colonización hasta 1915 (Bhore et al., 2021)

Tipos o eco-tipos de aguacate

El aguacate posee más de 100 cultivares y clones clasificados en tres razas hortícolas: a) Guatemalteca (*P. americana* var *Guatemalensis*), b) Antillana (*P. americana* var *Drymifolia*), c) Mexicana (*P. americana* var *Americana*). Como indican los nombres, los de las zonas de Guatemala generan la raza guatemalteca (G), y la raza antillana (A) proviene de las plantas encontradas en las Antillas, y de México la raza mexicana (M). Las variedades de mayor comercialización internacional son las de origen guatemalteco o mexicano, especialmente el “Hass”, “Fuerte” y “Nabal” (Bhore et al., 2021).

Aguacate tipo A y tipo B

La flor del aguacate es hermafrodita, según el momento en que la flor abra como femenina o masculina, las variedades de aguacates se clasifican en dos grupos florales, tipo A y tipo B. El pistilo sale en la mañana y el androceo en la tarde dependiendo de la variedad. Las de tipo A abren en femenino por la mañana, se cierran por la tarde y abren al día siguiente en masculino por la tarde. Por su parte, las B abren en femenino por la tarde, se cierran y abren en masculino por la mañana. Para que una variedad de aguacate sea más productiva, ha de ser polinizada por otra variedad de diferente tipo de flor. Por ejemplo, si lo que buscamos es una gran cosecha de Hass (tipo A), se aconseja sembrar un porcentaje de variedades tipo B como Bacon, Fuerte, Zutano, etc. diseminado dentro de la misma plantación (Bisonó y Hernández, 2008). En este sentido, determinar el porcentaje y la distribución de la variedad

polinizante, así como qué variedades coinciden mejor con la floración de la variedad principal es una de las claves para una buena producción. Las variedades tipo A Semil 34, Choquette, Lula, Hass, Pinkerton y las variedades tipo B Fuerte, Hall, Bacon, Zutano, Meléndez. En la tabla 1, se presentan las variedades sembradas en el país de acuerdo con su ecotipo, tipo de flor, peso, % de aceite y época de cosecha.

Tabla 1. Características de variedades de aguacate sembradas en la República Dominicana

Variedad	Ecotipo o raza	Tipo de flor	Peso (g)	% aceite	Color	Época de cosecha
Semil-34	G x A	A	600-700	10-15	Verde	Noviembre-enero
Choquete	G x A	A	700-900	10-15	Verde	Enero-Marzo
Pollock	A	B	800-1200	6	Verde	Julio-Septiembre
Fuerte	G x M	B	250-350	25-30	Verde	Enero-Marzo
Hass	G	A	200-250	20	Verde-Morado	Abril-Octubre
Both 7 y 8	G x A	B	300-600	10-15	Verde	Agosto-Septiembre
Hall	G x A	B	300-600	10-15	Verde	Noviembre-Febrero

Fuente: Fundación de Desarrollo Agropecuario - Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal (CEDAF). 1993.

Localización y condiciones agroclimáticas

La República Dominicana, se encuentra localizada en el hemisferio norte y al sur del Trópico de Cáncer, tiene como límites las coordenadas geográficas: 17°36'-19°58' latitud norte y 68°19'-72°01 longitud oeste', ocupando las dos terceras partes de la porción oriental de la isla, con 48.310,97 km² (sin el territorio marítimo). Limita al norte con el océano Atlántico, que la separa de las islas de Caicos y Turcos; al oeste con el canal de la Mona, que la separa de Puerto Rico; al sur con el mar Caribe o de las Antillas, que la separa de Venezuela; y al oeste la línea fronteriza, que la separa de la República de Haití. Su insularidad y su relativamente pequeña superficie permiten que una fuerte influencia marítima controle los patrones climáticos generales, lo que le hace muy vulnerable, por hallarse en la región subtropical de huracanes. Es uno de los países más vulnerable al cambio climático (PNACC, 2016).

La República Dominicana posee diversidad de climas que favorecen el fomento del cultivo de aguacate. La temperatura media anual en la República Dominicana es de aproximadamente 25°C (77°F) (Máximas promedio 32°C y mínimas 14°C), clasificado como un clima tropical cálido. La humedad relativa es de 83.7 %. Las precipitaciones medias anuales oscilan entre 500-700 mm y 2000-3000 mm (Holdridge, 2000; INDRHI 2006; Onamet 2024). El aguacate se desarrolla favorablemente en áreas con lluvia anual de 1.000 a 1.800 mm, humedad relativa de 80 al 85%, fotoperiodo anual de 980 a 1.200 horas luz y un régimen térmico anual de 1.750 a 3.250 unidades calor acumuladas entre 10 y 30°C (Martich, 2007).

Producción y manejo del cultivo de aguacate

La producción del cultivo de aguacate se ha incrementado y se puede observar el volumen de los diez países (10 tops) con la mayor producción expresadas en millones de toneladas métricas (t) o billones de kilogramos (kg), en los últimos cinco años (2018-2022) encabezado por México y de quinto lugar la República Dominicana (Figura 2). Se puede observar el potencial del país que, aunque es un volumen minúsculo frente a México mantiene un incremento aceptable de la producción ante la creciente demanda internacional. Es interesante destacar que la República Dominicana presenta el mayor rendimiento del cultivo de aguacate a nivel mundial con rendimiento de 19.000 kg/ha, según datos de FAOSTAT (2024). La productividad alcanzada en el país durante los primeros tres años (2001-2003) promedió 12.500 kg/ha (12.5 t/ha) superior a la rentabilidad de México en 2023.

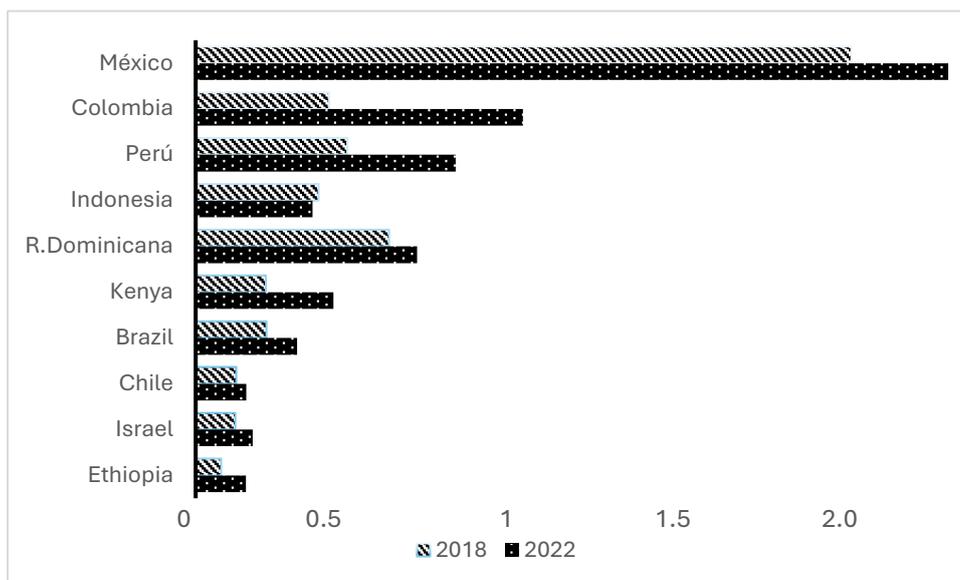


Figura 2. Volumen de producción de los 10 países mayores productores de aguacate

Fuente: Elaboración propia con datos de FAOSTAT 2023.

En el país, el aguacate es el cuarto producto agrícola de exportación de importancia seguido del tabaco, cacao en grano y banano, que han sido los de mayor venta según el Centro de Exportación e Inversión de la República Dominicana (CEI-RD, 2018). Las exportaciones de aguacate se expandieron en 295,77 %, en el período de 2012-2022 (MA-RD, 2024). El país dispone de un incremento de la siembra y del área cosechada para suplir la demanda internacional que le permite optar por un incremento de las exportaciones como estrategias para generar ingresos, sin embargo existen algunos factores que lo limitan e inciden de manera negativa, como los costos de los insumos con relación a la tasa de cambio con otras monedas de países con mayor estabilidad económica, además, el precio del transporte como consecuencias del alza en los combustible (Martich, 2007). En la figura 3, se evidencia el crecimiento de la producción y la recuperación después del año de la pandemia, en el período 2018-2022. La producción cae en 2020 en la pandemia y se recupera en los años siguientes con 737.201.000 kg (737.201 t) para el 2022 (FAOSTAT 2024).

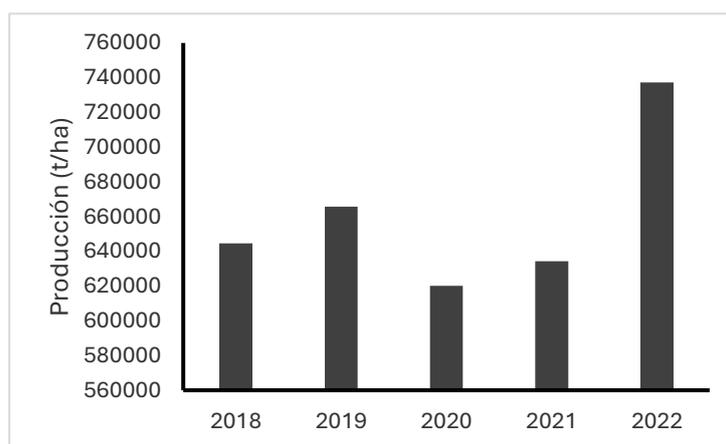


Figura 3. Volumen de producción de aguacate en la República Dominicana en el período 2018-2022

Fuente: Elaboración propia con datos de FAOSTAT 2024.

El manejo del cultivo inicia con la selección de la semilla de aguacate criollo comprados en viveros de la zona, con portainjertos o patrones de plantaciones anteriores asegurando el mejor crecimiento, con el criterio de la adaptabilidad de la planta al lugar. Los productores prefieren las plantas injertadas. Los

arbolitos para la siembra deben presentar hojas con buen color y que la unión del injerto se vea sólida o fuerte libres de plagas, principalmente enfermedades y que hayan sido expuestos a intensidad solar en el campo (CEDAF, 1993; Bisonó y Hernández, 2008). La preparación del terreno se realiza con buen arado, para contribuir con la aireación de la tierra por las limitaciones e inconvenientes del exceso de humedad que provoca asfixia en el cultivo y luego se realiza el ahoyado seguido de la siembra de la nueva plantación. La mejor época de siembra es de otoño a invierno, cuando se presenta la menor insolación y menores temperaturas, lo cual evita la deshidratación de las plantas y las quemaduras. En las zonas donde no se usan sistema de riego se siembran de abril a mayo y de octubre a noviembre para aprovechar los periodos de lluvia para la siembra, hay menor intensidad solar, y temperaturas más bajas (Bisonó y Hernández, 2008). El aguacate exige un suelo franco arenoso, el cual es el ideal, sin lajas en la profundidad de más de 1,25 metro. No se debe sembrar aguacate en suelo de textura pesada y de mucha precipitación o pluviometría. El aguacate necesita oxígeno, no tiene pelos absorbentes por lo que el intercambio catiónico y aniónico es muy alto. Las hojas del aguacate deben recogerse para hacer abono porque pueden formar capas impermeables en el suelo. Un árbol de aguacate (aguacatero) necesita 50 galones de agua diarios (Bisonó y Hernández, 2008). La fertilización se realiza con la fórmula completa 15-15-15 (NPK), dosis recomendadas que van de 10 a 50 45.36 kg/año, también se recomienda una dosis de 6 kg/árbol y con abono orgánico como la gallinaza, bocashi y otros abonos orgánicos. El control de maleza se realiza con desyerbos manuales o con plantas de y uso de herbicidas. Los plaguicidas de mayor uso son la cipermetrina al 5%, aceite mineral al 80 % a la dosis recomendada para el control de algunos insectos como trips, hormigas, taladrador del tallo entre otras plagas insectiles. Además, el uso de metalazil, mancozeb en el control de enfermedades y el uso de acaricida. Las enfermedades más comunes son: la mancha foliar causada por *Cercospora*, canceres del tallo por *Dothiorella*, la tristeza causada por *Phytophthora momi*, *P. citricola* y *P. heveae*. Podredumbre de la raíz por *Rosellinia necatrix*. Podredumbre radicular causada por *Armillaria melle*, el Marchitamiento por *Verticillium Dahliae* y *V.albo-atrum* Reinke y Berth. El quemado del sol (Sun Bloch) causado por un viroide. Las variedades que han mostrado mayor adaptabilidad, producción, calidad y aceptación en el mercado nacional e internacional de los frutos son: Semil 34, Choquete, Lula, Both 7 y 8 y algo menos Hass, muy difundidos en el territorio nacional. Existen otras variedades con mucha demanda como el Popenoe, Beneke (Bening), Dr. Dupuig, Criollo, y la variedad Carla. Los marcos de plantación van de 4 x 4 hasta 10 x 10 para 100 plantas por hectárea.

Tabla 2. Calendario del aguacate en la República Dominicana

Variedad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Hass												
Semil 34												
Carla												
Beneke/Benin												
Choquete												
Pollock												
Popenoe												
Simonds												
Dr. Dupuig												
Príncipe Negro												
Criollo												

El manejo de la postcosecha del fruto de aguacate es una labor deficitaria en el país, lo que conlleva a pérdidas por mal manejo de hasta (20%). La mayoría de los productores no disfruta de una cadena de frío donde se transporten los frutos de formas apropiadas. El ambiente controlado permite la longevidad de la subsistencia de anaquel en el proceso de comercialización (Morales et al., 2000).

Socioeconomía del productor de aguacate y su familia

El productor de aguacate de en promedio tiene una edad de 50 a 57 años lo que indica que la población de productores está envejeciendo. Tienen casa propia y fincas de 3.6 ha, con tamaño familiar promedio de 4 hijos los cuales trabajan en las labores de la finca (Maldonado et al., 2020). El productor aguacatero es alfabetizado y tiene un nivel medio de educación. Los ingresos que reciben son por las ventas de los aguacates y solo en 13 % reciben salario de un trabajo público o privado (Maldonado et al., 2020). Los productores generan empleos directos para dominicanos y extranjeros haitianos que se destacan en las labores de campo en la finca. La mayoría de la mano de obra es haitiana, pero es alta la mano de obra dominicana (Maldonado et al., 2020). El sistema de producción de aguacate aporta el 50% de los ingresos totales por lo cual se deduce que el aguacate tiene una gran importancia socioeconómica y esto refleja el valor que posee este tipo de producción agrícola. La zona de productores (Cambita y Azua) carece totalmente de empresas dedicadas a la agroindustria, por lo cual no se tiene salida a la sobreproducción de aguacates y de rechazo de la exportación (Maldonado et al., 2020). El cultivo de aguacate tiene un gran potencial para aumentar la economía agrícola, la riqueza de los productores y la distribución de ingreso a través de empleos directos e indirectos en las regiones de producción del país.

La mano de obra familiar se sitúa en primer lugar con el 70,8 % divididos entre los hijos con 49,4%, las esposas con una participación de 11,5% y los hermanos con el 9,9% (Martich, 200). Los empleos temporales tienen una participación de 29,2 %. Esto se debe a que alrededor del 87 % de los productores de aguacate son minifundistas (Martich, 2000). En pocas unidades productivas se encuentra una división del trabajo más acorde con un sentido agroempresarial. En relación al personal técnico y de apoyo que dirige los trabajos en las plantaciones presentan marcadas diferencias entre los productores pequeños y medianos, ya que en 83,1 % de los casos, el propietario es quien administra la finca (Morales et al., 2000). Las plantaciones con superficie mayor a 6,3 ha son la que utilizan en el 5,6 % de los casos administradores /contadores. El 2,2 % utilizan de los grandes productores utilizan técnicos agrícolas y el 6,5% utilizan los servicios de capataz (Morales et al., 2000).

Cadena de valor del aguacate

El término de cadenas de valor agroalimentarias se refiere a la manera en que un conjunto de actores se relaciona con un producto específico, para agregar o aumentar su valor a lo largo de los diferentes eslabones, desde su etapa de preproducción, producción hasta el consumo, incluyendo la comercialización, el mercado y la distribución. Una cadena de valor alimentaria sostenible (CVAS) se define como: aquellas explotaciones agrícolas y empresas, así como las posteriores actividades que de forma coordinada añaden valor y a través de las cuales se producen determinadas materias primas agrícolas que se transforman en productos alimentarios concretos y, a su vez, son vendidos a los consumidores finales, de tal forma que resulten rentables en todo momento, proporcionen amplios beneficios para la sociedad y no consuman permanentemente los recursos naturales (FAO, 2015). El análisis cualitativo de una cadena de valor es una descripción de los eslabones y actores presentes en ella, y de los procesos y de las transacciones que ocurren a lo largo de la cadena. El análisis cuantitativo permite la cuantificación y valoración final de un producto generados en cada una de las distintas etapas de la cadena. Los actores de la cadena son proveedores de insumos y servicios, productores, recolectores locales o acopiadores, mayoristas, minoristas, procesadores y consumidores finales. En las funciones que realizan están:

- a) Productores: Son los actores en la cadena de comercialización del aguacate que producen el aguacate y lo abastecen a los siguientes agentes.
- b) Acopiadores o recolectores locales: son actores importantes en la cadena de mercado y recolectan el aguacate de los productores o agricultores y, a su vez, lo venden a minoristas y consumidores.
- c) Mayoristas: son los actores en la cadena de comercialización que vende grandes cantidades de aguacate a minoristas o detallistas, principalmente.
- d) Minoristas: son actores que compran cantidades pequeñas en el aguacate que entregan frutas a los consumidores. Es decir, compran frutas directamente a los productores o recolectores locales y las entregan a los consumidores.

e) Consumidores: Son los últimos actores en la cadena de valor de la fruta. Son individuos u hogares que compran diversas frutas a productores, recolectores y minoristas locales únicamente para su propio consumo. Como últimos actores en la cadena, pueden comprar las frutas a varios actores en la cadena de comercialización. Es decir, directamente a los productores o a otros actores en el canal como recolectores y minoristas locales.

Rentabilidad y viabilidad de la producción del aguacate

La formulación y evaluación de proyectos, constituye una herramienta útil para todos aquellos que decidan implementar una idea de inversión. Para evaluar la viabilidad técnico-económica de la producción comercial de aguacate se utiliza la metodología de proyectos de inversión. Se incorpora el análisis de viabilidad comercial o estudio de mercado, técnico, financiero y económico. Se realiza un análisis de sensibilidad para valorar el riesgo de la inversión en diferentes escenarios y analizar el comportamiento de los indicadores económicos (Peña, 2015). La producción de aguacate es rentable según se deduce del aumento de la superficie sembrada del cultivo en el país, pero existen limitados estudios en el país que indican la rentabilidad de la producción incluido el del aguacate. Peña (2015) indicó en México, la rentabilidad de la producción del aguacate Hass, tanto en certidumbre como en incertidumbre, mediante un análisis de sensibilidad y encontró los siguientes indicadores económicos: un TREMA (tasa de rentabilidad mínima aceptable) de 12,7%, VAN (Valora actual neto) de 15.368,8, TIR (tasa interna de retorno) de 41,9%, RB/C (relación beneficio-costos) de 2,2, RSI (retorno sobre la inversión) de 2,9, ID (Índice de deseabilidad) de 1,9, lo que demuestra su rentabilidad aun en escenarios pesimista. El análisis de riesgo indicó una probabilidad promedio superior al 80% de los indicadores alcanzan su valor base. En las condiciones existentes, los indicadores superan los valores críticos con y sin incertidumbre, lo que indica que el proyecto o cultivo de aguacate es rentable. Montiel-Aguirre et al., (2008), encontró que los valores de relación B/C (beneficio/costo) resultaron positivo con valores de 2,42 y 2,34 para plantaciones de aguacate agroforestal y monocultivo, donde se observa que el sistema agroforestal es más productivo y económicamente más rentable. Estos valores indican que por cada peso invertido se obtiene 2,42 y 2,34, más del doble. Anacona-Mopan et al., (2024) evaluaron las variables claves de productividad y viabilidad en un estudio en Colombia y se encontró que cada estrategia implementada como la de evaluar el comportamiento de la cadena productiva, la accesibilidad al crédito, la asociatividad de los productores y el apoyo gubernamental mejoraron los retornos económicos de los pequeños productores en procura de un desarrollo económico rural. Vasquez et al., (2021), ante la alta demanda del aguacate indicó que se requiere de estudios que demuestren la factibilidad de la producción de aguacate, al no tener identificada la producción y comercialización del aguacate como una alternativa económica y encontraron que el aguacate Hass representa una oportunidad económicamente rentable para pequeños productores en el cantón Atahualpa. El indicador Beneficio/Costo obtenido para el tercer, cuarto, quinto y sexto año de plantado el cultivo alcanza valores de 0,28; 0,56; 0,67 y 1,22, respectivamente. Los costos por kilogramo de aguacate en la finca El Tambo oscilan entre 1,67 y 0,67 dólares del tercero al sexto año de plantado. Para obtener esta información se analizan las empresas agrícolas donde se analiza el flujo de caja, estado de situación financiera, estado de ingresos y pérdidas que permiten análisis verticales y horizontales históricos que brinda información a la toma de decisiones, además de análisis en el largo plazo tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo mediante indicadores económicos para la evaluación de proyectos ex-antes, in situ y ex-pos.

Impacto ambiental de la producción de aguacate

El impacto medio ambiental con respecto al uso del agua subterránea es mínimo, en comparación a la pluviometría anual de la zona. La mayoría de los productores dependen de la lluvia que cae en la zona (no tienen sistema de riego), la cual en ciertos casos esto hace que se obtenga menor producción. Por otro lado, la industria del aguacate (oro verde) es muy censurada por la deforestación, el excesivo consumo de agua subterránea y la contaminación del agua por el uso de plaguicidas y fertilizantes, lo que amenaza a otras especies y al medio ambiente (Maldonado, 2020). Se realizó un análisis con los datos obtenidos a través de la Oficina Nacional de Meteorología y el INDRHI para determinar el clima en la zona de Cambita, así como su precipitación y temperatura anual. Esta cuenta con una temperatura media 25.7°C al año, una amplitud térmica de 16°C y una precipitación anual de 1.754 mm pudiendo

decir que se ha mantenido una pluviometría estable durante este tiempo (Figura 4). Este es un caso en el que el balance hídrico es positivo por la pluviometría de la zona y la demanda de agua del cultivo del aguacate (Maldonado, 2020).

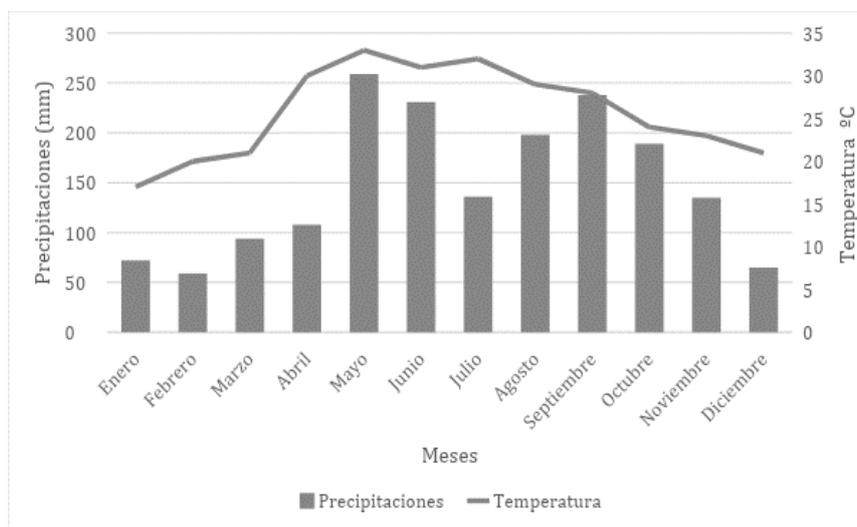


Figura 4. Climograma de Cambita, San Cristóbal.

Conclusión

Las condiciones agroclimáticas favorecen el cultivo de aguacate en la República Dominicana donde las principales regionales de agricultura como son la Regional Norte y la Regional Central son las que tienen mayor potencial agronómico. Se pueden cultivar plantas con el manejo agronómico indicado por los institutos, centros y universidades, para obtener un producto de calidad, sostenible, con buen sabor y protegido de las plagas (animales y enfermedades). Las limitaciones que impiden el desarrollo de los aguacates se encuentran en todas las etapas de la cadena de valor, porque es en la comercialización donde se encuentran cuellos de botella vinculada a la cadena, como también en el manejo postcosecha. Es importante determinar la rentabilidad de la producción mediante una evaluación y análisis que es de mucha utilidad para los productores reales y potenciales del cultivo y determinar el balance hídrico para tomar decisiones en cuanto a lugares donde se puede exceder el consumo de agua y crear externalidades negativas. Se necesita de tecnología en el manejo del cultivo y de la cosecha. La investigación es clave para el crecimiento, tanto de la producción como de la eficiencia en la comercialización. También, planificar la producción con mayor eficiencia y eficacia, de acuerdo a las demandas indicadas por los consumidores, clientes o usuarios. Se puede aumentar la producción y la productividad del aguacate, además de reducir los costos, maximizar el uso de los recursos, la reducción de pérdidas y la mejora de procesos. Los agricultores pueden tener acceso a financiamiento por los resultados que arrojan los ingresos y costos en la rentabilidad de la producción de aguacate.

Bibliografía

Anaona-Mopan, Y.E.; Rubiano-Ovalle, O.; Paz, H.; Luna, A.; Pino, A.F.S.; Chong, M. Public Policy on Agricultural Projects Assessing the Impact: A Hass Avocado Crop System Dynamics Applied Valuation. *Systems* 2024, 12, 210. <https://doi.org/10.3390/systems12060210>.

Bhore, S.J., Salgado-Ochoa, D., Al Houssari, A., López-Zelaya, A., Yang, R., Chen, Z., Siddiqui-Deeyal, S., daSilva-Sens, S.C., Schumann, M., Zhang, Z., Eltantawy, E. 2021. Review The Avocado (*Persea americana* Mill.): A Review and Sustainability Perspectives. [doi:10.20944/preprints202112.0523.v1](https://doi.org/10.20944/preprints202112.0523.v1).

Bisonó, S., y Hernández, J. 2008. Guía tecnológica sobre el cultivo del aguacate. Consejo Nacional de Competitividad. Junta Agroempresarial Dominicana. Santo Domingo, D.N. Recuperado de: <https://unaltreblogdehortos.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/04/guiatecaguacate.pdf>.

Campos, C., Ayala, J., Agustín, J., Espíndola, M. (2012). Propagación del aguacate. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Universidad de Chapingo. México.

Climate Rights International (CRI). (2023). El saldo insostenible de la expansión aguacatera. Deforestación, acaparamiento de agua y violencia detrás de las exportaciones de aguacates de México a EE. UU. y otros mercados, noviembre. Recuperado de: <https://cri.org/reports/unholy-guacamole/resumen-aguacates/>.

De Óleo, B. (2010). Estimación de las pérdidas pre y poscosecha en el cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill), variedad Semil 34, en el municipio de Cambita, San Cristóbal. Recuperado de: <https://repositorio.unphu.edu.do/bitstream/handle/123456789/713/Estimaci%20de%20las%20p%20perdidas%20pre%20y%20poscosecha%20en%20el%20cultivo%20de%20aguacate%20Persea%20americana%20Mill%20variedad%20Semil%2034%20en%20el%20municipio%20de%20Cambita%20San%20Crist%20bal..pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura (IICA). (2017). El cultivo de aguacate: gran potencial para la República Dominicana. Recuperado de: <https://iica.int/es/prensa/noticias/el-cultivo-de-aguacate-gran-potencial-para-la-republica-dominicana>.

Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. La estadística del agua en la República Dominicana. (2006).

Oficina Nacional de Meteorología (Onamet). (2024). Datos estaciones meteorológicas. Recuperado de: <https://estaciones.onamet.gov.do/datos-extremos>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2024). FAOSTAT: Food and agricultural data. Recuperado de: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2024. Major Tropical Fruits Market Review 2023. Rome.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). Principales Frutas Tropicales. Análisis del mercado. Resultados preliminares 2022. Roma.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2015). Desarrollo de cadenas de valor alimentarias sostenibles. Principios rectores. Roma. <http://www.fao.org/3/i3953s/I3953S.pdf>

Gomez Pinales, C. (2010). Caracterización del sistema de producción de aguacate en las cuencas altas de la presa de Sabana Yegua, Azua, República Dominicana. Zamorano, Honduras. Recuperado de: <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/a2824ab5-a24f-4d6a-b469-8e024c7cdf6a/content>

Holdridge, L. R. 2000. Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para Agricultura, San Jose, Costa rica. 216p.

Maldonado, M., Vargas, E. (2020). Diagnóstico situacional del cultivo de aguacates (*Persea americana* Mill) en el Municipio de Cambita, San Cristóbal, República Dominicana. Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD). Santo Domingo, RD.

Montiel-Aguirre, G., Krishnamurthy, L., Vásquez-Alarcón, A., Uribe-Gómez, M. 2008. Opciones agroforestales para productores de aguacate. Terra Latinoam vol.26 no.1 Chapingo ene./mar. 2008.

Ministerio de Agricultura de la República Dominicana (MARD) (2024). Producción de Productos Agrícolas, 2000-2023. Viceministerio de Planificación Sectorial Agropecuaria. Departamento de Economía Agropecuaria y Estadísticas. Recuperado de: <https://agricultura.gob.do/category/estadisticas-agropecuarias/>.

Morales, P., Martich, D., Batista, C., (2007). Principales limitantes para el desarrollo tecnológico del aguacate (*Persea Americana* Mill) en la republica dominicana. Sociedad Caribena de Cultivos Alimenticios (CSCA). 36 Mmemoria Anual

Ohlau M, Huning SC, Spiller A. (2023). Sustainable choices of plant-based ('super') foods: examining the consumption patterns of German consumers on avocados. *Front Nutr.* 2023 Jul 10; 10:1187626. [doi: 10.3389/fnut.2023.1187626](https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1187626). PMID: 37492596; PMCID: PMC10364638.

Plan nacional de adaptación para el cambio climático en la República Dominicana 2015-2030 (PNACC RD). (2016): un país resiliente frente al cambio climático. Recuperado de: <https://adaptacion.cambioclimatico.gob.do/wp-content/uploads/2022/07/Plan-Nacional-de-Adaptacion-para-el-Cambio-Climatico-en-RD-2015-2030-PNACC.pdf>

Rabobank (2023). Reporte de aguacates 2024: Reacomodo gradual en el comercio internacional a medida que la industria crece. Recuperado de: <https://research.rabobank.com/far/en/sectors/fresh-produce/crecimiento-mundial-del-aguacate-lejos-de-terminar.html>.

Secretaría de Estado de Agricultura (SEA). (2007). Estudio de la cadena agroalimentaria de aguacate en la República Dominicana. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), Consejo Nacional de Competitividad (CNC), República Dominicana.

Peña Urquiza, L., Rebollar, S., Callejas Juárez, N. 2015. Análisis de viabilidad económica para la producción comercial de aguacate hass. *Revista Mexicana de Agronegocios*, vol. 36, enero-junio, 2015, pp. 1325-1338. Sociedad Mexicana de Administración Agropecuaria A.C. Torreón, México. Sapag, N., Sapag, R. y Sapag, J. 2014. Preparación y evaluación de proyectos. Sexta edición. Recuperado de: <http://repositorio.uasb.edu.bo:8080/bitstream/54000/1243/1/Sapagproyectos%206ta%20edici%C3%B3n.pdf>

Robben, X. 2018. La cadena de valor de Michael Porter: Identifique y optimice su ventaja competitiva en 50 minutos. *Economía y empresa*.

United State Department of Agricultural (USDA). (2024). Avocado Annual. Foreign Agricultural Service. Global Agricultural Information Network. Voluntary-Public Distribution. FAS Staff. Mexico. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Avocado%20Annual_Mexico%20City_Mexico_MX2024-0018.pdf

Vásquez-Aguilar, Richard Fabricio; García-Hevia, Segress Technical-economic study in avocado cultivation, Atahualpa Canton, El Oro Province *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 30, no. 3, e09, 2021, July-September. Universidad Agraria de La Habana.

World Economic Forum (WEF). (2020). El aguacate: el «oro verde» que provoca estragos ambientales. Recuperado de: <https://es.weforum.org/agenda/2020/03/el-aguacate-el-oro-verde-que-provoca-estragos-ambientales/>

La obtención de dotaciones en el Plan General de Ordenación de Torrevieja a partir de la jurisprudencia del Tribunal Supremo

V.M. Costa¹ y A. Melián²

¹ Avenida del Sur, 38. Molina de Segura, e-mail: vcosta.arquitecto@gmail.com

² Instituto de Investigación e Innovación Agroalimentaria (CIAGRO). Universidad Miguel Hernández, Ctra. de Beniel, km. 3,2 03312 Orihuela (Alicante), e-mail: amparo.melian@umh.es

Resumen

La regulación urbanística en materia de planeamiento, gestión y urbanización, tiene como hito inaugural la Ley de 12 de mayo de 1956, sobre régimen del suelo y ordenación urbana. Con ella quedan asentadas las bases de la estructura legal del Urbanismo español. Posteriores disposiciones vienen a desarrollar con mayor o menor acierto una regulación cuyo contenido tiene una naturaleza transversal, puesto que en definitiva las consecuencias de cualquier acción urbanística alcanzan a la totalidad de las actividades del ser humano como ser relacional.

Con la implantación de las Comunidades Autónomas como sistema de organización territorial del Estado, la regulación en materia urbanística ha quedado reservada competencialmente a las mismas, mientras que al Estado corresponde la determinación de las condiciones básicas que garantizan la igualdad de los ciudadanos en el ejercicio de los derechos y en el cumplimiento de los deberes constitucionales relacionados con el suelo.

En la evolución del Derecho Urbanístico español el concepto de suelo dotacional ha ido variando a partir de la señalada Ley del 56. De ese modo, las sucesivas legislaciones han ido pormenorizando y definiendolo con el fin de que las diferentes figuras de planeamiento pudieran acoger el cumplimiento de las obligaciones legales. No obstante, la evolución del concepto de suelo dotacional y estándar urbanístico desde el punto de vista legal no ha tenido su respuesta en la adaptación de los planeamientos generales. Es por ello que resulta bastante frecuente la confusión producida por una terminología que puede nominar a un equipamiento como privado, o a un suelo dotacional como público, como si los conceptos de equipamiento o dotacional no contuvieran intrínsecamente una naturaleza estrictamente pública. Dicha confusión es profusa en los Planes Generales redactados al amparo del Real Decreto 1346/1976, de 9 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Régimen del Suelo y Ordenación Urbana (TRLOTUP), muchos de los cuales no han sido revisados todavía bajo el concreto significado de dicho concepto. El Plan General de Ordenación Urbana de Torrevieja (PGOU) es representativo de esta situación. Aprobado definitivamente en 1988 y revisado en el 2000, adolece de la concreción terminológica del concepto equipamiento, resultando dicha indefinición todavía más gravosa, si cabe, debido a la no previsión de una gestión urbanística adecuada del suelo urbano. La consecuencia de ambos hechos ha derivado en la obligación de acometer importantes operaciones de expropiación rogada que han permitido de un lado, obtener los suelos dotacionales así señalados por el plan, y de otro, compensar a sus propietarios por la exclusión de dichos terrenos del normal tráfico inmobiliario.

A partir de estos considerandos, este trabajo tiene por objeto determinar cómo han de ser valorados estos suelos dotacionales a partir de la jurisprudencia dictada, en supuestos que han venido a conformar la asentada doctrina del Tribunal Supremo sobre los sistemas generales, todo ello aplicado a dos supuestos concretos de modificación de PGOU.

Palabras clave: dotacional, equipamiento, supremo, valoración, aprovechamiento.

Obtaining endowment in the General Urban Planning of Torre Vieja based on the jurisprudence of the Supreme Court

Abstract

The inaugural milestone in the regulation of urban planning, management and urbanisation was the Law of 12 May 1956 on the land and urban development regime. This law laid the foundations for the legal structure of Spanish town planning. Subsequent provisions have developed, with greater or lesser success, a regulation whose content has a cross-cutting nature, given that the consequences of any urban planning action ultimately affect all human activities as a relational being.

With the implementation of the Autonomous Communities as a system of territorial organisation of the State, the regulation of town planning matters has been reserved to them, leaving to the State the determination of the basic conditions that guarantee equality in the exercise of rights and in the fulfilment of constitutional duties related to land.

In the evolution of Urban Planning Law in our country, the concept of endowment land has been varying since the aforementioned Law of 56. In this way, successive legislations have been detailing and defining this concept so that the different planning figures could include the fulfilment of legal obligations. Notwithstanding the foregoing, the evolution of the concept of urban development land and standard from the legal point of view has not had its response in the adaptation of the general plans; therefore, the confusion produced by terminology that can nominate a facility as private, or a land for development as public, as if the concepts of facility or development land did not intrinsically contain a strictly public nature, is quite frequent. Such confusion is profuse in the General Plans drawn up under Royal Decree 1346/1976, of 9 April, approving the revised text of the Law on Land Regime and Urban Planning, many of which have not yet been revised under the specific meaning of this concept. The General Urban Development Plan of Torre Vieja is representative of this. Finally approved in 1988 and revised in 2000, it lacks the terminological specification of the concept of facilities, which is even more burdensome due to the lack of provision for urban development management of urban land. The consequence of both facts has led to the need to attack important expropriation operations which, on the one hand, make it possible to obtain the land designated by the plan and, on the other, to compensate the owners for the exclusion of this land from the normal real estate traffic.

On the basis of these considerations, the aim of this paper is to determine how to value these endowment lands on the basis of the jurisprudence handed down in cases that have come to shape the settled doctrine of the Supreme Court on general systems.

Keywords: equipment, supreme, valuation, assessment.

Introducción

La regulación urbanística en materia de planeamiento, gestión y urbanización tiene como hito inaugural la Ley de 12 de mayo de 1956 sobre régimen del suelo y ordenación urbana. Con ella quedan asentadas las bases de la estructura legal del Urbanismo español. Posteriores disposiciones vienen a desarrollar con mayor o menor acierto una regulación cuyo contenido tiene una naturaleza transversal, puesto que en definitiva las consecuencias de cualquier acción urbanística alcanzan a la totalidad de las actividades del ser humano como ser relacional.

En la evolución del Derecho Urbanístico español el concepto de suelo dotacional ha ido variando a partir de la señalada Ley del 56 (LS-56). De ese modo, las sucesivas legislaciones han ido pormenorizando y definiéndolo con el fin de que las diferentes figuras de planeamiento pudieran acoger el cumplimiento de las obligaciones legales. No obstante, la evolución del concepto de suelo dotacional y estándar urbanístico desde el punto de vista legal no ha tenido su respuesta en la adaptación de los planeamientos generales. Por ello resulta bastante frecuente la confusión producida por una terminología que puede nominar a un equipamiento como privado, o a un suelo dotacional como público, como si los conceptos de equipamiento o dotacional no contuvieran intrínsecamente una naturaleza estrictamente pública. Dicha confusión es profusa en los Planes Generales redactados al amparo del Real Decreto 1346/1976, de 9 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Régimen del Suelo y Ordenación Urbana (TRLOTUP), muchos de los cuales no han sido

revisados todavía bajo el concreto significado de dicho concepto. El Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) de Torrevieja es representativo de esta situación. Aprobado definitivamente en 1988 y revisado en el 2000, adolece de la concreción terminológica del concepto equipamiento, resultando dicha indefinición todavía más gravosa, si cabe, debido a la no previsión de una gestión urbanística adecuada del suelo urbano. La consecuencia de ambos hechos ha derivado en la obligación de acometer importantes operaciones de expropiación rogada que han permitido de un lado, obtener los suelos dotacionales así señalados por el plan, y de otro, compensar a sus propietarios por la exclusión de dichos terrenos del normal tráfico inmobiliario.

A partir de estos considerandos este trabajo tiene por objeto determinar cómo han de ser valorados estos suelos dotacionales a partir de la jurisprudencia dictada en supuestos que han venido a conformar la asentada doctrina del Tribunal Supremo sobre los sistemas generales, todo ello aplicado a dos supuestos concretos de modificación de PGOU.

La exposición de motivos de la LS-56 señala el hito inicial del moderno Derecho Urbanístico en España. En ella se expresa la necesidad de formar una “...opinión celosa del desarrollo de las ciudades”, puesto que la inexistencia de la misma en el momento de su aprobación “...ha motivado la falta de previsión en lo que respecta a la formación de reservas de suelo...”. Por tanto, se puede afirmar que la concreción normativa del concepto de reserva urbanística sistemática de suelo destinado al uso común de la comunidad tiene su origen normativo en dicha disposición legal.

Siguiendo con el análisis de dicha exposición de motivos como base de un esquema que sigue materialmente vigente, en ella se identifican numerosos problemas relativos a la ordenación del suelo como activo común de los ciudadanos. De forma contundente y casi profética en relación a las reservas de suelo para equipamientos y dotaciones públicas, la LS-56 señala en su exposición de motivos: “*La imposibilidad de disponer de terrenos amplios para destinarlos a espacios libres en interés del embellecimiento y de las condiciones sanitarias de los núcleos urbanos*”.

Esta declaración se contiene en el vademécum urbanístico sobre el que se va a construir el desarrollo urbanístico de las ciudades. El resultado de su aplicación condicionará el devenir de la ciudad, por lo que conviene detenerse en el análisis de dicho instrumento de gestión, con el fin de concretar la aplicación al caso de estudio objeto del presente trabajo. El principio estructural que es apelado se centra en la justa distribución de beneficios y cargas derivados del planeamiento. Se trata de un principio reiterado en las sucesivas legislaciones urbanísticas, tanto estatales como autonómicas. Se trata por tanto de un principio básico en materia de gestión urbanística.

Por último, y con el fin propio de justificar la vigente necesidad de “... *disponer de terrenos amplios para destinarlos a espacios libres en interés del embellecimiento y de las condiciones sanitarias de los núcleos urbanos...*” tal y como expresaba la derogada LS-56, el presente trabajo sirve de excusa para efectuar una propuesta justificada de reforma urbana en los términos legales vigentes, a través de los pronunciamientos del alto tribunal, y referida a lo que en el PGOU se delimita como Zona 1 “Casco Actual”.

El TRLOTUP establece varios mecanismos para la gestión de la obtención de los suelos dotacionales. Si bien la aplicación de uno concreto no es excluyente respecto del resto, lo cierto es que se deberá estar a lo dispuesto por la norma jurídica concreta que lo determine, en su caso. En ausencia de dicha determinación, la Administración podrá decidir el empleo de uno u otro en función, entre otros condicionantes, de su propia capacidad económica y de gestión. A continuación, se procede a una breve revisión conceptual de cada uno de ellos.

- Transferencias de aprovechamiento urbanístico
- Áreas de reparto uniparcelarias
- Sistema de expropiación
- Expropiación rogada
- Ocupación directa

- Adquisición mediante reservas de aprovechamiento
- Permutas

Las técnicas con las que pueden ser obtenidos los suelos dotacionales relacionadas anteriormente presentan como elemento común la necesidad de valorar los derechos afectados, según los criterios determinados con carácter general. En este sentido, el marco constitucional está contenido en el artículo 149 de la Constitución Española (CE). El desarrollo y concreción de esta competencia lo realiza la Sentencia del Tribunal Constitucional (STC) 61/1997, de 20 de marzo, por la que se interpuso recurso de inconstitucionalidad contra la Ley 8/1990, de 25 de julio, sobre Reforma del Régimen Urbanístico y Valoraciones del Suelo, impugnando dicha Ley en su globalidad por vicio de incompetencia. En consecuencia, las sucesivas leyes promulgadas por el Estado han atendido a dicho pronunciamiento acotando su contenido a las competencias por ella delimitadas. Comprenden, entre otras competencias, las siguientes básicas en relación a la materia del presente estudio siempre de acuerdo con el TRLS-15:

1. Estatuto jurídico de la propiedad del suelo (arts. 11 a 17).
2. Valoraciones (arts. 34 a 41).

Como consecuencia del alto grado de desarrollo material del PGOU se puede comprobar si la realidad física del mismo es concordante con las hipótesis con la que fue configurado, limitada dicha concordancia al ámbito material del objeto de estudio, esto es, el Área de Reparto 1: Casco Actual. De su examen se podrá concluir, en base a los propios criterios actuales de calidad urbana, si los estándares urbanos obtienen su respuesta de suficiencia o si, por el contrario, resultan insuficientes y, en consecuencia, será necesario acometer operaciones de reforma interior que permitan alcanzar estos objetivos de calidad urbana, especialmente en lo que a espacios libres se refiere. Esta operación resulta fundamental para el planteamiento de un nuevo instrumento de planeamiento general si fuera necesario. O si lo que realmente resulta útil a la comunidad consiste en el ataque a diversas operaciones de reforma interior, que permiten crear nuevos espacios libres, para el aseguramiento de que la población tiene acceso a las condiciones adecuadas de bienestar.

Se propone en este trabajo dos supuestos sobre los que verificar la bondad de los estándares actuales de calidad urbana, y sobre los que se realizará el correspondiente análisis para conocer su procedencia y su viabilidad económica (mediante la propia fórmula de valorar urbanísticamente los derechos que son afectados en dichas operaciones). El primero de ellos constituye en sí mismo una modificación puntual de Plan General de Ordenación Urbana de Torreveja, y el segundo supuesto consiste en la elaboración del Plan Especial de la Costa en su sub-área denominada calas norte.

Materiales y Métodos

Para el presente trabajo se ha empleado los datos disponibles en la Sede Electrónica del Catastro a fecha 10 de abril de 2023, así como la Jurisprudencia dictada por el Tribunal Supremo hasta la fecha indicada (2024). A continuación se indican los vínculos de consulta de cada uno de ellos:

- Catastro: <https://www.sedecatastro.gob.es/>
- Cartografía disponible en la Generalitat Valenciana: <https://visor.gva.es/visor/>
- Dominio Público Marítimo Terrestre: <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/costas-medio-marino.html>
- Plan General de Ordenación Urbana de Torreveja: <https://torreveja.es/es/urbanismo/texto-completo-pgou>,
y <https://urbatorre.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=03a7c5d126e948ee93e9c2496fb15f09>
- Plan General de Ordenación Urbana de Torreveja en formato vectorial elaborado por la Sra. Arquitecta Municipal D^a Alicia Martín Álvarez.

Principalmente, el software empleado para el análisis de datos ha sido Quantum Gis (QGIS), versión 3.32.2-Lima (English), para el manipulado de tablas Libre Office “Calc_Spreadsheet”, para el tratamiento de imágenes el programa denominado “GIMP” y para la confección del presente documento Libre Office “Writer Document”. Todos ellos comparten una misma característica, son gratuitos y utilizables sobre cualquier sistema operativo.

Los supuestos propuestos van a ser objeto de análisis según la siguiente metodología:

- 1) Justificación de la necesidad de su proposición.
- 2) Encaje jurisprudencial para la determinación del valor.
- 3) Valoración urbanística de los derechos afectados.

a) Supuesto 1: Modificación del Plan General de Ordenación Urbana.

Se trata de determinar el grado de cumplimiento de los estándares dotacionales, para justificar, en caso negativo, la creación de nuevos que atenúen el déficit. Se emplea como herramienta fundamental el Sistema de Información Geográfica denominado QGIS, y como datos, los obtenidos a partir de las capas que pueden ser descargadas del Catastro, de la Generalitat Valenciana, del Ministerio de Transición Ecológica, así como las de elaboración propia a partir del PGOU.

Mediante los diferentes geoprocursos que incorpora el software QGIS se obtienen los datos de población y superficie construida a los que aplicar los estándares legales, cuyos resultados servirán de comparación frente a los previstos en el vigente PGOU para la citada área de reparto 1, según su consolidación actual por la edificación.

Por tanto, la mutación del uso urbanístico de una manzana concreta en el término Municipal de Torrevieja, contribuirá a hacer ciudad, puesto que han quedado verificados aquellos rasgos con los que la doctrina del Tribunal Supremo (TS) ha ido definiendo dicho concepto, resultando que sobre el suelo objeto el PGOU no ha determinado edificabilidad alguna, limitándose exclusivamente a concretar el uso. En tal caso, procede establecer dicho parámetro determinando la edificabilidad media del ámbito espacial homogéneo, tal y como señala el artículo 37 del TRLS-15, esto es:

“Si los terrenos no tienen asignada edificabilidad o uso privado por la ordenación urbanística, se les atribuirá la edificabilidad media y el uso mayoritario en el ámbito espacial homogéneo en que por usos y tipologías la ordenación urbanística los haya incluido”.

El proceso de cálculo interactivo se muestra en las figuras 1 a 4 donde se avanza desde la determinación inicial de los centroides de las manzanas objeto de estudio y del punto medio, hasta la aplicación del fondo máximo edificable sobre el PNOA y PGOU, obtención de alineaciones según las alturas asignadas y obtención de la edificación media a partir de la extracción de datos de las capas QGIS.

A. Determinación de los centroides de las manzanas y del punto medio.



Figura 1. Centroides

B. Delimitación del ámbito espacial homogéneo estricto y de cálculo

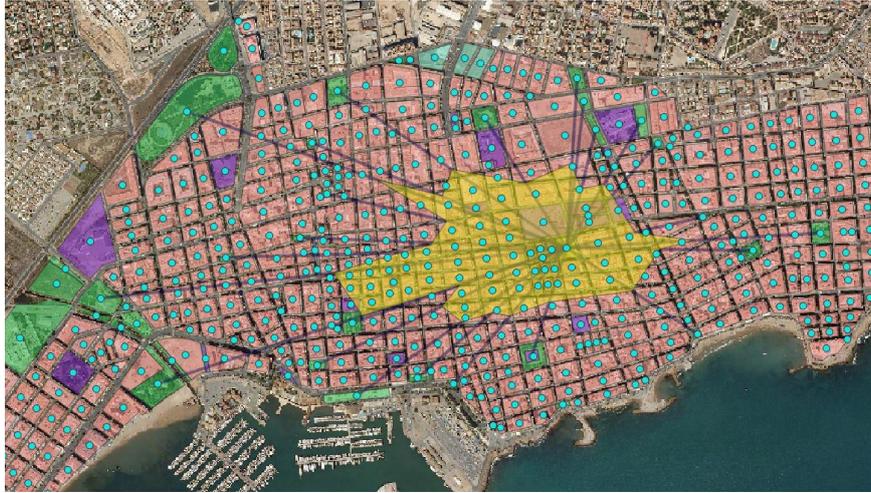


Figura 2. Ámbito espacial homogéneo estricto.

C. Aplicación del fondo máximo edificable



Figura 3. Volúmenes edificables sobre PNOA.

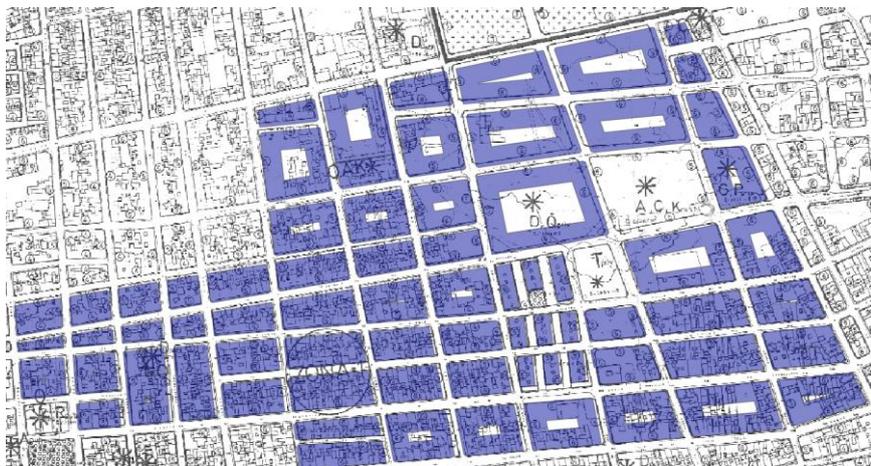


Figura 4. Volúmenes edificables sobre PGOU.

D. Obtención de la edificabilidad media a partir de la extracción de datos de las capas de QGIS.

A partir del tipo de suelo, ubicación, superficie bruta para cada calificación, aprovechamiento, relación techos/altura, longitud de alineaciones según alturas PGOU, se determina la edificabilidad media (tabla 1).

Tabla 1. Superficie de manzanas edificables y longitud de alineaciones por altura.

SUPERFICIE POR MANZANA EN PLANTA BAJA (m2)	SUPERFICIE POR MANZANA EN PLANTA PRIMERA Y SEGUNDA (CON VUELOS) (m2)	SUPERFICIE POR PATIO (m2)	PERIMETRO POR MANZANA (m)	ALINEACIÓN CON 4 PLANTAS (m)	ALINEACIÓN CON 5 PLANTAS (m)	ALINEACIÓN CON 6 PLANTAS (m)
632,17	765,85	7,91	106,69	54,48		63,60
634,04	767,84	5,14	106,79	42,99		67,26
634,06	767,83	37,24	106,79	44,03		75,13
634,59	768,31	1.034,26	106,77	36,47		80,37
634,61	768,49	326,81	106,85	66,81		65,22
636,33	770,38	322,63	107,00	29,81		136,94
636,78	770,88	29,12	107,04	112,84		56,49
651,03	780,29	254,44	102,94	67,87		53,89
658,80	822,31	529,34	131,55	66,83		109,16
798,39	955,74	228,22	126,88	65,72		17,69
952,79	1.129,48	201,50	142,57	68,07		64,77
957,14	1.133,81	295,20	142,57	70,66		68,61
978,96	1.135,48	424,83	126,14	53,73		76,26
1.019,12	1.189,62	4.420,49	137,53	47,19		107,62
1.108,38	1.270,28	1.249,90	131,06	45,77		106,44
1.282,93	1.458,96	307,80	142,30	46,62		65,02
1.544,15	1.741,56	1.468,00	160,37	29,10		67,81
1.611,23	1.832,06	990,18	180,08	42,47		39,90
1.661,69	1.861,12	1.495,03	162,18	65,11		35,10
1.674,52	1.874,02	426,67	162,33	17,74		31,79
1.909,55	2.128,49	830,56	178,07	17,79		43,24
2.129,42	2.417,83	149,64	236,65	17,74		33,27
2.186,55	2.434,18	5,94	202,46	17,84		6,67
2.203,62	2.430,85	48,54	185,51	50,59		68,48
2.289,19	2.535,18	576,58	201,09	34,77		96,57
2.327,66	2.327,30	246,81	198,41	37,14		93,23
2.335,71	2.584,52	1.514,19	203,46	39,22		65,24
2.370,73	2.606,52		192,62	31,86		92,90
2.416,13	2.656,96		197,02	35,63		101,49
2.418,00	2.668,79		205,33	39,99		67,98
2.434,89	2.686,35		205,90	38,84		69,23
2.485,20	2.741,84		209,79	31,12		67,25
2.496,55	2.747,76		205,54	16,42		58,85
2.645,56	2.905,79		213,05	98,25		69,43
2.745,95	3.010,62		216,57	126,97		17,87
2.810,89	3.123,97		256,72	27,69		76,58
2.813,95	3.081,36		218,67	56,27		70,09
2.815,18	3.096,73		230,83	64,45		69,84
2.835,08	3.104,70		220,65	68,03		73,81
2.966,21	2.965,75		227,91	66,64		81,61
3.192,10	3.474,35		231,02			102,76
3.278,47	3.585,67		252,04			108,78
3.317,89	3.618,55		246,80			103,43
3.427,21	3.721,91		241,64			86,67
3.533,50	3.840,45		252,06			84,53
3.594,10	3.884,00		238,08			89,04
3.635,82	3.929,15		240,54			55,19
3.688,90	4.000,04		255,57			55,00
3.757,67	4.054,95		244,04			65,91
3.761,42	4.089,56		269,34			102,98
3.789,39	4.091,57		247,88			314,93
3.866,15	4.169,62		248,89			297,59
3.981,41	4.288,16		251,92			27,55
4.209,88	4.527,57		261,14			32,00
4.271,60	4.604,05		273,55			32,76
4.422,85	4.784,26		297,78			40,99
4.475,57	4.474,88		272,01			46,98
4.485,62	4.813,04		269,30			292,85
4.496,87	4.819,93		265,56			60,64
4.675,58	5.049,07		306,96			118,35
4.748,11	5.081,66		274,60			220,06
5.273,51	5.656,24		314,93			
5.810,14	6.177,27		302,34			
6.174,69	6.576,98		331,62			
6.803,78	7.227,11		349,68			
7.267,67	7.700,93		358,03			
7.419,66	7.848,44		354,33			
7.617,13	8.057,86		364,30			
12.430,92	12.972,76		448,95			
210.385,31	227.939,73	17.426,97	15.067,58	1.991,56	8.024,47	5.051,55

Fuente: Generalitat Valenciana (<https://visor.gva.es/visor/>), Ministerio de Hacienda (<https://www.sedecatastro.gob.es/>)

b) Supuesto 2: Plan Especial de la Costa.

Se presenta en este supuesto la necesidad de ordenar y gestionar un suelo con una protección que emerge desde la aprobación definitiva del PGOU en el año 1988.

Así mismo, la propia cartografía del PGOU concreta el ámbito del siguiente modo:



Figura 5. Ámbito sobre cartografía del PGOU 1_2000

Asentada la génesis del suelo resulta adecuado entender las consecuencias de la misma, por cuanto al tratarse de un suelo con un alto valor desde el punto de vista paisajístico y medioambiental, que justifica su especial protección y preservación se considera que sirve a la ciudad, pero el mismo no crea ciudad, aunque sí fuera reconocido en el planeamiento y sirviera para cumplir sus estándares (Robles Fernández, 2014).

Cuando el suelo no urbanizable está sometido a un régimen de especial protección -algo que destacadamente ocurre con las áreas tuteladas por su valor ecológico o paisajístico- no opera la doctrina jurisprudencial que exige que el suelo no urbanizable expropiado para la ejecución de sistemas generales que crean ciudad sea valorado como si de suelo urbanizable se tratase. La razón es que ese suelo no podría en ningún caso ser objeto de desarrollo urbanístico, por lo que no concurre el fundamento último de la mencionada doctrina jurisprudencial, a saber: evitar la disparidad de trato de los expropiados con respecto a los propietarios de terrenos próximos que verán revalorizada su propiedad precisamente como consecuencia de la ejecución del sistema general (Huerta Garicano, 2014).

El Suelo No Urbanizable que nos ocupa sirve a la ciudad pero no es ciudad, no va a ser construido. Justo al contrario, dispone de un régimen transitorio para la edificación preexistente que la sitúa bajo el régimen de fuera de ordenación destinado a la extinción y erradicación de la misma. Por ello, no es de aplicación la doctrina de los Sistemas Generales (Trillo Alonso, 2016) puesto que la futura adquisición del espacio libre “...no tiene por finalidad dotar de un elemento dotacional nuevo al ámbito urbano del municipio, sino de proteger ese entorno, preservándolo de una futura construcción.”.

Resultados y Discusión

En relación al supuesto 1 “Modificación Puntual del Plan General de Ordenación Urbana”, la aplicación de la doctrina del TS para esta nueva dotación considera que este equipamiento resulta parte de la ciudad, esto es, contribuye a “hacer ciudad” puesto que:

1. Se encuentra situada en el centro del suelo urbano más característico de la ciudad, formando parte de su trama urbana.
2. Ostenta una dimensión urbana y coadyuva a la articulación del núcleo ciudadano de la ciudad.
3. Formará parte de las dotaciones que configuran el ámbito urbano de la propia ciudad.
4. Su existencia es consecuencia de la ejecución del plan urbanístico.
5. Tiene un estricto sentido urbanístico, deviniendo estrictamente de una modificación puntual del PGOU.
6. Tiene una transcendencia directa y primordial en la propia ciudad, constituyéndose como un instrumento de desarrollo de ésta.

7. Existe una adecuada relación entre la calidad de los servicios urbanísticos del suelo en cuestión y su dimensión, de tal modo que dichos servicios son los propios de su tamaño.
8. Constituye una expropiación con estricto sentido urbanístico.
9. El Ayuntamiento de Torreveja ostenta y aplica la potestad expropiatoria.

Por tanto, la aplicación de la doctrina establecida por el TS, en relación a la asignación de aprovechamiento arroja una edificabilidad media del ámbito espacial homogéneo definido de 5,36 m²t/m²s (metros techo/metros suelo) para el municipio (tabla 2). Este resultado aplicado a la superficie de la manzana cuya mutación se pretende a espacio libre derivada de los cálculos efectuados en la tabla 1, supone una superficie a expropiar de 3.367,00 m² y produce una edificabilidad total de uso residencial de 18.047,12 m²t.

Tabla 2. Edificabilidad media del ámbito espacial homogéneo.

CÁLCULO DE LA EDIFICABILIDAD MEDIA DEL ÁMBITO ESPACIAL HOMOGÉNEO			
	4 PLANTAS	5 PLANTAS	6 PLANTAS
EDIFICABILIDAD (m2t)	653.170,84	351.261,55	122.776,70
EDIFICABILIDAD TOTAL (m2t)	1.127.209,09		
SUPERFICIE NETA EDIFICABLE (m2)	210.385,31		
EDIFICABILIDAD MEDIA (m2t/m2s)	5,36		

En relación al supuesto 2 “Plan Especial de Protección de la Costa”, se deduce que cualquier pretensión de considerar el suelo que nos ocupa como suelo urbanizado no puede prosperar en base a los destinos que le tiene reservado el PGOU, puesto que el espacio libre lo es en base a sus propias características y valores. Este suelo no podría ser objeto de desarrollo urbanístico, por lo que en caso alguno formaría parte de su trama, así como tampoco podría constituir un Sistema General incrustado en la misma.

Determinado que nos encontramos ante un suelo en situación básica de suelo rural, el artículo 36 del TRLS-15 determina que se tasará “...mediante la capitalización de la renta anual real o potencial, la que sea superior, de la explotación según su estado en el momento al que deba entenderse referida la valoración. La renta potencial se calculará atendiendo al rendimiento del uso, disfrute o explotación de que sean susceptibles los terrenos conforme a la legislación que les sea aplicable, utilizando los medios técnicos normales para su producción. Incluirá, en su caso, como ingresos las subvenciones que, con carácter estable, se otorguen a los cultivos y aprovechamientos considerados para su cálculo y se descontarán los costes necesarios para la explotación considerada.

El valor del suelo rural así obtenido podrá ser corregido al alza en función de factores objetivos de localización, como la accesibilidad a núcleos de población o a centros de actividad económica o la ubicación en entornos de singular valor ambiental o paisajístico, cuya aplicación y ponderación habrá de ser justificada en el correspondiente expediente de valoración, todo ello en los términos que reglamentariamente se establezcan.”.

Conclusiones

Como resultado de los análisis anteriores se obtienen aquellas conclusiones que sirven para valorar la viabilidad de los futuros instrumentos de planificación urbanística en lo que a la obtención de terrenos dotacionales se refiere. Las operaciones de planificación urbanística deben respetar el principio constitucional de igualdad de trato que opera mediante la equidistribución de cargas y beneficios en la actuación urbanística de las Administraciones Públicas.

La observancia del principio de igualdad conlleva una excepción a la aplicación del artículo 35 del TRLS, según el cual el suelo se tasarán con arreglo a su situación, fundamentada la misma sobre la doctrina de los Sistemas Generales consolidada a través de la jurisprudencia del TS.

A partir de dicha doctrina los suelos destinados a dotación pública, a los solos efectos de su valoración, no atenderán a su situación básica, sino al carácter intrínseco que los definen, derivando ello en una atención y análisis concreto de cada caso que es objeto, sin que el propio estudio de la doctrina de los Sistemas Generales pueda arrojar una sistematización de dicho concepto.

Cuando los suelos dotacionales carecen de edificabilidad asignada, se debe delimitar un ámbito espacial homogéneo sobre el que calcular la edificabilidad media, a través de la aplicación de coeficientes de homogeneización, si ello fuera necesario, por la existencia en el mismo de usos diferentes. La edificabilidad media a calcular no tendrá en cuenta los suelos públicos así calificados en el citado ámbito espacial homogéneo.

Bibliografía

Constitución Española. Boletín Oficial del Estado, 29 de diciembre de 1978, núm. 311

Dirección General de Catastro (sf). Ministerio de Hacienda. <https://www.sedecatastro.gob.es/> Consultado el 10 de julio de 2024.

Generalitat Valencia. Cartografía. <https://visor.gva.es/visor/> Consultado el 6 de julio de 2024

Huerta Garicano, I. M. (2014). STS 4692/2014 (Sala de lo Contencioso, Sección 6a), de 21 de noviembre de 2015. 2011, 1–7.

Ley de 12 de mayo de 1956 sobre Régimen del Suelo y Ordenación Urbana. Boletín Oficial del Estado, núm. 135, de 14 de mayo de 1956

Ley 8/1990, de 25 de julio, sobre Reforma del Régimen Urbanístico y Valoraciones del Suelo. Boletín Oficial del Estado, núm. 179, de 27 de julio de 1990

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Dominio público marítimo terrestre. <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-ysig/ide/descargas/costas-medio-marino.html>. Consultado el 6 de julio de 2024

Plan General de Ordenación Urbana de Torreveja. Ayuntamiento de Torreveja, <https://torreveja.es/es/urbanismo/texto-completo-pgou>.
<https://urbatorre.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=03a7c5d126e948ee93e9c2496fb15f09>.
Consultado el 14 de julio de 2024

Real Decreto 1346/1976, de 9 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Régimen del Suelo y Ordenación Urbana. Boletín Oficial del Estado, núm. 144, de 16 de junio de 1976

Robles Fernández, M. (2014). STS 2592/2014 (Sala de lo Contencioso, Sección 6a), de 27 de junio de 2014. 1–6.

Trillo Alonso, J. C. (2016). STS 4477/2016 (Sala de lo Contencioso, Sección 5), de 11 de octubre de 2016. 1–6.

Análisis de la demanda social de la marca Territorio Sierra Espuña (Región de Murcia)

M. I. Rodríguez-Valero¹, G. Martínez-García², J.A. Albaladejo-García² y J.M. Martínez-Paz²

¹ Departamento de Economía Aplicada, Universidad de Murcia, Campus de Espinardo 30100, Murcia, España.
mariaisabel.rodriguez1@um.es

² Departamento de Economía Aplicada, Universidad de Murcia, Campus de Espinardo 30100, Murcia, España.
gonzalo.martinezg@um.es , joseantonio.albaladejo@um.es , jmpaz@um.es

Resumen

El declive económico de algunas zonas rurales está llevando a que en las mismas se desarrollen estrategias para poner en valor actividades económicas propias de estas zonas, como la agricultura o la ganadería, y promover así la rentabilidad de pequeñas producciones agrícolas y artesanas. Es el caso del Parque Regional de Sierra Espuña, Espacio Natural Protegido ubicado en tres municipios (Alhama de Murcia, Mula y Totana) de la Región de Murcia y cuya área de influencia socioeconómica abarca a otros tres municipios próximos (Aledo, Librilla y Pliego) a raíz de la adhesión a la marca Territorio Sierra Espuña (TSE). Esta marca busca potenciar el consumo de productos locales, haciendo visible el compromiso con el desarrollo sostenible y la calidad de todos los productos que se comercializan con este distintivo, entre los que destacan la miel y el aceite. El objetivo de este trabajo es estudiar la demanda social de la marca TSE. Para ello se ha realizado una encuesta a la población de la Región de Murcia, que incluye un ejercicio de valoración contingente de la miel, ya que es uno de los productos más representativos de esta marca. Los resultados de la encuesta demuestran la alta demanda social por la miel TSE, ya que el 64 % de encuestados estaría dispuesto a pagar un precio superior, con un sobrecoste medio de 3 €/Kg respecto al producto convencional. Estos resultados muestran como la marca TSE incrementa el valor de la miel y proporcionan una base empírica para la planificación de acciones que integren y promuevan estrategias de producción y comercialización con este distintivo, en aras de un desarrollo rural desde el territorio y por el territorio, a la vez que se satisfacen las demandas sociales de productos de calidad.

Palabras clave: Desarrollo sostenible, Disposición a pagar, Estrategias de desarrollo rural, Parque Regional, Valoración contingente.

Social demand analysis of the Territorio Sierra Espuña brand (Region of Murcia)

Abstract

The economic decline of some rural areas is leading to the development of strategies to enhance the value of economic activities typical of these areas, such as agriculture and livestock farming, and thus promote the profitability of small-scale agricultural and artisan production. This is the case of the Sierra Espuña Regional Park, a Protected Natural Area located in three municipalities (Alhama de Murcia, Mula and Totana) in the Region of Murcia and whose area of socio-economic influence includes three other nearby municipalities (Aledo, Librilla and Pliego) because of joining the Territorio Sierra Espuña (TSE) brand. This brand seeks to promote the consumption of local products, making visible the commitment to sustainable development and the quality of all products marketed under this label, including honey and oil. The aim of this work is to study the social demand for the TSE brand. To this end, a survey was carried out among the population of the Region of Murcia, which included a contingent valuation of honey, as it is one of the most representative products of this brand. The results of the survey show the high social demand for TSE honey, as 64% of those surveyed would be willing to pay a higher price, with an average extra cost of 3 €/kg compared to the conventional product. These results show how the TSE brand increases the value of honey and provide an empirical basis for planning actions that integrate and promote production and marketing strategies with this label, in the interests of rural development from and for the territory, while meeting social demands for quality products.

Keywords: Sustainable development, Willingness to pay, Rural development strategies, Regional Park, Contingent valuation.

Introducción

Durante las últimas décadas las zonas rurales vienen experimentando un progresivo despoblamiento debido a la falta de trabajo y expectativas de futuro que obliga a sus habitantes a trasladarse a las zonas urbanas; este fenómeno responde a una compleja interacción de factores económicos, sociales y ambientales que hacen cada vez más difícil la vida en estas áreas (Masot y Gascón, 2021).

Los factores económicos desempeñan un papel crucial en este proceso, ya que la disminución de ingresos de los productores locales, la pérdida de competitividad de las actividades tradicionales, y la escasez de oportunidades laborales fuera del sector primario, hacen que la vida en el medio rural sea cada vez menos sostenible. Las explotaciones agrícolas y ganaderas de estas áreas son incapaces de competir en un mercado globalizado que favorece la producción a gran escala y con bajos costos de producción. Como resultado, muchos habitantes se ven obligados a buscar mejores condiciones de vida en zonas urbanas, donde la oferta laboral es más diversificada y las expectativas de futuro más prometedoras (Merino y Prats, 2020). Además de los problemas económicos, las zonas rurales deben hacer frente a desafíos sociales profundos, siendo uno de los más importantes el envejecimiento de la población. La migración de los jóvenes hacia las ciudades en busca de mejores oportunidades laborales y educativas ha dejado atrás una población mayoritariamente envejecida, con una capacidad limitada para mantener la dinámica social y económica del área. La despoblación de las zonas rurales tiene también un impacto ambiental negativo, ya que el abandono de las tierras de cultivo puede provocar una degradación del medio físico que dé lugar a procesos de erosión, pérdida de biodiversidad y alteraciones en los ciclos hidrológicos (Colino et al., 2022).

Para dar solución al declive que sufren las áreas rurales se están llevando a cabo estrategias que apuestan por un desarrollo integral del territorio y que tienen como pilar fundamental la participación de las comunidades locales (Soler y San Martín, 2020). Lo que se busca a través de estas iniciativas es poner en valor actividades económicas propias de estas zonas, como la agricultura o la ganadería, y promover así pequeñas producciones agrícolas y artesanas. Una de estas estrategias son los productos de marca territorio, que se han convertido en una herramienta clave para la promoción de la economía rural y la protección del medioambiente. Estos productos se distinguen por su fuerte vinculación con la identidad cultural y geográfica de una región específica y son un reflejo de las prácticas tradicionales y de los recursos naturales locales. Es el caso del Parque Regional de Sierra Espuña, ubicado en tres municipios (Alhama de Murcia, Mula y Totana) de la Región de Murcia y cuya área de influencia socioeconómica abarca a otros tres municipios próximos (Aledo, Librilla y Pliego) a raíz de la adhesión a la marca Territorio Sierra Espuña (TSE). Esta marca busca potenciar el consumo de productos locales, haciendo visible el compromiso con el desarrollo sostenible y la calidad de todos los productos que se comercializan con este distintivo, entre los que destacan la miel y el aceite. Además de productos con la marca TSE también se pueden encontrar servicios y actividades que cuentan con este distintivo como alojamientos turísticos o rutas en bici por el espacio natural, lo que garantiza que son actividades/servicios que se llevan a cabo de forma respetuosa con el medioambiente. A través de la producción y comercialización de estos bienes y servicios se impulsa la economía local, pues permite generar empleo, apoyar a los pequeños productores y fomentar un desarrollo económico que respeta las características y limitaciones del entorno natural.

El objetivo de este trabajo es estudiar la demanda social de la marca TSE, obteniendo, entre otros, información sobre los factores que explican dicha demanda. Para ello se ha realizado una encuesta a la población de la Región de Murcia, que incluye un ejercicio de valoración contingente de la miel, ya que es uno de los productos más representativos de esta marca.

Materiales y Métodos

Para el estudio de la demanda social de la marca Territorio Sierra Espuña (TSE) se ha realizado una encuesta a la población de la Región de Murcia mayor de 18 años, en la que se ha incluido un ejercicio de valoración contingente de la miel. El método de valoración contingente es un método de valoración económica que permite estimar el valor de activos ambientales que carecen de mercado real. Este método simula un mercado hipotético y directo que se aplica por medio de encuestas, donde la oferta viene representada por el entrevistador y la demanda por la persona entrevistada, y se basa en la información que revela la sociedad cuando se le pregunta por la valoración (disposición máxima a pagar) de un bien ambiental (Martínez-Paz et al., 2021), en este caso de la miel marca TSE.

Las encuestas se realizaron durante los meses de marzo y abril de 2022 a una muestra de los 546.000 hogares de la Región de Murcia que forman la población objetivo. El cuestionario constaba de 25 preguntas distribuidas en 3 bloques:

Bloque I: valoración de la marca TSE. Las preguntas de este bloque están encaminadas a determinar la demanda social por la miel de la marca Territorio Sierra Espuña y cuantificar la disposición a pagar de los encuestados por este producto.

Bloque II: grado de concienciación ambiental. Este bloque se desarrolla en base a los trabajos de Maloney et al. (1975) con el fin de conocer el compromiso ecológico del encuestado en sus tres facetas (afectivo, verbal y real), utilizando para ello escalas Likert (de 1 a 5).

Bloque III: información socioeconómica. Las preguntas de este bloque permiten caracterizar a la persona encuestada en función de sus características socioeconómicas. Se preguntan datos como edad, sexo, tamaño familiar, nivel de estudios, renta familiar mensual, situación laboral, etc.

Dada la existencia de un mercado real de la miel convencional, una de las preguntas clave del cuestionario es si los encuestados consumían este producto en su hogar, permitiendo diferenciar a los consumidores que realmente participan en el mercado. Para el estudio de la demanda social por la miel de la marca TSE solo se tuvo en cuenta a aquellos encuestados que consumían este producto. A diferencia de otros estudios (Martínez-Paz et al., 2021) donde es posible identificar entre los encuestados a ceros reales y ceros protesta (Barreiro-Hurle et al., 2018), en este trabajo, dado el carácter de bien privado de la miel TSE, no existe un comportamiento protesta de la población. Así, de las 448 encuestas planteadas, las correspondientes a los 365 encuestados que eran consumidores habituales de miel (81 %) son las utilizadas en el análisis. En la tabla 1 se muestra la ficha del estudio:

Tabla 1. Ficha técnica del estudio.

Características	Descripción
Método de simulación del mercado hipotético	Encuestas personales
Pregunta disposición al pago en formato binario	¿Estaría dispuesto a pagar un precio superior por la miel TSE?
Pregunta en formato mixto de la disposición a pagar	Si el precio convencional es de 6 €/kg, ¿cuánto pagaría como máximo por el kg de miel TSE?
Población objetivo	546.000 hogares de la Región de Murcia
Tipo de muestreo	Aleatorio simple
Encuestas piloto	15 encuestas piloto
Encuestas definitivas	365 encuestas. El error de muestreo, con un nivel de confianza del 95 %, es del 5,13 % para proporciones intermedias y 3,08 % para proporciones extremas
Desarrollo de las encuestas	Marzo y abril de 2022

En este trabajo se explican asimismo los factores que influyen en la DAP por la miel TSE. Para ello, se llevó a cabo un análisis multivariante de la DAP binaria mediante un modelo *logit*. El modelo *logit* permite obtener la probabilidad de un suceso, identificar los factores que determinan esas probabilidades y el peso que dichos factores tienen sobre estas. En este trabajo para explicar la DAP se utilizaron como variables explicativas las obtenidas en los Bloques II y III del cuestionario.

Resultados y Discusión

En primer lugar, se define el perfil tipo del encuestado a partir de los valores medios obtenidos del análisis descriptivo de las preguntas del cuestionario referidas a los compromisos ecológicos (Bloque II) y a la información socioeconómica (Bloque III):

- La edad media de los encuestados es de 36 años.
- El 50,14 % de la muestra son mujeres, y el 49,86 % restante, hombres.
- El 54,25 % tiene estudios universitarios.
- La unidad familiar más frecuente es la formada por 4 miembros, siendo el tamaño medio de la familia de 3,38 personas.
- La renta familiar media disponible es de 1.970 €/mes y la renta personal media de 666 €/mes.
- El 46,58 % son trabajadores en activo.
- Un 15,34 % dona a alguna ONG o asociación de carácter medioambiental.
- Solo un 4,38 % posee una propiedad en el Parque Regional de Sierra Espuña.
- Los encuestados manifiestan un elevado compromiso ecológico afectivo (4,13 sobre 5), un compromiso verbal de disposición a actuar medio (3,53) y un bajo compromiso real (2,49).

Para analizar la demanda social de la marca Territorio Sierra Espuña se ha seleccionado aquellos encuestados que consumen miel, independientemente de la frecuencia de consumo, eliminando de este análisis a los encuestados que no consumen este producto. Del análisis de respuestas del ejercicio de valoración contingente se desprende que, de los 365 encuestados consumidores de miel, 234 mostraron una disposición a pagar (DAP) por la miel marca TSE, mientras que 131 manifestaron que no pagarían más por este producto.

Al desarrollar el análisis descriptivo de la DAP se obtiene una disposición al pago media de 8,96 €/kg por la miel de la marca TSE, con un máximo de 20 €/kg (Tabla 2).

Tabla 2. *Análisis descriptivo de la DAP media (€/hogar/año).*

Variable	n	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ
DAP	365	0	20	8,96	1,75

A partir de estos datos se confirma que los encuestados estarían dispuestos a pagar un sobreprecio medio de 3 €/kg por la miel marca TSE, dado que el precio de la miel convencional es de 6 €/kg. Además, a aquellos que mostraron una DAP positiva, se les preguntó por los motivos por los que estaban dispuestos a pagar este sobreprecio (Tabla 3).

Tabla 3. *Motivos por los que los encuestados pagarían un sobreprecio por la miel TSE.*

Motivo	n	% individuos
Por contribuir a la economía local	185	79,06
Por estar producida cerca de donde vivo	78	33,33
Porque es un producto más sano, con menos pesticidas, etc.	150	64,10
Para contribuir a la protección del medio natural	159	67,95
Por sus características gustativas (sabor, color, etc.)	99	42,31
Por probar algo nuevo/moda	15	6,41
Por su relación calidad/precio	46	19,66
Otros	7	2,99

El motivo más repetido fue “por contribuir a la economía local” (79,06 %), lo que indica que los encuestados valoran la procedencia local de los productos y están dispuestos a invertir más cuando saben que su compra beneficia directamente a los productores locales. Esto refleja una tendencia creciente hacia el consumo responsable y la preferencia por productos que fortalecen la economía de

las comunidades locales, posiblemente como una respuesta a la globalización y la percepción de los efectos negativos que puede tener sobre las comunidades pequeñas. El segundo motivo más repetido fue “por contribuir a la protección del medio natural” (67,95 %), seguido de “porque es un producto más sano, con menos pesticidas, etc.” (64,10 %), lo que pone de manifiesto que existe una preocupación y concienciación en la población por la protección del medioambiente y por la salud, poniendo en valor la pureza y la ausencia de químicos en los alimentos. El motivo menos elegido fue “por probar algo nuevo/moda”, ya que solo el 6,41 % de los entrevistados lo señaló, lo que lleva a pensar que la motivación basada en la novedad o las tendencias pasajeras es muy limitada en este caso. A aquellos encuestados que manifestaron su negativa a pagar un sobreprecio por la miel TSE también se les preguntó el motivo por el que no lo harían (Tabla 4).

Tabla 4. Motivos por los que los encuestados no pagarían más por la miel TSE.

Motivo	n	% individuos
No creo que sea de mayor calidad	23	17,56
No me fijo en la marca de los productos, solo en el precio	36	27,49
Es difícil de encontrar en las tiendas	22	16,79
No confío en que sea realmente del Parque	12	9,16
No conozco el producto	58	44,27
Estoy satisfecho con el producto convencional	44	33,59
Otros	13	9,92

Un 58 % de los entrevistados que no pagarían por la miel marca TSE manifestó que no lo haría porque “no conozco el producto”, siendo el motivo más repetido, lo que destaca una importante barrera en términos de visibilidad y reconocimiento de marca. Esta falta de conocimiento o familiaridad con el producto podría deberse a una estrategia de marketing insuficiente o a una limitada distribución en el mercado. El segundo motivo por el que no pagarían más por este producto, elegido por un 44 % de los encuestados, fue porque “estoy satisfecho con el producto convencional”, lo que pone de manifiesto la importancia de que la marca TSE no solo haga su producto visible, sino que también conciencie a los consumidores sobre los beneficios adicionales que ofrece, como la sostenibilidad, la contribución con la protección del espacio natural, la pureza del producto, el apoyo a los productores locales o cualquier otro valor añadido que justifique el sobreprecio. El tercer motivo más votado fue el de “no me fijo en la marca de los productos, solo en el precio”, votado por un 36 %, lo que revela que una parte significativa de los consumidores de este producto sigue siendo altamente sensible al precio.

Por último, se realizó un modelo *logit* para determinar los factores que explican la disposición al pago de los encuestados por la miel TSE. En la tabla 5 se muestra el modelo obtenido:

Tabla 5. Modelo *logit* de la disposición al pago por la miel TSE.

Variable	Coefficiente	Desv. típica	Z	P-valor	Pendiente
Constante	-3,298	0,719	-4,588	***	
Edad	0,015	0,007	2,057	**	0,003
Índice compromiso ecológico afectivo	0,819	0,159	5,165	***	0,186
Ajuste del modelo					
Nº de casos correctamente predichos	250 (68,5 %)				
Chi-cuadrado	0,227				

El modelo *logit* presenta un buen ajuste dado el porcentaje de clasificación correcta obtenido (68,5 %) y no presenta problemas de colinealidad. El modelo indica que las variables que determinan que un encuestado tenga una mayor probabilidad a pagar un sobreprecio por la miel marca TSE son la edad y el índice de compromiso afectivo. Atendiendo a las pendientes de probabilidad estimadas para estas variables, se demuestra que se incrementa un 0,3 % la probabilidad de pagar un sobreprecio por la miel TSE si la edad de los encuestados es mayor, aumentando en un 18,6 % esta probabilidad por cada punto adicional de compromiso ecológico afectivo. La influencia de la edad podría estar relacionada con la mayor experiencia de estas personas con el consumo del producto y la mayor conciencia sobre las implicaciones ambientales y de salud que suelen desarrollarse con el tiempo. A medida que las

personas envejecen, pueden volverse más conscientes y selectivas en sus decisiones de compra, priorizando productos que se alineen con sus valores personales y éticos. Por otro lado, el índice de compromiso ecológico afectivo refleja un componente emocional y ético en las decisiones de compra, lo que sugiere que los encuestados con una fuerte conexión emocional con el medioambiente están dispuestos a respaldar económicamente productos que se perciben como ambientalmente sostenibles.

Conclusiones

Los resultados de la encuesta realizada a la población de la Región de Murcia para estudiar la demanda social de la marca Territorio Sierra España (TSE) muestran una significativa predisposición de los consumidores a apoyar productos que promueven la sostenibilidad ambiental y el desarrollo de las economías locales rurales.

La disposición al pago (DAP) por la miel de la marca TSE es un indicador clave de la valoración social de este producto. Con una DAP media de 8,96 €/kg y un sobreprecio promedio de 3 €/kg sobre la miel convencional, los consumidores están dispuestos a pagar más principalmente por razones que reflejan una preocupación por el bienestar de la comunidad y el medioambiente. Por otro lado, la falta de conocimiento del producto fue el principal obstáculo para aquellos que no estaban dispuestos a pagar un sobreprecio, lo que sugiere que la visibilidad y el reconocimiento de la marca son aspectos que requieren más atención.

El análisis del modelo *logit* refuerza la idea de que la disposición a pagar un sobreprecio por la miel TSE está influenciada por factores socioeconómicos como la edad y el compromiso ecológico afectivo, dado que los consumidores de mayor edad o con un mayor apego emocional ambiental son más propensos a comprar productos que se alinean con sus valores éticos y ambientales.

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que existe una alta demanda social por los productos marca TSE que tienen potencial para captar al segmento de consumidores preocupados por la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico local. Es necesario la planificación de acciones que integren y promuevan estrategias de producción y comercialización con el distintivo TSE, en aras del desarrollo rural, a la vez que se satisfacen las demandas sociales de productos de calidad. Es fundamental que la marca TSE mejore su visibilidad y continúe informando a los consumidores sobre los beneficios únicos que ofrece, con el objetivo de maximizar su competencia en el mercado.

Agradecimientos

La primera autora agradece la financiación de la Fundación Séneca-Región de Murcia (21569/FPI/21).

Bibliografía

Barreiro-Hurle, J., Espinosa-Goded, M., Martínez-Paz, J. M., Perni, A., 2018. Choosing not to choose: A meta-analysis of status quo effects in environmental valuations using choice experiments. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 18(1), 79-109.

Colino J., Martínez-Carrasco Pleite, F., Losa-Carmona, A., Martínez-Paz, J. M., Pérez-Morales, A., Albaladejo-García, J. A., 2022. Las zonas rurales de la Región de Murcia. Informe para el Consejo Económico y Social de la Región de Murcia. Colección de estudios 44. 398 pp.

Maloney, M.P., Ward, M.P., Braucht, G., 1975. Un estudio exploratorio sobre las variables psicográficas que influyen en el comportamiento. *Revista de Economía y Empresa*, 50 (21). 61-87

Martínez-Paz, J. M., Albaladejo-García, J. A., Barreiro-Hurle, J., Pleite, F. M. C., Perni, Á., 2021. Spatial effects in the socioeconomic valuation of peri-urban ecosystems restoration. *Land Use Policy*, 105, 105426.

Masot, A. N., Gascón, J. L. G., 2021. Sustainable Rural Development: Strategies, Good Practices and Opportunities. *Land*, 10(4), 366.



Merino, F., Prats, M. A., 2020. Why do some areas depopulate? The role of economic factors and local governments. *Cities*, 97, 102506.

Soler, F., San Martín, E., 2020. Casos de éxito de desarrollo rural en Europa: una primera aproximación a su aplicabilidad en España. *Revista Internacional de Política Económica*. Vol. 2, nº 2, 46-74.

Propuesta de zonificación del suelo rural en el término municipal de alicante

F. Nieto y A. Melian¹

¹ Universidad Miguel Hernández, Carretera de Beniel, Km. 3,2, 03312, Orihuela, España, nietofr@hotmail.com

Resumen

Consiste en realizar un estudio pormenorizado del suelo rural para el municipio de Alicante, según las disposiciones legislativas vigentes y los instrumentos de carácter supramunicipal, estableciendo zonas diferenciadas por uso global y características físicas dominantes. A su vez, se describen los usos permitidos en el suelo no urbanizable para prevenir los impactos negativos en su estructura y capacidad, y también, proteger los valores que lo hacen merecedor de protección por las características específicas de los elementos naturales. Se relacionan las zonas de ordenación definidas con los usos que se pueden autorizar en las mismas, y se establecen reglas generales y específicas para cada subzona propuesta, en la que de acuerdo a un cuadro se establece los usos permitidos para cada subzona y el régimen particular aplicable para los aprovechamientos excepcionales. Se presentan los resultados obtenidos, incluyendo tanto la evolución observada como la propuesta de zonificación del suelo rural analizada para el municipio. Estas conclusiones reflejan un análisis detallado de los cambios y tendencias en el uso del suelo rural, así como recomendaciones específicas para su futura zonificación. De este modo, se proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas sobre la planificación y gestión del territorio rural del municipio de Alicante.

Palabras clave: Suelo rural, Suelo no urbanizable, uso rústico, zonificación rural

Proposal for the zoning of rural land in the municipality of Alicante

Abstract

It consists of carrying out a detailed study of the rural land for the municipality of Alicante, according to the legislative provisions in force and supra-municipal instruments, establishing differentiated areas by global use and dominant physical characteristics. At the same time, the permitted uses of non-developable land are described to prevent negative impacts on its structure and capacity, and also to protect the values that make it worthy of protection due to the specific characteristics of natural elements. The defined planning areas are related to the uses that can be authorized in them, and general and specific rules are established for each proposed subzone, in which, according to a table, the permitted uses for each subzone and the particular regime applicable to exceptional uses are established. The results obtained are presented, including both the observed evolution and the rural land zoning proposal analyzed for the municipality. These findings reflect a detailed analysis of changes and trends in rural land use, as well as specific recommendations for future zoning. In this way, a solid basis is provided for informed decision-making on the planning and management of the rural territory of the municipality of Alicante.

Keywords: Rural land, non-developable land, rustic use, rural zoning

Introducción

La ciudad de Alicante ha sufrido una gran transformación urbanística, sobre todo en los últimos años. Desde la aprobación del Plan General Municipal de Ordenación de Alicante (PGMO1987), hace ya más de tres décadas, han variado sustancialmente las necesidades de la ciudad y sus determinaciones están prácticamente completadas, lo que justifica la necesidad de llevar a cabo su revisión por el tiempo transcurrido desde su aprobación.

Los problemas actuales del municipio difieren en muchos aspectos de los que se daban cuando se redactó el vigente Plan de 1987. Alicante precisa sentar las bases de un nuevo modelo de desarrollo

futuro que dé respuesta a la problemática y necesidades actuales. La ciudad como sistema plantea la exigencia de renovación de sus estructuras funcionales, con el objetivo de construir un modelo de ciudad más sostenible y de atender y acomodar las nuevas necesidades sociales, económicas y ambientales, en consonancia con su contexto metropolitano.

Este trabajo pretende realizar una división del territorio rural municipal en zonas diferenciadas por su uso global y características físicas dominantes. Se establecen a su vez subzonas dentro de la primera división, cuya diferencia radica en los usos que se permiten realizar, el nivel de intensidad de los mismos, los requisitos que deben cumplir y otras condiciones específicas que le otorgan un carácter diferenciado, y que permiten mantener el aspecto básico que identifica la zona.

Para ello, el presente estudio describe y analiza el territorio del término municipal de Alicante, examinando sus principales características, como la ubicación, el clima, la hidrología, la topografía, la flora, los usos del suelo, la población y la economía. Además, se detalla el origen del planeamiento vigente y su evolución hasta la actualidad. Esta exhaustiva evaluación proporciona una comprensión integral del entorno y las dinámicas del municipio, constituyendo una base sólida para futuras decisiones de planificación y desarrollo territorial.

Se define el concepto de zonificación que la legislación urbanística ha desarrollado a lo largo de estos años y se describe la zonificación que establece la legislación de la Comunidad Valenciana vigente, el Decreto Legislativo 1/2021, de 18 de junio, del Consell de aprobación del texto refundido de la Ley de ordenación del territorio, urbanismo y paisaje (DOGV número 9129 de 16 de julio de 2021).

El estudio se realiza con el propósito de proponer un estudio previo que permita abordar con seguridad la redacción de un nuevo Plan General Estructural que defina un nuevo modelo de ciudad, conforme a lo establecido en la legislación urbanística vigente.

Para ello, se describen los usos permitidos en el suelo rural, y se detallan cuáles son aptos para cada una de estas subzonas propuestas, así como sus limitaciones en base a la vinculación de usos permitidos en las mismas.

Materiales y Métodos

Propuesta de zonificación y criterios establecidos

El 27 de marzo de 1987 el Conseller con competencias en urbanismo aprobó definitivamente el Plan General Municipal de Ordenación del municipio de Alicante, PGMO en adelante. Este instrumento de ordenación municipal fue aprobado al amparo de la legislación estatal, Real Decreto 1346/1976, de 9 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Régimen del Suelo y Ordenación Urbana (BOE número 144 de 16 de junio de 1976).

El PGMO es el instrumento de ordenación que regula actualmente las actividades de edificación y uso del suelo en el municipio de Alicante de acuerdo con lo establecido en la legislación aplicable, el cual clasificó el suelo distinguiendo entre cuatro tipos de suelo: el urbano, el urbanizable programado, el urbanizable no programado y, por último, el suelo no urbanizable.

La zonificación es un concepto relativamente novedoso dentro del urbanismo español, aparece en primer lugar con la Ley 6/1994, de 15 de noviembre, de la Generalitat Valenciana, Reguladora de la Actividad Urbanística (BOE número 8 de 10 de enero de 1995), conocida como LRAU (disposición derogada) como un modelo interpretativo de la ciudad aparejado con la normativa con la obligación de dotar las cualidades de sencillez para que pueda ser utilizado como herramienta eficaz por los agentes que operan en la formación y transformación de la ciudad.

La zonificación aplica el método analítico, según el cual las necesidades individuales y colectivas pueden ser definidas y codificadas en una red de relaciones. Así, la zonificación se convierte en uno de los instrumentos fundamentales de la planificación urbanística, constituyendo la base del urbanismo y la clasificación del suelo.

Profundizando en el concepto, la zonificación se refiere a la disposición espacial de los usos generales dentro de un área geográfica determinada, lo que implica dividir el territorio municipal en distintas zonas de ordenación estructural basadas en las características del territorio, los valores presentes y los usos previstos para cada zona.

Al delimitar las zonas de ordenación urbanística, se consideran diversas circunstancias, como la infraestructura verde, las unidades paisajísticas, las características territoriales, los valores ambientales, sociales, culturales y territoriales presentes en el área de planificación, las infraestructuras tradicionales ya existentes y la distribución predominante de usos similares.

Se establecen las siguientes zonas de ordenación dentro del suelo rural:

a) Suelo rural común: Se define como aquella área que, aunque no se clasifica como merecedora de una protección especial debido a la falta de elementos naturales de importancia notable, sirve como base natural para actividades agrícolas, ganaderas y otras actividades que, debido a sus particulares características, necesitan ser llevadas a cabo en entornos rurales. Subzonas:

- ZRC-AG-1 General: Zona rural común agropecuaria, predominan los usos agropecuarios, también incluye edificación dispersa, áreas semiconsolidadas, y otras construcciones y tipologías tramitadas mediante autorización autonómica.
- ZRC-AG-2 Compatible con Instalaciones Fotovoltaicas: Área de suelo no urbanizable común apta para la implantación de centrales solares fotovoltaicas, con el objetivo de preservar los valores ambientales, paisajísticos, patrimoniales y territoriales del municipio de Alicante.
- ZRC-EX Actividades Diversas: Zona rural común de explotación de recursos naturales. Zona rural común de explotación de recursos naturales, destinada a actividades productivas que, debido a su naturaleza, no son adecuadas para entornos urbanos o industriales. Incluye terrenos transformados actualmente destinados al uso extractivo, como canteras en actividad y otras grandes actividades industriales autorizadas.

b) Suelo rural de protección especial: Se caracteriza por poseer valores que requieren protección ambiental, paisajística, cultural, económica o por la presencia de riesgos naturales e inducidos. Los usos, obras, instalaciones y actividades en estos suelos deben ser compatibles con la conservación, mejora, aprovechamiento y valorización de los recursos protegidos, así como limitar los riesgos que la legislación sectorial establece. Subzonas:

- ZRP-NA: Zona rural protegida natural: Se identifican áreas territoriales con valores naturales especiales que requieren un régimen de conservación específico y medidas de protección para su valorización. Se engloban todos los elementos territoriales sujetos a algún tipo de protección según la legislación sobre patrimonio natural o paisajístico: Espacios Naturales Protegidos, Lugares de Importancia Comunitaria, Zonas Húmedas, Zonas de Especial Protección Ambiental, Montes Catalogados, Zonas de Protección Forestal Estratégica, etc.
- ZRP-AG: Zona rural protegida agrícola. Esta área se caracteriza por la predominancia de paisajes de cultivos, con presencia limitada de bosques, actividades agrícolas y construcciones aisladas. El objetivo principal en esta zona es asegurar la función de amortiguación de los impactos en los entornos naturales protegidos, además de servir como soporte para actividades agrícolas. La función de conexión se limita a actividades agropecuarias específicas en estos entornos.
- ZRP-AF: Zona rural protegida por afecciones: Se engloban en ella los terrenos que están sujetos a protecciones debido a las afectaciones causadas por infraestructuras o bienes. El objetivo de estas protecciones es mejorar el uso y la conservación del suelo de estas zonas.
 - ZRP-AF-CA Cauces: Las áreas que incluyen la protección de cauces y barrancos significativos, englobando el Dominio Público Hidráulico de cursos de agua naturales como ríos y barrancos, junto con sus márgenes y riberas.

- **ZRP-AF-CT Costas:** Abarca el Dominio Público Marítimo-Terrestre (DPMT) y la superficie conforme a la legislación de costas y de playa, con distintos ámbitos diferenciados. Están excluidas de los terrenos aptos para la construcción.
- **ZRP-AF-CR Carreteras:** El espacio incluye el Dominio Público de Carreteras según la legislación sectorial. Incluye las áreas afectadas por diversas infraestructuras de transporte supramunicipal (carreteras estatales, autonómicas y municipales) con diferentes intensidades y características.
- **ZRP-AF-FR Ferrocarril:** Conforman los suelos y áreas que soportan la red de ferrocarril del estado y sus instalaciones auxiliares, conforme a la normativa vigente del sector ferroviario.
- **ZRP-AF-PC Patrimonio Cultural:** Se trata de los terrenos clasificados bajo la sección cultural del municipio, conforme a la legislación sobre patrimonio cultural valenciano.
- **ZRP-AF-VP Vías Pecuarias:** Son caminos históricos utilizados para el paso del ganado, regulados por la Ley 3/2014 de Vías Pecuarias de la Generalitat Valenciana.
- **ZRP-AF-IF Infraestructuras:** Son la red principal de instalaciones públicas del municipio que se consideran esenciales. Incluye terrenos destinados a dotaciones de titularidad y uso público, así como equipamientos privados que son importantes para la organización urbana.

Resultados y Discusión

Zonificación del municipio

En relación con la zonificación propuesta se han identificado y separado las áreas de suelos urbanos, urbanizables y rústicos, desprendiendo las siguientes superficies:

Tabla 1. Superficies de la propuesta de zonificación del suelo rural. Fuente: Elaboración propia.

ZONA	SUBZONA	SUPERFICIE (ha)	SUPERFICIE (km ²)	%
Zona Urbana y Zonas de Nuevos Desarrollos		4.984,02	49,84	24,59%
Zona Rural		15.285,94	152,86	75,41%
	Zona Rural Común	5.803,24	58,03	28,63%
	Zona Rural Común Agropecuaria	5.288,69	52,89	26,09%
	ZRC AG 1 General	3.302,31	33,02	16,29%
	ZRC AG-2 Compatible con Instalaciones Fotovoltaicas	1.986,38	19,86	9,80%
	Zona rural común de explotación de recursos naturales	514,55	5,15	2,54%
	ZRC-EX-1 Actividades Diversas	9.075,89	90,76	44,78%
	Zona Rural Protegida	9.482,70	94,83	46,78%
	Zona Rural Protegida Natural	5.016,60	50,17	24,75%
	Zona Rural Protegida Agrícola	840,80	8,41	4,15%
	Zona Rural Protegida por Afecciones	3.625,30	36,25	17,89%
	ZRP-AF-CA Cauces	2.504,18	25,04	12,35%
	ZRP-AF-CT Costas	108,55	1,09	0,54%
	ZRP-AF-CR Carreteras	534,29	5,34	2,64%
	ZRP-AF-FR Ferrocarril	41,21	0,41	0,20%
	ZRP-AF-PC Patrimonio Cultural	15,53	0,16	0,08%
	ZRP-AF-VC Vía Pecuaria	58,82	0,59	0,29%
	ZRP-AF-IF Infraestructuras	362,72	3,63	1,79%
Total		20.269,96	202,70	100,00%

Además, se realiza una comparativa del suelo rústico del PGM 1987 y el propuesto en el presente estudio, siendo las superficies las siguientes:

Tabla 2. Comparativa superficies PGMO 1987 frente a propuesta de zonificación suelo rural.

Zonificación	Suelo No Urbanizable (ha)	SNUZ Común (ha)	%	SNUZ Protegido (ha)	%
PGMO 1987	15.404,49	8.954,89	58,13%	6.449,60	41,87%
Propuesta Zonificación	15.285,94	5.803,24	37,96%	9.482,70	62,04%
Diferencia	118,55	3.151,65		-3.033,10	

Fuente: Elaboración propia.

El suelo rústico ha disminuido levemente respecto al aprobado por el PGMO 1987. A su vez, conlleva una reducción del suelo rural común respecto al PGMO 1987. En contraposición dentro de ese suelo la calificación de suelo no urbanizable protegido del presente estudio ha aumentado considerablemente respecto al previsto en el PGMO 1987, esto se debe a que los posteriores instrumentos supramunicipales y las afecciones legislativas han sido más proteccionistas con este tipo de suelo, coincidiendo con el aumento del suelo destinado a su preservación propuesto en el presente estudio.

Gráficamente, la zonificación propuesta en presente estudio distingue entre zonas rurales comunes (agrícola común, agrícola natural, actividades diversas), zonas rurales protegidas (afecciones, agrícola elevada, natural paisaje), suelo urbano y suelo urbanizable, según se refleja en la figura 1 siguiente:

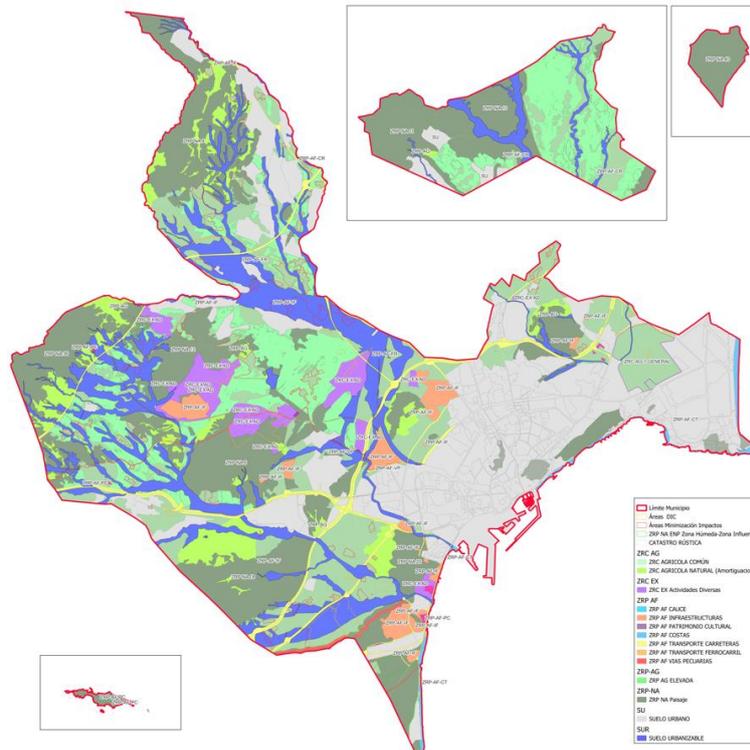


Figura 1. Mapa de propuesta de zonificación del municipio de Alicante. Fuente: Elaboración propia.

Régimen general de las zonas de ordenación rurales y sus usos permitidos

Para finalizar el estudio se relacionan los posibles usos que se permiten en el suelo rural, relacionado estos con las prohibiciones y posibles aprovechamientos, distinguiendo entre los usos ordinarios y los excepcionales. Todas las construcciones, actividades e instalaciones deben cumplir con la legislación de ordenación del territorio, urbanismo y paisaje. No se permitirán aquellas que no respeten los valores ambientales del entorno rural, sean innecesarias para su uso.

Tabla 3. Usos permitidos en las zonas de ordenación propuestas. Fuente: Elaboración propia.

Usos de referencia	ZRC-AG1	ZRC-AG2	ZRC-EX	ZRP-AG	ZRP-NA	ZRP-AF
Usos permitidos Ordinarios						
Uso agrario o forestal con sus características naturales propias						
A) Agrícola Extensivo	Si	Si	Si	Si	Si	No
B) Ganadero Extensivo	Si	Si	Si	Si	Si	No
C) Forestal Extensivo	Si	Si	Si	Si	Si	No
D) Construcciones auxiliares en el medio rural	Si	Si	Si	Si	Si	No
Usos permitidos Excepcionales						
A) Edificaciones, construcciones e instalaciones para la actividad agropecuaria y forestal (art. 211-a)						
Vinculadas al uso agrícola intensivo	Si	Si	Si	Si	Si	No
Vinculadas al uso ganadero intensivo	Si	Si	Si	No	Si	No
Vinculadas al uso cinegético y gestión de la fauna	No	Si	Si	No	No	No
Vinculadas al uso forestal extensivo	No	Si	Si	No	No	No
Cría particular de animales y Estancia animales de compañía	Si	Si	Si	Si	Si	No
B) Vivienda aislada y familiar (art. 211-b)						
Vivienda aislada y familiar y Servicios complementarios	Si	Si	No	No	No	No
C) Explotación canteras, extracción áridos y tierras o recursos geológicos, mineros o hidrológicos (art. 211-c)						
Explotación canteras	No	No	Si	No	No	No
Extracción áridos y tierras	No	Si	Si	No	No	No
Extracción recursos geológicos y mineros	No	No	Si	No	No	No
Extracción recursos hidrológicos	No	No	No	No	Si	No
Transformación materia prima obtenida de la explotación	No	No	Si	No	No	No
D) Generación energía renovable (art. 211-d)						
Energía solar	No	Si	Si	No	No	No
Energía eólica	No	Si	Si	No	No	No
Energía hidráulica	No	Si	Si	No	No	No
E) Actividades industriales y productivas de necesario emplazamiento en el medio rural (art. 211-e)						
Industrias que deben alejarse de zonas residenciales o terciarias	No	No	Si	No	No	No
Actividades de transformación y comercialización de productos del sector primario	No	No	Si	No	No	No
Industrias de baja rentabilidad por unidad de superficie	No	Si	Si	No	No	No
F) Actividades terciarias o de servicios (art. 211-f)						
Establecimientos de alojamiento turístico y restauración	Si	Si	No	Si	Si	No
Centros recreativos, deportivos y ocio	Si	Si	Si	Si	Si	No
Campamento de turismo o similar	No	Si	No	No	Si	No
Actividades culturales y docentes, asistenciales, religiosas y benéficas, centros sanitarios y científicos, servicios funerarios y cementerios	Si	Si	No	Si	Si	No
Plantas de tratamiento, valorización, depósito y eliminación de residuos	No	Si	Si	No	No	No
Obras infraestructuras e instalaciones propias de las redes de suministros, transportes y comunicaciones	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Estaciones de suministro de carburantes y áreas de servicio	Si	Si	Si	No	No	No
Estacionamiento de maquinaria y vehículos pesados, almacenamiento de vehículos	Si	Si	Si	No	No	No
G) Edificios residenciales existentes que puedan destinarse a viviendas colaborativas en cesión de uso (art. 211-g)						
Rehabilitación de edificios residenciales existentes vinculados a actividades propias del medio rural	Si	Si	Si	No	No	No

Conclusiones

El objetivo principal del estudio fue analizar el suelo rústico del municipio de Alicante y realizar una zonificación acorde a la normativa establecida por la legislación autonómica de la Comunidad Valenciana. A partir de esta zonificación, se logró distinguir diversas áreas de ordenación basadas en sus valores ambientales y características morfológicas, lo que permitió la creación de entornos con una alta calidad ambiental.

Al analizar la evolución del suelo producida desde la aprobación del Plan General de 1987, se observa una notable transformación del mismo debido al crecimiento urbano, que ha derivado la disminución del suelo rural, no obstante, se ha registrado un significativo incremento en las áreas de suelo rural protegido. En 1987, el 58% del suelo rústico se catalogaba como común y el 42% como protegido; sin embargo, la nueva propuesta presenta un cambio sustancial, estableciendo un 38% de suelo rural común y un 62% de suelo rural protegido.

El estudio también ha propuesto una regulación más detallada y amplia de los usos del suelo rústico, diferenciando zonas concretas con usos específicos para preservar sus valores ambientales con el fin de evitar la transformación urbanística de estas áreas protegidas. Así, se garantiza que los espacios con mayor valor ambiental mantengan sus características esenciales, mientras que se identifican otras áreas sin valor especial que pueden destinarse a actividades excepcionales o incluso reservarse para el crecimiento urbano futuro del municipio.

Un resultado destacado del estudio es la necesidad de realizar un análisis detallado de la inundabilidad, especialmente aquellas zonas que con el paso de los años y los cambios de orografía son susceptibles de sufrir riesgos de inundaciones para protegerlas de cualquier actividad y para garantizar que se respete la normativa ambiental.

Finalmente, a través de un Plan General Estructural se deberá realizar la zonificación definitiva, en el que se integrarán las expectativas de crecimiento urbanístico para los próximos 20 años y que puede tomar de base el presente estudio.

Bibliografía

Legislación estatal

Real Decreto 1346/1976, de 9 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Régimen del Suelo y Ordenación Urbana (BOE número 144 de 16 de junio de 1976).

Legislación autonómica

Ley 6/1994, de 15 de noviembre, de la Generalitat Valenciana, Reguladora de la Actividad Urbanística (DOGV número 2394 de 24 de noviembre de 1994).

Ley 3/2014, de 11 de junio de Vías Pecuarias de la Generalitat Valenciana (DOGV número 7319 de 17 de julio de 2014).

Decreto Legislativo 1/2021, de 18 de junio, del Consell de aprobación del texto refundido de la Ley de ordenación del territorio, urbanismo y paisaje (DOCV número 9129 de 16 de julio de 2021).

Planeamiento municipal

Plan General Municipal de Ordenación de Alicante 1987, aprobación definitiva 27 de marzo de 1987 por el Conseller competente en Urbanismo (BOP número 108 de 14 de mayo de 1987).

Percepción ciudadana del nivel de bienestar y la falta de oportunidades de las zonas rurales de la Región de Murcia.

G. Martínez-García¹, F. Martínez-Carrasco Pleite² y J.M. Martínez-Paz²

Departamento de Economía Aplicada, Universidad de Murcia, Campus de Espinardo, 30100, Murcia, España.

gonzalo.martinezg@um.es

Departamento de Economía Aplicada, Universidad de Murcia, Campus de Espinardo, 30100, Murcia, España.

femartin@um.es / jmpaz@um.es

Resumen

Uno de los temas claves en el análisis de la situación del mundo rural en la actualidad viene siendo el estudio del nivel de bienestar de su población y sus menores oportunidades respecto a población urbana. En España, recientes informes, como los del Consejo Económico y Social o el Banco de España, vienen confirmado la existencia de brechas entre ambos territorios, siendo diversos los factores claves que las explican. En esta comunicación se realiza un análisis de la percepción del nivel de desarrollo y oportunidades de las zonas rurales de la Región de Murcia, mediante una encuesta realizada a 334 ciudadanos de esta comunidad que valora su satisfacción con los Servicios Públicos básicos. Los resultados ponen de manifiesto como la valoración social de las ventajas de vivir en municipios urbanos sobrepasa a la principal fortaleza de las zonas rurales e intermedias, que es su mayor calidad de vida global. Las desventajas percibidas de residir en municipios rurales residen en aspectos básicos como son las menores oportunidades laborales, la menor presencia y calidad de servicios básicos, o problemas de accesibilidad. Por todo ello, es preciso seguir avanzando en la disminución de esas desigualdades territoriales, con medidas y políticas de cohesión territorial que potencien el interés por residir en las áreas rurales, mejorando las oportunidades de esos territorios, y la calidad de los Servicios Públicos que se prestan en todo tipo de municipios, poniendo freno a los procesos de despoblación que sufren muchas de ellas.

Palabras clave: Desarrollo territorial; despoblación rural; servicios básicos, desigualdad, Región de Murcia.

Citizen perception of the level of well-being and the lack of opportunities in rural areas of the Region of Murcia.

Abstract

One of the key issues in the current analysis of the rural world is the study of the population's level of well-being and its fewer opportunities compared to urban populations. In Spain, recent reports, such as those from the Economic and Social Council and the Bank of Spain, have confirmed the existence of gaps between rural and urban areas, which can be explained by various key factors. This paper presents an analysis of the perceived level of development and opportunities in the rural areas of the Region of Murcia, based on a survey conducted with 334 citizens from this community, who evaluated their satisfaction with basic public services. The results reveal that the social perception of the advantages of living in urban municipalities outweighs the main strength of rural and intermediate areas, which is their higher overall quality of life. The perceived disadvantages of residing in rural municipalities are related to fundamental aspects such as fewer employment opportunities, lower presence and quality of basic services, and accessibility issues. Therefore, it is necessary to continue making progress in reducing these territorial inequalities through cohesion policies that enhance the appeal of living in rural areas, improve the opportunities in these regions, and enhance the quality of public services provided across all types of municipalities, thereby curbing the depopulation processes affecting many of them.

Keywords: *Territorial development; rural depopulation; basic services; inequality; Region of Murcia.*

Introducción

El nivel de desarrollo territorial y la igualdad de oportunidades entre el mundo rural y urbano ha sido un tema de debate reciente en territorios como España y el resto de Europa, donde el análisis tanto de

la “España vaciada” como de la insostenibilidad del crecimiento de las zonas metropolitanas han adquirido relevancia. Un factor importante sobre esta desigualdad y nivel de desarrollo son las diferencias presentes en la provisión de Servicios Públicos (SP) entre unos y otros municipios, condicionando la calidad de vida y dinamismo de municipios con peor dotación (Banco de España, 2021; CES, 2021).

La situación de las zonas rurales en retroceso ha sido objeto de estudio en la literatura científica, sabiendo que en los años 50 esta representaba el 39% del total nacional y actualmente alcanza a menos del 18% (Pinilla y Sáez, 2017), fruto de un imparable proceso de concentración de la población en áreas urbanas e intermedias. Desde investigaciones que han analizado su evolución sociodemográfica (Camarero, 2020), a otros análisis que vienen planteando la necesidad de mejorar la accesibilidad a servicios públicos y privados (Goerlich, et al. 2021); otros proponen que es necesario garantizar la sostenibilidad del crecimiento poblacional de las pedanías y municipios colindantes de las principales áreas económicas, tal y como planteaba Fayrén (1993) en el caso de la Región de Murcia, o el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos en la Agenda 2030 de Naciones Unidas, a aplicar en este tipo de municipios (Álvarez, 2020), siendo otras muchas las voces que plantean acciones y políticas de cohesión más profundas, reforzando y coordinando políticas existentes (MPTFP, 2019) o el interés de desarrollar acciones que eran planteadas en la Ley 45/2007 de 13 de diciembre, para el desarrollo sostenible del medio rural. Esas y otras medidas contribuirían a una mayor igualdad de oportunidades de toda la población y, finalmente, a paliar retos como el de la despoblación de las zonas rurales más afectadas, debiendo cada territorio buscar espacios a fomentar sus intangibles, como la identidad territorial, implementando estrategias propias de desarrollo endógeno (Pizarro, 2012).

Las desigualdades en la disponibilidad y calidad de ciertos Servicios Públicos son motivo de estancamiento económico y demográfico, por lo que el conocer la percepción de los habitantes acerca de estos es de utilidad a la hora de localizar las principales áreas a mejorar con respecto a la inversión pública, con un enfoque de equidad territorial, que de manera más detallada es descrita en el siguiente apartado.

Materiales y Métodos

En este trabajo se presentan la información recabada con una encuesta realizada a ciudadanos de toda la Región de Murcia, cuyas características esenciales son descritas en la Tabla 1, que tenía el objetivo de aproximar la percepción que la población tiene acerca de la calidad de los servicios públicos, atendiendo a su lugar de residencia. Los datos presentados proceden de una encuesta que contaba con 334 respuestas válidas, presentándose en la Tabla 1 las características esenciales de la misma.

Tabla 1. Ficha técnica de la Encuesta a Ciudadanos Elaboración propia a partir de Encuesta a ciudadanos.

Crterios	Descripción
Ámbito	Región de Murcia
Universo	Población murciana (mayor de edad)
Tamaño muestral	334 encuestas
Error muestral	$\pm 5,47\%$ / $\pm 3,28$
Nivel de confianza	95,5% ($k = 2$)
Muestreo	Aleatorio estratificado por sexo, municipios y edad
Control	De coherencia y estabilidad
Cuestionario piloto	20 encuestas (septiembre 2021)
Trabajo de campo	Octubre a diciembre de 2021

Dicha encuesta se realizó entre octubre y diciembre del año 2021 a ciudadanos de la Región de Murcia, utilizando entrevistas personales presenciales, y mediante un cuestionario web. Esta

determinaba un error muestral coherente con la finalidad de la encuesta, del 5,47%, con un nivel de confianza del 95% ($p=95\%$, $q=5\%$) en proporciones intermedias (50/50), así como un error del 3,28% en proporciones extremas (90/100), bajo el supuesto de poblaciones infinitas, partiendo de los datos del censo que sitúa a la población regional por encima del millón y medio de habitantes.

Esta encuesta se enmarcaba en un diagnóstico más amplio de la situación económica, social y ambiental de los 45 municipios que componen esta CCAA (Colino Sueiras et al., 2022), aportándose una clasificación que exploraba las diferencias existentes entre municipios Urbanos, Intermedios y Rurales, identificándose además de estos, los 12 municipios rurales más gravemente afectados por procesos de despoblación, los denominados como R-12. Estos últimos, además de ser los más envejecidos, presentaban una peor accesibilidad a servicios públicos básicos, lo que, sin duda, determina menos oportunidades, un menor dinamismo económico, y un menor atractivo para gran parte de la población.

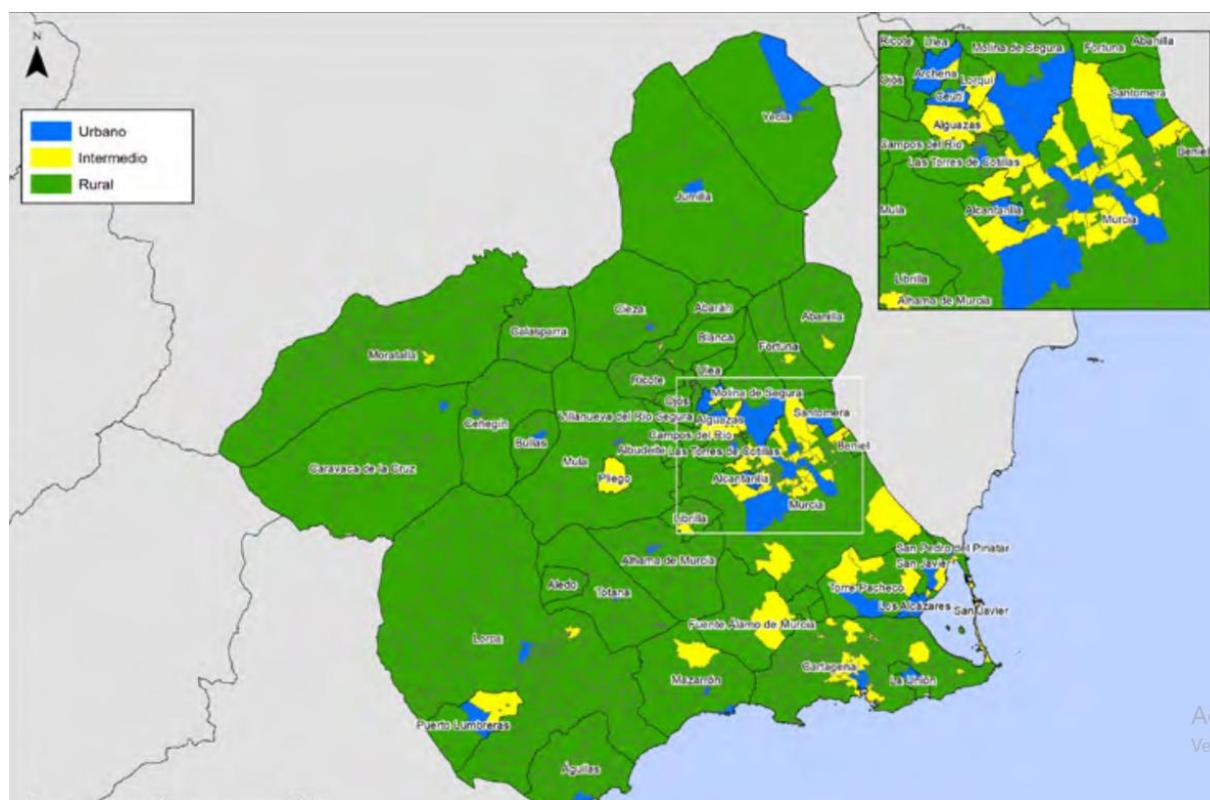


Figura 1. Clasificación de zonas rurales, intermedias y urbanas. Región de Murcia.

Tipología INE-II. 2020. Fuente: Colino Sueiras et al. (2022).

El cuestionario diseñado estaba compuesto por dos grandes bloques de preguntas: uno primero referente a las características sociodemográficas del encuestado, y uno segundo, de valoración de los servicios públicos. Las preguntas que componían el cuestionario planteaban la valoración (según distintas escalas de Likert de 1 al 5), identificándose el nivel de importancia que la muestra da (1= Muy escasa importancia, 5= Mucha importancia) a varios ítems, o su grado de acuerdo o desacuerdo (1=completamente en desacuerdo, 5= completamente de acuerdo) ante cuestiones que se les planteó. También se solicitaba la ordenación de ciertas listas de elementos, en función de la importancia que le otorgaban de mayor a menor importancia (1º, 2º, 3º...), tal y como se muestra en el siguiente epígrafe de presentación de los resultados, y que se estructuran en 4 subapartados.

Resultados y Discusión

Descripción de la muestra

El resumen de la muestra se presenta en la Tabla 2, dónde se han obtenido y codificado ciertas características sociodemográficas de los encuestados, recogidas con la intención de localizar relaciones bivariantes en la percepción de la calidad de los servicios públicos. La aproximación de estas cifras a las regionales nos informa de la representatividad de la muestra. Los datos sociodemográficos incorporados son los referentes al sexo, la edad, nivel de estudios y nivel de renta bruta mensual del hogar. La tabla muestra indicios de la correcta representación de la distribución de población regional, contando con paridad de encuestados con respecto al sexo, sabiendo que el encuestado estándar corresponde a un murciano de una edad media de 36 años (edades distribuidas entre los 18 y 73 años).

Tabla 2. *Descripción de la muestra*

Variable	Categorías	FA	FR (%)
Sexo	Varón	165	49,4
	Mujer	169	50,6
Municipios	R-12	31	9,3
	Rurales	84	25,1
	Intermedios	54	16,2
	Urbanos	196	58,7
Edad	Baja (18-26 años)	114	34,1
	Media (27 a 45 años)	115	34,5
	Alta (46-73 años)	105	31,4
Estudios	Bajo (Sin estudios, básica y secundaria)	32	9,6
	Medio (Bachiller/FP o equivalente)	103	30,8
	Alto (Universitarios y Postgrado)	199	59,6
Ingresos mensuales del hogar	Baja (<1.500€)	100	29,9
	Media (1.501€ - 2.700€)	141	42,3
	Alta (Más de 2.700 €)	93	27,8
	Total	334	100

FA y FR (%): Frecuencia absoluta y relativa. Elaboración propia a partir de Encuesta a ciudadanos.

El 59,9% de la población encuestada posee estudios universitarios, lo que muestra cierto sesgo hacia esta categoría de estudios, ya que en el mismo trimestre en el que se realizó la encuesta, tan solo un 26,9% de la población regional contaba con estudios superiores, según el INE. Por el contrario, se obtuvo un reducido número de encuestados con un nivel bajo de estudios. Esto puede deberse al uso de cuestionarios virtuales para la realización de las encuestas, lo que limita la accesibilidad de la población ajena a medios digitales, que presenta mayor edad y menor nivel de estudios.

En referencia al tipo de municipio, los urbanos concentran la mayoría de los encuestados (58,7%), mientras que el resto, interurbanos y rurales, representan el 16,2% y el 25,1% respectivamente (un 9,3% de los rurales corresponde a municipios R-12). Abordando los ingresos familiares, destaca el intervalo categorizado como “medio” (1501€ - 2700€), con el 42,3%, mientras que los hogares restantes se distribuyen casi equitativamente entre las categorías “baja” (<1.500€) y “alta” (<2.700 €).

El objetivo de la recogida de estos datos no es el de mostrar datos representativos de la Región, sino el encontrar posibles dependencias entre estos y la valoración de servicios.

Valoraciones globales de los Servicios Públicos

Pasando a la descripción de la valoración de los encuestados de la calidad de los Servicios Públicos (SP), en la Tabla 3 se muestran estos ordenados de mejor a peor valorados, así como la frecuencia relativa de las mismas. La valoración media (3,3) indica un grado de satisfacción moderado/alto en la percepción de estos servicios. Profundizando en los resultados, destaca positivamente la educación (en

todas las etapas) con una valoración promedio de 3,8. También superan la media, compartiendo una valoración de 3,5 el área de Limpieza y recogida de basuras, Salud y Carreteras e infraestructuras.

Por otro lado, justo en la valoración promedio se sitúan los Servicios Sociales, dejando como peor valoradas las facetas de Seguridad ciudadana, Cultura y ocio, y, por último, el Transporte, en el que casi el 50% de las valoraciones se encuentran en los dos escalafones más bajos.

Se busca reflejar la representatividad de las respuestas sobre las valoraciones de cada servicio mediante la desviación típica. Resulta llamativo observar que la desviación aumenta conforme nos desplazamos a los servicios peor valorados, lo que puede indicar que las percepciones más negativas se focalizan desigualmente entre sectores de la sociedad. Únicamente el servicio de Carreteras presenta una desviación que incumple ese orden.

Tabla 3. Valoración del nivel de satisfacción con los Servicios Públicos

Valoración 1-5 (1= Nada satisfecho, 5= Muy satisfecho)	FR (%)					Media	Desv.
	1	2	3	4	5		
1. Educación (educación infantil, colegios, institutos, formación profesional o universitaria)	4,5	7,5	14,7	50,6	22,8	3,8	1,02
2. Limpieza y recogida de basuras	4,8	15	19,2	46,4	14,7	3,5	1,06
3. Red de carreteras e infraestructuras públicas	6,9	17,4	15,3	41,6	18,9	3,5	1,18
4. Salud (atención primaria, especializada, centros de salud, atención hospitalaria en su área de salud)	6,6	15,6	18,3	43,4	16,2	3,5	1,13
5. Sociales (apoyo a personas mayores, mujeres, jóvenes, inmigrantes, personas sin recursos, dependientes, con discapacidad, etc.)	7,8	19,2	21	39,8	12,3	3,3	1,14
6. Seguridad ciudadana	10,2	18,3	24	38	9,6	3,2	1,15
7. Cultura y Ocio (oferta cultural, bibliotecas, centros juveniles, de mujeres, de mayores...)	12	23,1	21,3	33,2	10,5	3,1	1,21
8. Transporte urbano e interurbano	18,9	29,9	17,4	26	7,8	2,7	1,25

Elaboración propia a partir de Encuesta a ciudadanos.

Valoraciones atendiendo a categorías sociodemográficas

En el Gráfico 1 se representan las diferentes valoraciones otorgadas a los servicios en función de las características de los encuestados. Con el objetivo de localizar posibles diferencias en los patrones de respuesta según los encuestados.

Atendiendo al sexo, el promedio de valoración de los SP de los hombres es superior al de las mujeres (3,39 y 3,25 respectivamente), presentando valoraciones similares en Salud, Limpieza y Educación; esta última es la única en la que las mujeres muestran una percepción superior a los hombres. Por el contrario, el resto de los servicios es notablemente mejor valorado por parte de los hombres. Llama la atención las diferencias acerca de 2 sectores en los que podemos intuir diferente nivel de uso en función del sexo, y como esto puede afectar a sus valoraciones, debiendo otorgar mayor representatividad a las valoraciones referentes a los usuarios más frecuentes: En el caso del Transporte público, las mujeres son las principales usuarias de este medio, en 2021 el 57% de los permisos de conducción Regionales correspondían a hombres, junto con una mayor complejidad de desplazamientos del sector femenino (Soto Villagrán, 2016), que provoca que el 53% de las encuestadas realicen a diario desplazamientos a otros municipios, frente al 44% de los hombres, debido a factores como la conciliación y a la reducción de la brecha salarial al desplazarse a municipios más densamente poblados demostrada en varios países (Almeida et al., 2022). Los Servicios sociales son mayormente demandados por mujeres, debido a la mayor vulnerabilidad y exclusión social, con un 58% de mujeres sobre el total de usuarios de estos servicios en la Región, en el año 2020, según el ministerio de Derechos sociales.

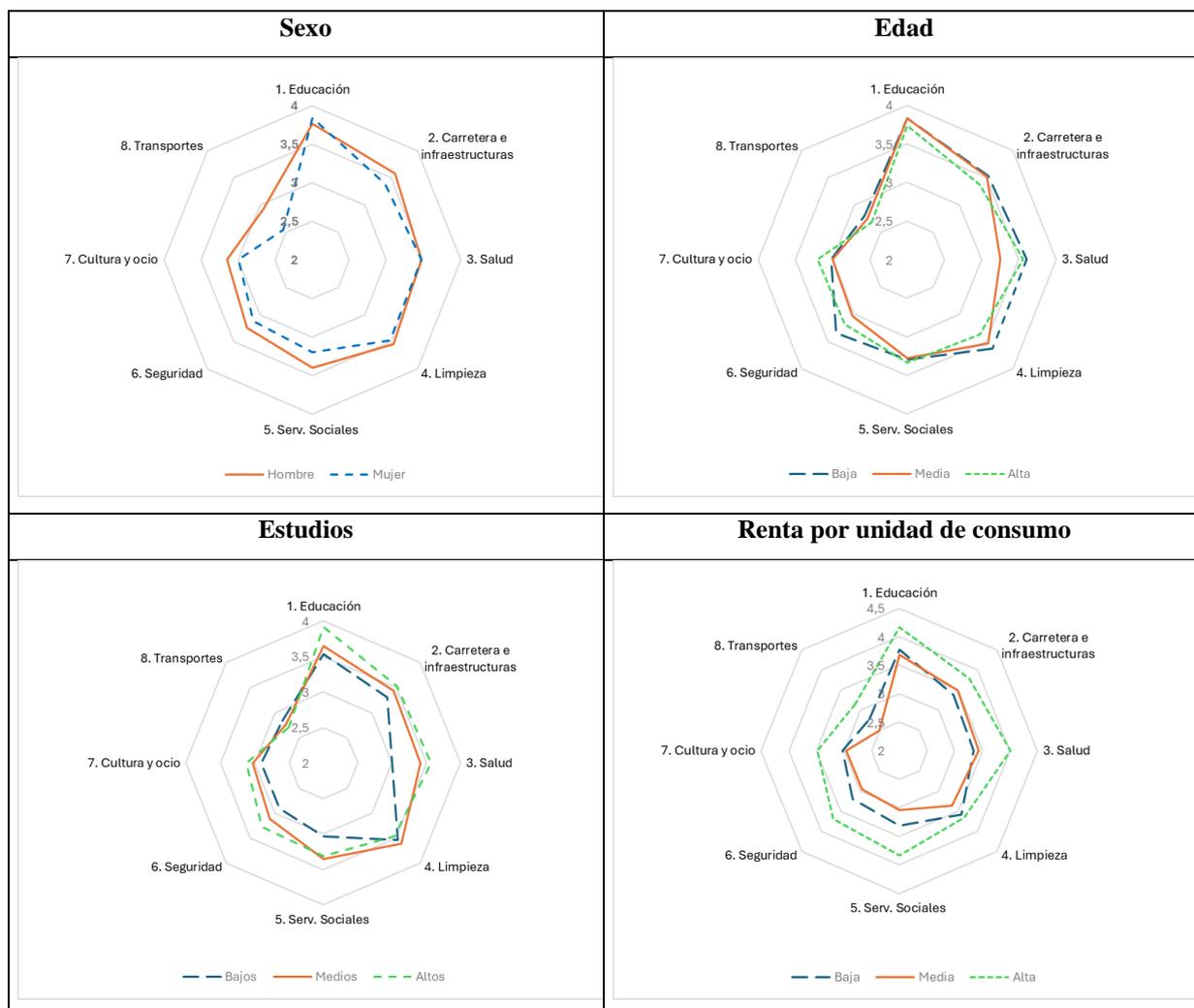


Figura 1. Valoración de los Servicios Públicos según características sociodemográficas

Elaboración propia a partir de Encuesta a ciudadanos.

En función de la edad, la población más joven valora mejor los servicios recibidos (3,38), en comparación con las edades intermedias y altas (3,27 y 3,30 respectivamente). Llama la atención la valoración superior de Cultura y ocio por parte de la población de mayor edad, a la vez que destaca la menor valoración del sector de mediana edad en Salud y Seguridad.

Al separar las respuestas según el nivel de estudios, se aprecia de manera general la mejor valoración del segmento con alto nivel educativo (3,36), ligeramente superior a los estudios medios (3,30), y sustancialmente por encima de los estudios bajos, con un 3,13 de media. Destaca la valoración sobre Educación del segmento con mayor nivel de estudios, ya que no se produce en este caso la relación inversa entre uso-valoración presentada anteriormente. Por otro lado, la población con menor nivel de estudios valora inferiormente servicios de Salud o Sociales, pudiendo inducir la relación negativa entre uso-valoración, ya que la población en riesgo de pobreza española en 2021 con estudios básicos (medida en términos relativos) triplicaba a la de estudios superiores.

Atendiendo a la renta por unidad de consumo¹, se observa de manera generalizada una mejor percepción de la población con alta renta, con 3,72 de media. Contrasta con el 3,33 de las personas con

¹ Se ha considerado: renta baja: inferior 500€, media: entre 500 € - 1000 €, alta: superior a 1000€. Medidas por unidad de consumo.

renta baja, y con la valoración notablemente inferior de la población de renta media (3,17). Las mayores diferencias se concentran en sectores de Salud, Infraestructuras y S. Sociales, mientras que Limpieza tiene una puntuación más homogénea. Llama la atención la baja valoración otorgada por las rentas medias muy baja en Transporte y S. Sociales.

Valoraciones atendiendo al municipio de residencia

Debemos reflejar de manera separada las valoraciones en función del municipio de residencia, ya que es donde se han observado mayores diferencias en las respuestas, por lo que se intuye que el municipio podría condicionar en gran medida la provisión pública recibida, determinando así la valoración otorgada. Así en el Gráfico 2 se muestran los niveles de percepción de calidad de los servicios recibidos, distinguiéndose entre población residente en los 4 tipos de municipios considerados: Urbanos, Intermedios, Rurales y R-12. En este caso los residentes de municipios urbanos presentan una mejor percepción de estos, con una valoración media de 3,5 puntos. Detrás le siguen el subgrupo R-12, con un 3,16. Finalmente, el total de los Rurales y los municipios Intermedios presentan unas similares valoraciones de 3,05 y 3,08 respectivamente.

Los encuestados que residen en municipios Urbanos presentan una valoración homogénea y francamente superior en su evaluación de los servicios de Transportes, cuya puntuación se reduce en gran medida para los otros municipios, no llegando al aprobado, y en Salud. Para el resto de SP, la valoración es superior, pero no tan distante. Los únicos servicios en el que la valoración es ligeramente menor o similar a otros municipios, es el de Limpieza y Seguridad.

Los habitantes de municipios Intermedios manifiestan una mayor variabilidad en las respuestas; las valoraciones se aproximan a los urbanos en Limpieza y en Educación (no habiendo evidencias para aceptar la igualdad de medias al 10% en esta última), mientras que muestran las principales carencias en servicios de Salud, Seguridad o Transporte, presentando en estos dos últimos las menores valoraciones. Se debe destacar la necesidad de un transporte público dinámico en estas zonas, ya que un 52% de los encuestados manifiesta desplazarse a diario a otros municipios. Estos municipios han focalizado la mayor parte de la atención en el desarrollo demográfico de la Ciudad de Murcia desde 1995, donde el desarrollo del centro histórico pasó a un segundo plano demográfico, para centrarse especialmente en la periferia Norte (Ciriquián y Vicente, 2014). Las carencias que parecen destacarse en este tipo de municipios, muestran dudas acerca de la sostenibilidad del crecimiento poblacional experimentado por las zonas intermedias, colindantes y desarrolladas alrededor de los principales núcleos económicos de Murcia y Cartagena, que cuentan con una alta densidad de población superior al umbral medio nacional del ámbito metropolitano, creciendo a día de hoy a un ritmo superior al de las entidades de la Región de mayor tamaño (Giménez García et al., 2020).

Los datos de la población de municipios Rurales evidencian una menor valoración de la calidad de los Servicios Públicos de manera generalizada, salvo en Seguridad y Limpieza. En la primera, no hay evidencias para aceptar la igualdad de valoraciones al 10%, mientras que en Limpieza encontramos el SP más homogéneo en valoración para los tres tipos de municipio, dado que el P. Valor de diferencia de medias es del 13%. Esto sugiere que las valoraciones son bastante compatibles con ser iguales. Existen marcadas diferencias en Salud, Educación e Infraestructuras, mientras que en Transporte se presenta una deficiente calificación, común en todos salvo en los urbanos.

Por último, el subconjunto de población encuestada residente en municipios R-12 muestra un patrón similar, pero ligeramente superior en todos los servicios, destacando una mayor diferencia en Salud, que en cualquier caso, dista de las valoraciones que la población de núcleos urbanos otorga a la calidad de los SP que reciben, con la salvedad ya mencionada de cierta equiparación en términos de servicios de Limpieza y Seguridad.

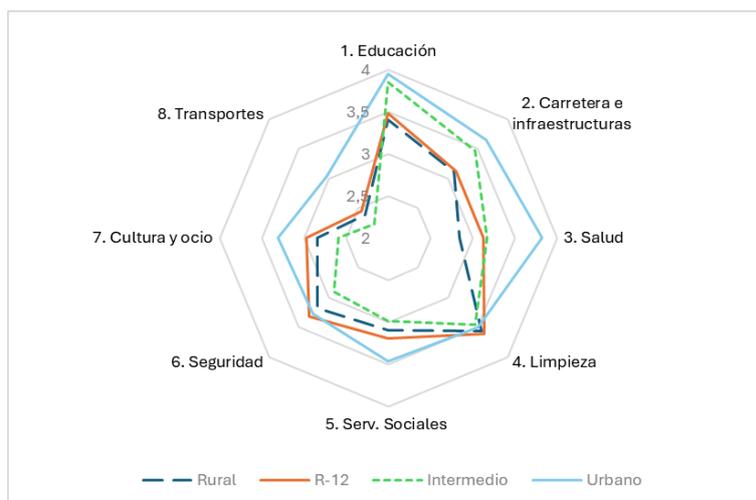


Figura 2. Valorcación de los Servicios Públicos según el tipo de municipio de residencia

Elaboración propia a partir de Encuesta a ciudadanos.

Conclusiones

Para finalizar, con la información anteriormente descrita, pese a ser limitada, se pueden aproximar las necesidades comunes y específicas de cada tipología de municipio de la Región: a) se identifican los servicios que presentan una mayor satisfacción, como Educación o Limpieza, a la vez que se muestra un mayor consenso en la insatisfacción sobre los servicios públicos de Transportes, motivado por la población de municipios más despoblados (R-12), Rurales e Intermedias. La variabilidad de las respuestas entre municipios Intermedios y Rurales acerca de las valoraciones del servicio de Transportes es estadísticamente significativa al 5%, en favor de una mayor varianza para las zonas rurales. Esto indica una robustez y representatividad de la puntuación otorgada en los municipios Intermedios. A su vez, no hay evidencias suficientes para afirmar una diferencia en la puntuación del servicio Transportes urbanos e interurbanos. b) Se observa como los servicios públicos peor valorados tienen una desviación mayor en las propias valoraciones, lo que indica que una mejora en estos debe abarcarse desde un plano particular a cada municipio o sector de la sociedad, no de manera lineal. c) De manera generalizada, se muestra un nivel de satisfacción mayor en la población Urbana con los Servicios Públicos que reciben, lo que corrobora la desigualdad existente con respecto al resto de municipios. Las desigualdades se acentúan en servicios como Salud o Transportes. Esto demuestra que el conjunto de población residente en municipios Intermedios/Rurales/R-12 de la Región de Murcia no cuenta con una provisión pública comparable a la que recibe o de la que se beneficia los residentes urbanos, en contra de medidas políticas que no han dado su fruto, estando contrastada la utilidad de estos servicios básicos en la conservación demográfica. Por último, también se obtienen algunas conclusiones acerca de la información personal del encuestado, identificándose una relación negativa aparente entre el uso y valoración de los servicios públicos (salvo en Educación), ya que se intuye un mayor nivel de uso de las mujeres en Transporte y Servicios sociales. También existe una mayor valoración de la población masculina, con mayor renta y nivel de estudios.

Concluyendo, la necesidad de una mejor provisión de la calidad de los Servicios Públicos básicos es obvia, pero desigual entre los territorios. Las carencias y dificultades existentes de vivir en municipios rurales o intermedios se reflejan en la encuesta, debiéndose mejorar la provisión pública de manera específica en determinados tipos de municipios, centrándose los esfuerzos del sector público en garantizar unos estándares de bienestar, con una más igualitaria provisión de servicios públicos básicos, primando los principios de igualdad y justicia social.

Agradecimientos

Al Consejo Económico y Social de la Región de Murcia (CESRM), por el apoyo recibido en el desarrollo del proyecto de OTRI-UMU, titulado: “Situación y retos de desarrollo de las zonas rurales en la Región de Murcia”.

Bibliografía

Almeida, E. R., Araújo, V., & Gonçalves, S. L. (2022). Urban wage premium for women: evidence across the wage distribution. *World Development*, 159, 106059.

Álvarez, J. L. D. (2020). El desigual acceso de la juventud rural a los servicios públicos: la necesidad de impulsar la educación en la España vaciada. *Cuadernos de investigación en juventud*, (8), 60-78.

Banco de España (2021). La distribución espacial de la población en España y sus implicaciones económicas. Capítulo 4, Informe Annual. Banco de España (BE). 2021. Madrid, Mayo, 271-318.

CES (2021). Un medio rural vivo y sostenible. Consejo Económico y Social de España. Informe 02|2021. Sesión extraordinaria del Pleno de 7 de julio. Madrid, 234 p.

Ciriquián, P. M., & Vicente, E. M. (2014). La transformación urbana y territorial de la ciudad de Murcia y su entorno (1977-2010). *Estudios geográficos*, 75(276), 261-309.

Colino Sueiras J. y Martínez-Carrasco Pleite F. (dir.); Losa Carmona, A.; Martínez Paz, JM.; Pérez Morales, A. y Albadalejo García J.A. (2022). Las zonas rurales en la Región de Murcia. Consejo Económico y Social de la Región de Murcia (CESRM). 398 p.

Fayrén, J. G. (1993). Distribución de la Población en el municipio de Murcia 1981-1991. *Papeles de Geografía*, (19), 81-89.

Giménez García, R., García Marín, R., & Serrano Martínez, J. M. (2020). Evolución de la población y modelo de poblamiento en la aglomeración urbana de Murcia.

Goerlich, F.J., J. Maudos y S. Mollá (2021). Distribución de la población y accesibilidad a los servicios en España. Monografías, Fundación Ramón Areces e Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas (IVIE). Madrid, 160 p.

MPTFP (2019). Estrategia nacional frente al reto demográfico: Directrices generales. Ministerio de Política Territorial y Función Pública. 2019. Madrid, 17 p.

Pinilla, V., & Sáez, L. A. (2017). La despoblación rural en España: génesis de un problema y políticas innovadoras. *Informes CEDDAR*, 2, 1-24.

Pizarro, J. E. (2012). El valor de los servicios educativos y sanitarios en los procesos de atracción y mantenimiento de población en medio rural. *Ager. Revista de estudios sobre despoblación y desarrollo rural*, (13), 11-51.

Soto Villagrán, P. (2016). Repensar el hábitat urbano desde una perspectiva de género. *Debates, agendas y desafíos. Andamios*, 13(32), 37-56.

Prototipo analítico para el proceso de extracción de aceite de lechuga cultivada por método hidropónico con fines industriales

J. E. Tierradentro Cruz¹, J. M. Méndez Sayago² y G. Vera Rizzo³

¹ Fundación Universitaria del Área Andina, 110221, Bogotá, Colombia, jt ierradentro3@areandina.edu.co

² Fundación Universitaria del Área Andina, 110221, Bogotá, Colombia, jmendez97@areandina.edu.co

³ Fundación Universitaria del Área Andina, 110221, Bogotá, Colombia, gvera6@areandina.edu.co

Resumen

En esta investigación se desarrolló un prototipo analítico para optimizar el proceso de extracción de aceites esenciales de *Lactuca sativa* (lechuga) cultivada mediante métodos hidropónicos, con un enfoque en aplicaciones industriales dentro del sector cosmético. Tras evaluar diversos sistemas hidropónicos, se determinó que el sistema NFT (Nutrient Film Technique) es el más eficiente en términos de uso de agua, espacio y rendimiento para el cultivo de lechugas. Para la extracción de aceites esenciales, el método de arrastre de vapor se identificó como el más adecuado, ya que preserva la integridad de los compuestos bioactivos y minimiza el consumo energético. La investigación se centra en el desarrollo de un modelo de simulación con FlexSim, diseñado para analizar y optimizar el proceso de extracción a escala industrial. Los resultados muestran que este enfoque no solo es técnicamente viable, sino que también ofrece importantes ventajas en términos de sostenibilidad y eficiencia para la producción de ingredientes naturales en la industria cosmética. El modelo propuesto constituye una herramienta esencial para la planificación y mejora continua de procesos en la producción de aceites esenciales de lechuga.

Palabras clave: Hidroponía, Aceites esenciales, Lechuga, Industria cosmética, Simulación de procesos

Analytical prototype for the extraction process of lettuce oil cultivated by hydroponic method for industrial purposes

Abstract

In this research, an analytical prototype was developed to optimize the extraction process of essential oils from *Lactuca sativa* (lettuce) cultivated using hydroponic methods, with a focus on industrial applications within the cosmetic sector. After evaluating various hydroponic systems, it was determined that the NFT (Nutrient Film Technique) system is the most efficient in terms of water usage, space, and yield for lettuce cultivation. For the extraction of essential oils, the steam distillation method was identified as the most suitable, as it preserves the integrity of bioactive compounds and minimizes energy consumption. The research focused on developing a simulation model with FlexSim, designed to analyze and optimize the extraction process on an industrial scale. The results show that this approach is not only technically viable but also offers significant advantages in terms of sustainability and efficiency for the production of natural ingredients in the cosmetic industry. The proposed model constitutes an essential tool for the planning and continuous improvement of processes in the production of essential oils from lettuce.

Keywords: Hydroponics, Essential oils, Lettuce, Cosmetic industry, Process simulation

Introducción

La creciente demanda de productos cosméticos naturales y sostenibles ha impulsado a la industria a explorar fuentes innovadoras de materias primas que no solo cumplan con las expectativas de los consumidores en términos de calidad, sino que también minimicen el impacto ambiental de los productos. En este contexto, la lechuga (*Lactuca sativa*), cultivada mediante técnicas hidropónicas, ha emergido como una opción viable y prometedora, destacándose por su alto contenido de compuestos bioactivos y antioxidantes esenciales para la formulación de productos cosméticos de alta calidad (Sánchez, 2023). A diferencia de la agricultura convencional, la hidroponía permite un control

exhaustivo sobre las condiciones de crecimiento, garantizando plantas más saludables y libres de contaminantes—atributos de gran relevancia en la industria cosmética (Gutiérrez et al., 2023).

El cultivo hidropónico también presenta ventajas significativas en cuanto a su adaptabilidad en entornos urbanos y periurbanos, lo que contribuye a la reducción de la huella de carbono derivada del transporte de materias primas desde zonas rurales. Esta característica cobra especial relevancia en un mercado donde la sostenibilidad no solo es un valor agregado, sino un requisito indispensable para las empresas que buscan mantener su competitividad en el ámbito global (Min et al., 2023). Además, el uso eficiente del agua y la reducción en la aplicación de pesticidas y fertilizantes químicos hacen del cultivo hidropónico una opción alineada con las crecientes exigencias regulatorias y las demandas de los consumidores por prácticas agrícolas más responsables (Montatixe & Eche, 2021).

La transparencia y trazabilidad en los ingredientes se han convertido en factores clave en el mercado cosmético contemporáneo. Los consumidores no solo exigen eficacia en los productos, sino también garantías sobre la ética y sostenibilidad en su producción. La hidroponía, al tratarse de un sistema cerrado y controlado, ofrece la posibilidad de rastrear cada etapa del cultivo, desde la semilla hasta el producto final, lo que fortalece la confianza del consumidor en la marca (López, 2022). Esta capacidad para cumplir con las exigencias de sostenibilidad, calidad y trazabilidad sitúa a la lechuga hidropónica como un ingrediente estratégico para el futuro de la cosmética.

Además, el cultivo hidropónico no solo garantiza un control preciso sobre la calidad y pureza de los ingredientes, sino que también reduce de manera significativa el uso de recursos naturales como el agua y el suelo, disminuyendo así la huella ecológica de los productos cosméticos. Este enfoque hacia la sostenibilidad es particularmente relevante en un contexto donde las empresas están bajo una creciente presión para adoptar prácticas más ecológicas. Al incorporar la hidroponía en la producción de ingredientes cosméticos, las marcas no solo satisfacen las expectativas de los consumidores, sino que también se posicionan como líderes en innovación y responsabilidad ambiental en el mercado global (López, 2022).

Esta investigación se enmarcó dentro de un enfoque aplicado con un diseño experimental y comparativo, combinando métodos cualitativos y cuantitativos con el propósito de desarrollar un modelo para la extracción de aceites esenciales de lechuga (*Lactuca sativa*) cultivada mediante técnicas hidropónicas, orientado a su aplicación en la industria cosmética. A través de una exhaustiva revisión bibliométrica, se identificaron y seleccionaron los métodos de extracción más eficientes, evaluando la pureza del aceite, el rendimiento del proceso y su viabilidad comercial. Además, se analizaron distintos sistemas hidropónicos, destacando el sistema NFT (Nutrient Film Technique) por su alta eficiencia en el uso del agua y el espacio, lo que lo hacía ideal para la producción a gran escala de lechuga. La fase experimental incluyó el desarrollo de un prototipo físico y su simulación en FlexSim, lo que permitió ajustar variables clave como el tiempo de extracción y el consumo de energía, optimizando así la operación y garantizando la eficiencia y sostenibilidad en la producción a escala industrial. Este enfoque metodológico integrado aseguró que el modelo desarrollado fuera tanto teóricamente robusto como práctico, proporcionando una solución eficiente y sostenible para la extracción de aceites esenciales, potenciando la competitividad e innovación en la industria cosmética.

Materiales y Métodos

La investigación se enmarcó dentro de un enfoque aplicado con un diseño experimental y comparativo, que combinó un enfoque mixto, integrando tanto métodos cualitativos como cuantitativos. El objetivo principal fue desarrollar y validar un prototipo para la extracción de aceites esenciales de lechuga (*Lactuca sativa*) cultivada mediante sistemas hidropónicos, con aplicaciones industriales en la industria cosmética.

En la primera fase, de carácter cualitativo, se realizó una revisión bibliométrica exhaustiva de los métodos de extracción de aceites esenciales y de los sistemas hidropónicos disponibles. Este análisis permitió identificar y seleccionar los métodos de extracción más eficientes, evaluando aspectos como la pureza del aceite, el rendimiento del proceso y la viabilidad comercial. Asimismo, se compararon

diversos sistemas hidropónicos—incluyendo NFT (Nutrient Film Technique), aeropónico, flujo y reflujos, raíz flotante y riego por goteo—destacando el sistema NFT por su alta eficiencia en el uso del agua y del espacio, lo que lo hizo ideal para la producción a gran escala de lechuga destinada a la extracción de aceites esenciales.

La fase experimental, de naturaleza cuantitativa, se centró en el desarrollo de un prototipo analítico tanto físico como simulado en FlexSim. El prototipo físico del sistema NFT fue construido utilizando materiales como tubos de PVC, bombas de agua y sistemas de soporte, diseñado para alojar 18 plantas en un entorno controlado. Paralelamente, se implementó un modelo en FlexSim para simular el proceso de extracción, ajustando variables como el tiempo de extracción, el consumo de energía y la eficiencia global del proceso.

La validación del prototipo incluyó la medición y el análisis cuantitativo de variables clave como el rendimiento del cultivo, la pureza del aceite extraído y el consumo de recursos. Los resultados obtenidos del modelo en FlexSim fueron comparados con los datos del prototipo físico, lo que permitió realizar ajustes para optimizar la operación.

Este enfoque metodológico, que integró métodos cualitativos y cuantitativos, aseguró que el prototipo desarrollado fuera tanto teóricamente sólido como práctico y aplicable a nivel industrial, ofreciendo una solución eficiente y sostenible para la extracción de aceites esenciales de lechuga cultivada mediante métodos hidropónicos.

Resultados y Discusión

La práctica del cultivo de plantas ha sido una base esencial de la agricultura a lo largo de la historia, pero ha experimentado transformaciones significativas en respuesta a las demandas contemporáneas. Con el aumento en la demanda de productos cosméticos libres de químicos y contaminantes, han surgido métodos innovadores orientados a la producción sostenible de cultivos. Esta necesidad creciente ha impulsado la evolución de la agricultura hacia técnicas más sostenibles, destacándose el uso de fuentes naturales como la hidroponía. Aunque el cultivo en suelo ha sido el método predominante durante milenios, la hidroponía se ha convertido en una alternativa cada vez más popular y reconocida debido a su eficacia en el uso del agua y del espacio, así como a sus ventajas en la optimización de recursos y el control de las condiciones de crecimiento. La Tabla 1 destaca las diferencias clave entre estos métodos de cultivo, proporcionando una base informativa para la toma de decisiones en la agricultura hidropónica.

Tabla 1. *Cultivo tradicional vs cultivo hidropónico*

Tradicional	Hidropónico
Infertilidad y pérdida de nutrientes por cada cosecha	Control de los nutrientes dependiendo la necesidad
Suelos con químicos por insecticidas y esterilizadores	Control de plagas y microbios sin necesidad de químicos
Requiere una gran extensión de tierra para su cultivo	Permite cultivar en espacios reducidos
Estrés hídrico por deficiente cuantificación en el riesgo	No hay estrés hídrico al ser de riego continuo
El crecimiento del cultivo depende en gran medida de factores naturales	Los factores naturales no afectan el crecimiento del cultivo
Los nutrientes provienen de la fertilización, calidad del suelo y su capacidad de retención	Los nutrientes se suministran directamente a las raíces en una solución controlada

El cultivo hidropónico presenta ventajas significativas sobre la agricultura tradicional, particularmente en la eficiencia del uso de recursos. Según (Albuja et al., 2021) subrayan que los sistemas hidropónicos eliminan la necesidad de suelo y reducen considerablemente el consumo de agua al emplear soluciones

nutritivas recirculadas. Este enfoque minimiza el desperdicio de agua y asegura que las plantas reciban los nutrientes necesarios de manera constante, lo que no solo mejora la eficiencia del cultivo, sino que también reduce la susceptibilidad a problemas como la erosión y la contaminación por pesticidas, frecuentes en la agricultura convencional.

Además, la hidroponía es especialmente beneficiosa en entornos urbanos donde el espacio es limitado. Como mencionan (Albuja et al., 2021) y (Saldaña & Olvera, 2023), los sistemas hidropónicos pueden implementarse en configuraciones verticales, optimizando el uso del espacio y permitiendo una mayor densidad de cultivos en áreas reducidas. Esta característica, junto con la posibilidad de automatizar y controlar con precisión las condiciones de crecimiento, convierte a la hidroponía en una opción preferible y sostenible para la producción de alimentos y otros productos vegetales en comparación con los métodos agrícolas tradicionales. La Figura 1 muestra varias diferencias clave entre el cultivo hidropónico y el cultivo tradicional en términos de área de siembra, tiempo de producción y consumo de agua.

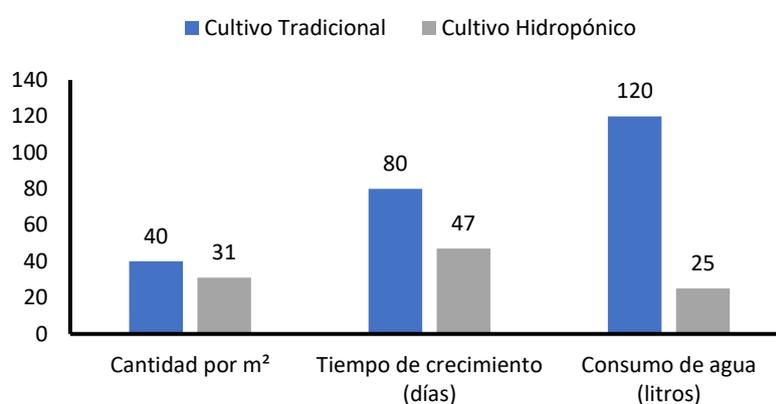


Figura 1. Diferencias entre cultivo tradicional e hidropónico

En términos de consumo de agua, el sistema hidropónico ofrece una ventaja significativa. Mientras que el cultivo tradicional utiliza una cantidad considerable de agua, con 120 litros por ciclo de cultivo, gran parte de esta se pierde al filtrarse a través del suelo sin ser aprovechada por las plantas. En cambio, el sistema hidropónico, al recircular el agua continuamente, logra un ahorro significativo, utilizando solo 25 litros, lo que representa una reducción de aproximadamente el 95% en el uso del agua. Además, el tiempo de crecimiento de las plantas es notablemente menor en los sistemas hidropónicos, donde se requieren 47 días en comparación con los 80 días necesarios en el cultivo tradicional. Aunque la cantidad de plantas por metro cuadrado es mayor en el cultivo tradicional (40 plantas frente a 31 en hidroponía), la eficiencia general del sistema hidropónico en términos de recursos y tiempo lo hace una opción más sostenible y efectiva.

En este contexto, el sistema NFT (Nutrient Film Technique) es un método hidropónico altamente eficiente donde las raíces de las plantas se sumergen en una fina lámina de solución nutritiva que contiene nutrientes esenciales como el magnesio, crucial para la fotosíntesis. Este sistema es ideal para cultivos como espinacas, lechugas y acelgas, asegurando un contacto constante con los nutrientes para un crecimiento óptimo (Sánchez, 2023). El sistema de cultivo aeropónico, por su parte, suspende las raíces en el aire y las rocía periódicamente con una solución nutritiva, optimizando la absorción de oxígeno y nutrientes. Este sistema requiere de atomizadores de alta presión y un sustrato específico para sostener el crecimiento vegetativo, utilizando tecnología avanzada para monitorear y cuantificar el desarrollo de las plantas (Min et al., 2023).

El sistema de flujo y reflujos, conocido como "ebb and flow", cultiva plantas en macetas con sustrato en un depósito que se llena y drena periódicamente con solución nutritiva. Este ciclo de riego asegura la absorción de nutrientes y la oxigenación de las raíces, siendo una alternativa que debe evaluarse en comparación con el sistema NFT en términos de eficiencia y rendimiento (Doty et al., 2020). El sistema

de raíz flotante permite que las plantas crezcan sobre una solución nutritiva, utilizando una placa de poliestireno. Este método facilita la liberación de nutrientes mediante la degradación de sustancias orgánicas y es particularmente efectivo para cultivos como la lechuga, donde el riego y la oxigenación se controlan automáticamente para optimizar el crecimiento (Pertierra & Gonzabay, 2020). Y el sistema de riego por goteo se destaca por su precisión en la aplicación de agua y nutrientes, lo que minimiza el desperdicio y optimiza la absorción por parte de las plantas. Este sistema es versátil y se adapta a una variedad de cultivos hidropónicos, mejorando la producción y reduciendo el riesgo de enfermedades gracias a la integración de un sistema de filtrado y dispositivos de control (Castro et al., 2020).

El análisis estadístico de los diferentes sistemas hidropónicos, considerando tres factores clave, se presenta en las figuras correspondientes. La Figura 2 evalúa los costos asociados al montaje y cultivo de lechugas hidropónicas por unidad, la Figura 3 analiza el rendimiento del proceso de cultivo, y la Figura 4 muestra la eficiencia en el uso del agua y la eficiencia de los diferentes tipos de sistemas hidropónicos.

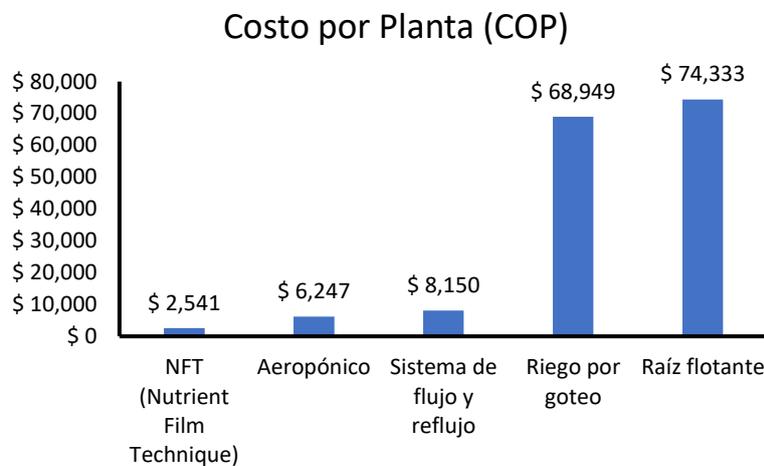


Figura 2. Análisis de costos y montaje de sistemas hidropónicos para el cultivo de lechugas

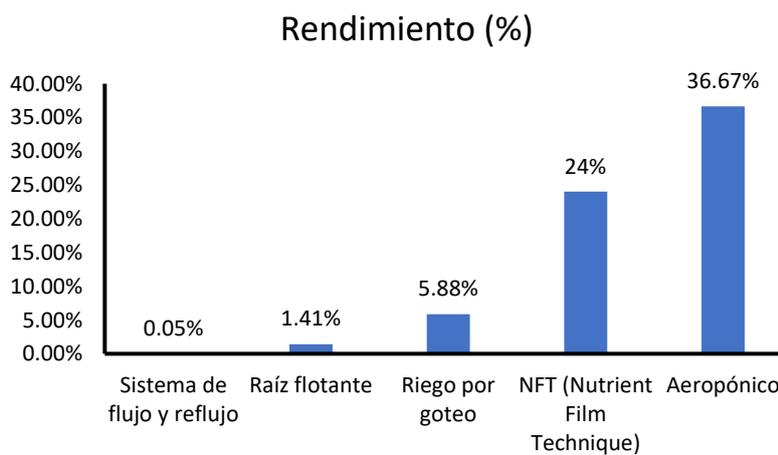


Figura 3. Rendimiento del proceso de sistema hidropónico para el cultivo de lechugas

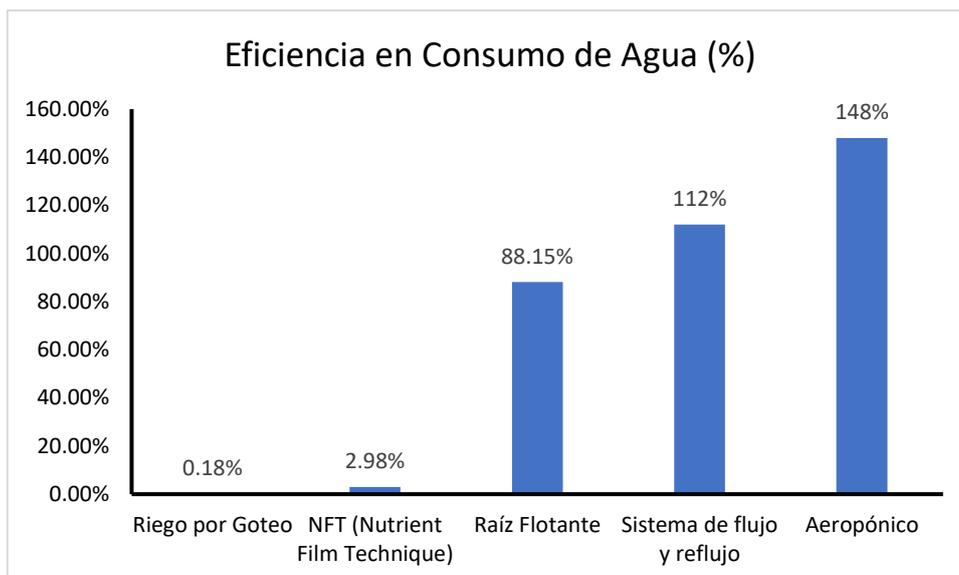


Figura 4. Análisis de eficiencia del consumo de agua en el procesamiento y montaje de un sistema hidropónico para el cultivo de lechugas

El análisis de costos unitarios para el cultivo de lechuga en diferentes sistemas hidropónicos, revelado en la Figura 2, muestra que el sistema NFT es el más rentable, con un costo por planta de 2.541 COP. Este sistema se destaca por su bajo costo de producción en comparación con otros métodos, como el aeropónico, que tiene un costo de 6.247 COP por planta, y el de flujo y reflujo, que alcanza los 8.150 COP por planta. Otros sistemas, como el de riego por goteo y el de raíz flotante, presentan costos aún más altos, situándose en 68.949 COP y 74.333 COP por planta, respectivamente, lo que los convierte en opciones menos viables en términos de rentabilidad (Arredondo & Motta, 2022; Pertierra & Gonzabay, 2020; Porras & Basantes, 2021).

En cuanto al rendimiento, la Figura 3 destaca que, aunque el sistema NFT se presenta como una opción económica, los sistemas hidropónicos deben evaluarse no solo por su costo, sino también por su capacidad para maximizar la producción en un espacio limitado. El rendimiento, entendido como la cantidad de lechugas producidas por unidad de área, es un factor crucial para determinar la viabilidad de cada sistema. Aunque el rendimiento específico de cada sistema no se detalla en los estudios, el sistema NFT, con su bajo costo y diseño eficiente, podría ofrecer un rendimiento competitivo, especialmente en condiciones donde el espacio es un recurso limitado (Martinez, 2023)

La eficiencia en el consumo de agua es un criterio esencial para determinar la sostenibilidad de los sistemas hidropónicos, como se evidencia en la Figura 4. El sistema aeropónico se destaca con una eficiencia del 148%, lo que lo convierte en el más eficiente en términos de uso de agua, aunque con un costo de producción más elevado. Por otro lado, el sistema NFT muestra una eficiencia del 2,98%, lo que, combinado con su bajo costo, lo posiciona como una opción equilibrada en términos de eficiencia y rentabilidad. Sin embargo, sistemas como el de riego por goteo y el de raíz flotante, a pesar de su eficiencia en el uso de agua, presentan costos tan altos que su viabilidad económica queda comprometida (Arredondo & Motta, 2022; Gutiérrez & Pacari, 2023; Martinez, 2023).

El uso del suelo en los métodos de cultivo tradicional está estrechamente vinculado a su degradación, influenciada por factores como el color del suelo, la topografía y el tipo de erosión. La principal causa de contaminación se atribuye al uso excesivo de agroquímicos, mientras que la topografía, especialmente en terrenos con pendientes pronunciadas, acelera la erosión y agota los nutrientes del suelo, afectando su fertilidad y la biodiversidad (Montatixe & Eche, 2021). Esta evaluación resalta la importancia de adoptar métodos más sostenibles, como los sistemas hidropónicos, que, como se ha mencionado, optimizan el uso de recursos y minimizan el impacto ambiental, integrando eficiencia en el consumo de agua y menores costos operativos, tal como se destaca en la Figura 4.

En la actualidad, la extracción de aceites se ha vuelto una práctica esencial para maximizar los beneficios que ofrecen las plantas. Por ello, esta investigación se enfocó en desarrollar un modelo de proceso de extracción de aceites esenciales para la industria cosmética, utilizando plantas cultivadas mediante métodos hidropónicos. Se seleccionó *Lactuca sativa*, comúnmente conocida como lechuga, debido a sus notables propiedades antioxidantes y revitalizantes, que son altamente valoradas en la industria cosmética.

En este contexto, se presentará la Tabla 2, que contiene una descripción de los métodos de extracción de aceites esenciales disponibles, con el objetivo de seleccionar el enfoque más adecuado y eficiente para la extracción de aceites esenciales de lechuga cultivada mediante métodos hidropónicos, optimizando así su potencial dentro de la industria cosmética.

Tabla 2. Descripción de métodos de extracción de aceites esencial de lechuga

Método de Extracción	Descripción
I. Extracción por Destilación al Vapor	La destilación por arrastre de vapor es un método utilizado ampliamente en la industria para la extracción de aceites esenciales. Este proceso implica la vaporización del agua que pasa a través del material vegetal, arrastrando los compuestos volátiles. Aunque este método es eficaz para una amplia gama de materiales, tiene la desventaja de requerir un tiempo prolongado de extracción y grandes cantidades de material vegetal para obtener cantidades pequeñas de aceite, especialmente en plantas con bajo contenido de aceites como la lechuga. (Morán et al., 2021)
II. Extracción de Aceites Esenciales por Hidrodestilación	Este método se realiza sumergiendo la materia prima en agua, que luego se calienta hasta la ebullición, generando vapor que arrastra los aceites esenciales hacia un condensador. Es un método adecuado para plantas con compuestos más sensibles, ya que permite un control preciso del proceso, aunque puede ser menos eficiente en términos de rendimiento cuando se comparan con métodos más modernos como la hidrodestilación asistida por microondas o ultrasonido. (Gutiérrez et al., 2023)
III. Extracción por Prensado en Frío	El prensado en frío es un método mecánico de extracción que se realiza a baja temperatura, preservando la integridad de compuestos sensibles al calor como los ácidos grasos esenciales y antioxidantes. Este método es más común en frutas cítricas y puede no ser adecuado para todos los tipos de material vegetal debido a su rendimiento relativamente bajo, lo que limita su aplicabilidad en plantas como la lechuga, donde los rendimientos de aceite esencial son ya de por sí bajos. (Leonardo & Veliz, 2022)
IV. Hidrodestilación Asistida por Celulasa	Esta técnica avanzada combina la hidrodestilación con el uso de enzimas como la celulasa, que ayuda a romper las paredes celulares de las plantas, facilitando la liberación de aceites esenciales. Esto no solo reduce significativamente el tiempo de extracción, sino que también aumenta el rendimiento del proceso. Es especialmente útil para materiales vegetales con estructuras celulares complejas como la lechuga, donde la extracción tradicional podría resultar ineficiente. (Perović et al., 2024)

Tabla 3. Comparativa de Métodos de Extracción de Aceites Esenciales de Lechuga

Método de Extracción	Descripción	Eficiencia de Extracción	Tiempo Requerido	Costos Asociados (USD)	Impacto Ambiental	Observaciones Relevantes	Aplicaciones Comunes
Destilación por Arrastre de Vapor	El vapor pasa a través del material vegetal, arrastrando los compuestos volátiles hacia un condensador. Utiliza un matraz, una fuente de agua calentada y un condensador.	Alta (2.5% - 3%)	Optimizado con empaquetado adecuado	2000	Moderado consumo de agua y energía	Preserva aromas y sabores característicos; ideal para productos cosméticos	Cosmética, perfumería, industria alimentaria
Hidrodestilación	La materia vegetal se sumerge en agua caliente, y el vapor generado arrastra los aceites hacia un condensador	Media a alta (1.36% - 2.73%)	Medio (1-4 horas)	1500	Consumo de agua y energía moderado	Menor preservación de aromas, pero control preciso de compuestos	Industria cosmética y alimentaria
Prensado en Frío	Extracción mecánica a baja temperatura para preservar antioxidantes y ácidos grasos	Baja	Corto (minutos)	800	Bajo impacto, sin químicos	Limitado a frutas cítricas y no aplicable para la lechuga	Aceites esenciales de frutas
Hidrodestilación Asistida por Microondas	Uso de microondas para calentar de forma uniforme y rápida	Alta	Corto	3000	Menor consumo energético	Alta eficiencia en hierbas, pero menos práctico para hojas delicadas	Extracción de aceites de hierbas delicadas
Hidrodestilación Asistida por Ultrasonido	Emplea vibraciones ultrasónicas para liberar aceites esenciales	Alta	Muy corto	2500	Reducción del uso de solventes	Aumenta el rendimiento, pero requiere equipo especializado	Uso farmacéutico y cosmético
Hidrodestilación Asistida por Celulasa	Combina enzimas que rompen las paredes celulares con hidrodestilación	Alta	Muy corto	2800	Moderado	Mejora el rendimiento en materiales difíciles como la lechuga	Industria cosmética

El método seleccionado como más apropiado en esta investigación es la destilación por arrastre de vapor, debido a sus ventajas experimentales para la extracción de aceites esenciales de lechuga. Este enfoque facilita la obtención de compuestos volátiles esenciales para la industria cosmética, preservando los aromas y sabores característicos del material vegetal, lo que lo hace ideal para aplicaciones en productos cosméticos y de perfumería (Morán et al., 2021). Aunque inicialmente se esperaba que su tiempo de extracción fuera más largo, la experimentación demostró que un empaquetado adecuado del material vegetal optimiza el flujo de vapor y mitiga los inconvenientes relacionados con la duración del proceso (Perović et al., 2024). Comparado con la hidrodestilación, este método destaca por su capacidad de preservar la calidad aromática del aceite, haciéndolo más adecuado para cosméticos específicos (Gutiérrez & Pacari, 2023).

Como se muestra en la Tabla 3, la destilación por arrastre de vapor se destaca por su capacidad de optimización del flujo de vapor y su habilidad para preservar los compuestos aromáticos, lo que le otorga una ventaja competitiva sobre otros métodos. A diferencia de la hidrodestilación, que tiene una eficiencia media a alta pero menor preservación de aromas, y de los métodos asistidos por microondas o ultrasonido, que implican mayores costos y requerimientos tecnológicos, la destilación al vapor presenta un equilibrio entre eficiencia, accesibilidad y calidad final del producto (Gutiérrez & Pacari, 2023).

A través de Flexsim se realiza un prototipo analítico del proceso de extracción de aceites esenciales de la Lechuga, desde la recepción de las Lechugas cultivadas a través de una granja hidropónica hasta el proceso de extracción del aceite esencial de la Lechuga, este prototipo pretende procesar 400 muestras de aceite esencial.

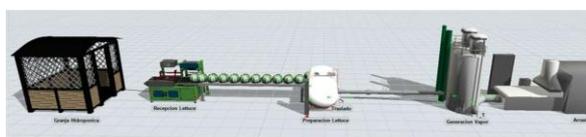


Figura 5. Fase 1 del proceso de extracción: recepción de la lechuga, introducción en el equipo de extracción y generación de vapor



Figura 6. Fase 2 del proceso de extracción en FlexSim: destilación, mezclado, condensado y recolección de aceites esenciales

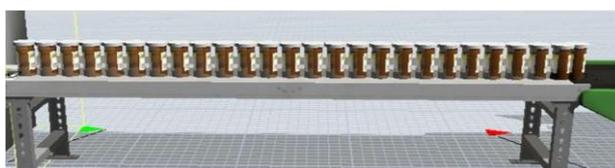


Figura 7. Etapa de envasado en Flexsim

El proceso de extracción de aceite de lechuga mediante arrastre de vapor se desarrolla en varias etapas. Primero, se lleva a cabo la recepción de la lechuga fresca proveniente de la granja hidropónica, que luego es introducida en un equipo de extracción donde se descompone para facilitar la liberación de los aceites esenciales, como se muestra en la Figura 5. A continuación, se genera vapor de agua que atraviesa la lechuga, arrastrando consigo los aceites esenciales. Este vapor, cargado de compuestos volátiles, pasa por una etapa de destilación, en la cual se separan los componentes no deseados, seguido por un proceso de mezclado y enfriamiento en un condensador que provoca la condensación del vapor, permitiendo así la recolección de los aceites esenciales purificados, como se ilustra en la Figura 6. Finalmente, el proceso concluye con la etapa de envasado de los aceites esenciales, que garantiza la preparación adecuada del producto para su uso en la industria cosmética, tal como se observa en la Figura 7.

En la simulación en FlexSim, se modelan estas etapas junto con la configuración de parámetros relevantes. La ejecución de la simulación permite observar el flujo del proceso y analizar los resultados para mejorar el rendimiento y la eficiencia del sistema de extracción de aceites esenciales.

Con el prototipo, se llegó a un primer acercamiento donde se identificó que para producir 12.000 ml de extracto de lechuga se requieren 133 lechugas, obteniendo 400 unidades de extracto de lechuga. Este hallazgo plantea una oportunidad para maximizar la eficiencia y la productividad en la granja hidropónica.

De acuerdo con la investigación realizada y analizando los diferentes métodos de cultivos hidropónicos frente al crecimiento de la *Lactuca sativa* para la industria cosmética, se ejecutó el análisis de cinco sistemas hidropónicos: el sistema NFT, el sistema aeropónico, el sistema de flujo y reflujo, el sistema de raíz flotante y el sistema de goteo.

El prototipo seleccionado se fabricó utilizando un tubo de PVC de 4 pulgadas y 1/2 pulgada, una brida, un balde, 18 canastas pequeñas y una bomba de 2.900 L/h con un voltaje de 110v. Este prototipo tiene la capacidad para albergar 18 plantas y cuenta con una altura de 1,80 m, como se muestra en la Figura 8 y en el esquema técnico de la Figura 9.



Figura 8. Prototipo físico de granja hidropónica vertical (Sistema NFT)

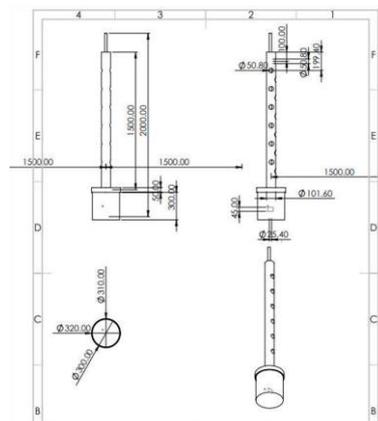


Figura 9. Esquema técnico del prototipo de granja hidropónica vertical (Sistema NFT)

Se evidenció que el sistema NFT posee altos beneficios en el cultivo de lechugas, ya que resulta ser un método con un gran rendimiento en el consumo y minimización del uso del agua. Además, es un sistema que posee una alta capacidad para ahorrar espacio, permitiendo generar cultivos densos con más plantaciones de lechuga (Muhamad Zaid et al., 2023). También es un sistema de fácil mantenimiento, ya que permite retirar el agua reutilizada con facilidad. En este tipo de sistema, las raíces de las plantas están constantemente expuestas al oxígeno del aire, lo que promueve un crecimiento saludable, además de permitir un suministro directo de los nutrientes con el agua. Este tipo de sistema resulta ser positivo para la obtención de cultivos de manera eficiente.

En cuanto a los sistemas de extracción, se ejecutó un estudio entre cuatro métodos: extracción por arrastre de vapor, hidrodestilación, extracción por prensado e hidrodestilación asistida por celulasa.

Se identificó que el sistema de extracción más recomendable para la extracción de aceites de la lechuga para la generación de productos cosméticos es la extracción por arrastre de vapor. Este método permite una extracción más eficiente en la calidad de los compuestos, ya que preserva los componentes de la lechuga, evitando su degradación o pérdida de propiedades, y garantiza versatilidad en la escala de producción, pudiendo utilizarse tanto en laboratorios como en procesos industriales. Además, se destaca por requerir un consumo de energía más bajo en comparación con los demás métodos, que requieren altas temperaturas y mayores costos.

Este proceso de extracción por arrastre de vapor permite obtener aceites esenciales de lechuga que pueden utilizarse en una variedad de aplicaciones, como la aromaterapia, la industria alimentaria y la cosmética. Es importante destacar que este proceso requiere de equipos especializados y un control

preciso de las condiciones de temperatura y presión para garantizar la eficiencia y seguridad del producto final.

A continuación, en la Figura 10 se presenta el diagrama de cómo sería la distribución del proceso y sus respectivos tiempos en condiciones industriales. El tiempo de proceso del extracto de aceite de lechuga requiere de 8 horas para la plantación de las semillas. Posteriormente, se dedican 38 días (912 horas) para la germinación de la lechuga. La recolección toma 1 hora, seguida de 1 hora para la limpieza y desinfección. Además, se emplean 10 minutos para el centrifugado y 4 horas para la destilación del aceite esencial de la lechuga. Luego, se dedican 15 minutos para la mezcla y 2 horas para el condensado del aceite. Finalmente, se requiere de 1 hora para el envasado del producto final que se muestra en la Figura 11, que contiene el extracto de lechuga para la industria cosmética.

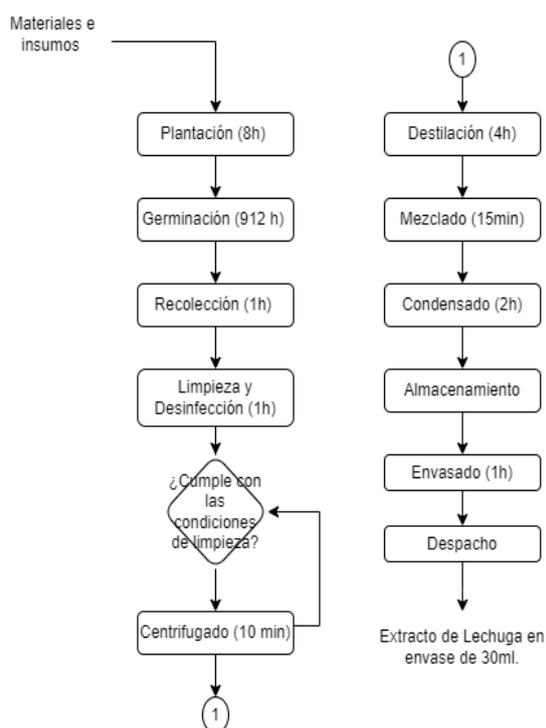


Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de producción de aceite de la lechuga



Figura 11. Extracto de Lechuga en envase de 30ml.

Del experimento desarrollado, se identificó que para la obtención de 90 ml de extracto de lechuga por medio de arrastre de vapor se requiere de 1 lechuga, donde los datos recopilados mostraron consistencia en los resultados, lo que respalda la confiabilidad del método empleado. Además, se realizaron pruebas para evaluar la precisión del laboratorio, demostrando una alta precisión en la obtención de las tres unidades de producto de extracto de lechuga cosmética, identificando que el proceso toma 6 horas a partir de una lechuga de tamaño pequeño. Estos hallazgos refuerzan la validez y la credibilidad de los resultados obtenidos en el estudio realizado.

Este proceso de extracción por arrastre de vapor ha demostrado ser una opción efectiva para producir aceites esenciales de lechuga, particularmente en el contexto de la industria cosmética. Su capacidad para preservar las propiedades naturales de la lechuga y su eficiencia energética hacen que sea una herramienta valiosa para las empresas que desean ofrecer productos sostenibles y de alta calidad. Al mismo tiempo, responde a las expectativas de los consumidores que buscan opciones más naturales y respetuosas con el medio ambiente.

Conclusiones

El sistema NFT (Nutrient Film Technique) se ha identificado como el método hidropónico más eficiente para el cultivo de *Lactuca sativa* en la industria cosmética, debido a su optimización en el uso de agua y su capacidad para generar cultivos densos en espacios reducidos. Este sistema promueve un crecimiento saludable de las plantas, crucial para la calidad del material vegetal destinado a la extracción de aceites esenciales.

En cuanto a la extracción, el método de arrastre de vapor ha demostrado ser el más adecuado para obtener aceites esenciales de lechuga, preservando sus propiedades bioactivas y siendo energéticamente eficiente. Este enfoque es viable a escala industrial y alineado con las demandas de sostenibilidad en la producción cosmética.

La combinación de cultivo hidropónico mediante NFT y extracción por arrastre de vapor ofrece soluciones sostenibles y eficaces para la producción de ingredientes naturales en la industria cosmética, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono y la conservación de la biodiversidad. Estos métodos garantizan productos seguros y naturales, respondiendo a las necesidades actuales del mercado.

Bibliografía

Albuja, V., Andrade, J., Lucano, C., Rodríguez, M., 2021. Comparativa de las ventajas de los sistemas hidropónicos como alternativas agrícolas en zonas urbanas. *Minerva* 2(4), 45–54. <https://doi.org/10.47460/minerva.v2i4.26>

Arredondo, M., Motta, A., 2022. Estudio de prefactibilidad para la producción de cultivos aeropónicos en granjas verticales. Recuperado de <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/16690>

Castro, E., Ruiz, W., Santis, J., 2020. Diseño conceptual de un sistema de bajo costo, de riego por goteo para proyecto experimental de cultivo hidropónico en invernadero. Recuperado de <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/39d95c95-fac2-4fad-a819-ef21fd0d5736>

Doty, S., Dickson, R.W., Evans, M., 2020. Evaluation of a novel shallow aggregate ebb-and-flood culture system and transplant size effects on hydroponic basil yield. *HortTechnology* 30(5), 585–592. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04635-20>

Gutiérrez, A., Pacari, M., 2023. Evaluación de tres distancias de plantación de lechuga (*Lactuca sativa* L.) con aplicación de riego por goteo. Recuperado de <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/39752>

Gutiérrez, A., Robles, L., González, C., Hernández, J., 2023. Hidroponía orgánica: un híbrido interesante. *Recursos Naturales y Sociedad* 9(2), 153–161. <https://doi.org/10.18846/renaysoc.2023.09.09.02.0013>

Leonardo, Y., Veliz, A., 2022. Efecto del prensado en frío y extracción termomecánica sobre las propiedades fisicoquímicas del aceite de copra de *Cocos nucifera* “Coco.” Recuperado de <https://repositorio.upla.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12848/4680/TESIS%20FINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

López, D., 2022. La industria cosmética colombiana, orígenes, evolución y retos. Recuperado de <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/51998/dmlopezm.pdf?sequence=5>

Martínez, J., 2023. Evaluación de la producción de lechuga hidropónica con captación de agua lluvia, como alternativa de seguridad alimentaria en la vereda Merchán del municipio de Saboya. Recuperado de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/55919>

Min, A., Nguyen, N., Howatt, L., Tavares, M., Seo, J., 2023. Aeroponic systems design: considerations and challenges. *Journal of Agricultural Engineering* 54(1). <https://doi.org/10.4081/jae.2022.1387>

Montaix, C., Eche, M., 2021. Degradación del suelo y desarrollo económico en la agricultura familiar de la parroquia Emilio María Terán, Píllaro. *Siembra* 8(1). <https://doi.org/10.29166/siembra.v8i1.1735>

Morán, N., Mérida, M., Cano, T., 2021. Evaluación del rendimiento de extracción y caracterización fisicoquímica del aceite esencial de hojas frescas de guayaba (*Psidium cattleianum*) variando los tiempos de extracción por medio del método de hidrodestilación a nivel laboratorio. Recuperado de http://www.repositorio.usac.edu.gt/16485/1/Nadia_Morán_Cabrera.pdf

Muhamad Zaid, A., Abdul Rauf, N.A., Md Nor, D., Saon, S., Mahamad, A.K., Ahmadon, M.A., Yamaguchi, S., 2023. IoT-based Smart Hydroponic System Using Nutrient Film Technique (NFT) for Lettuce Plant. Proceedings of GCCE 976–980. <https://doi.org/10.1109/GCCE59613.2023.10315640>

Perović, A.B., Karabegović, I.T., Krstić, M.S., Veličković, A.V., Avramović, J.M., Danilović, B.R., Veljković, V.B., 2024. Novel hydrodistillation and steam distillation methods of essential oil recovery from lavender: A comprehensive review. *Industrial Crops and Products* 211, 118244. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118244>

Pertierra, R., Gonzabay, J., 2020. Análisis económico de lechugas hidropónicas bajo sistema raíz flotante en clima semiárido. *La Granja* 31, 118–130. <https://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.09>

Porras, C., Basantes, M., 2021. Análisis, desarrollo e implementación de un sistema hidropónico ebb and flow automatizado para la fundación Ecosur-Ecuador. Recuperado de <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/7745>

Saldaña, K., Olvera, O., 2023. Cultivos hidropónicos sostenibles en el Ecuador. Recuperado de <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/14822/E-UTB-FACIAG-%20AGROP-000064.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Sánchez, E., 2023. *Hydroponics Systems and Principles Of Plant Nutrition: Essential Nutrients, Function, Deficiency, and Excess.*

Revisión sistemática sobre pago por servicios ambientales para el desarrollo socioeconómico con sistemas agrosilvopastoriles en zonas degradadas de República Dominicana

J. Segura¹, F. Del Campo-Gomis² y A. Agulló-Torres²

¹ Facultad de Ciencias Agrícolas y Veterinarias, Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), Calle Rogelio Roselle No. 1, Recinto “ENGOMBE”, Santo Domingo Oeste, e-mail: [janseg0507@gmail.com](mailto:janse0507@gmail.com)

² Instituto de Investigación e Innovación Agroalimentario y Agroambiental (CIAGRO). Departamento de Economía Agroambiental. Universidad Miguel Hernández. Campus de Orihuela, crta. Beniel km 3,2, 03312, Orihuela, Alicante, España.

Resumen

La degradación de la tierra y la desertificación es una problemática mundial que afecta a muchos países, como es el caso de la República Dominicana en donde las zonas secas cubren el 69.6% de la superficie. Ello conlleva una pérdida de recursos naturales enorme y un impacto económico significativo. La agricultura y la ganadería son en parte corresponsables y, por tanto, se están buscando alternativas en todos los países para poder mitigar su impacto a través de incentivos como los pagos por servicios ambientales, con el fin de alentar a los agricultores a adoptar prácticas agroambientales que permitan tanto unas mejores condiciones de vida como un manejo sostenible de los recursos naturales. En esta comunicación se presenta una revisión sistemática de la literatura sobre pagos por servicios ambientales para aplicar al estudio del desarrollo socioeconómico con sistemas agrosilvopastoriles en zonas degradadas de la República Dominicana.

Palabras clave: Pagos por servicios ecosistémicos, degradación económica, desarrollo agrario

Systematic review on payment for environmental services for socio-economic development with agrosilvopastoral systems in degraded areas of Dominican Republic

Abstract

Land degradation and desertification is a global problem that affects many countries, such as the Dominican Republic, where drylands cover 69.6% of the surface. This leads to an enormous loss of natural resources and a significant economic impact. Agriculture and livestock farming are partly co-responsible and, therefore, alternatives are being sought in all countries to mitigate its impact through incentives such as payments for environmental services, in order to encourage farmers to adopt agro-environmental practices that allow both better living conditions and sustainable management of natural resources. This paper presents a systematic review of the literature on payments for environmental services to be applied to the study of socio-economic development with agrosilvopastoral systems in degraded areas of the Dominican Republic.

Keywords: Payments for ecosystem services, economic degradation, agrarian development

Introducción

Definición y antecedentes

La Ley 44-18 de la República Dominicana (RD) define la Compensación o Pago por Servicios Ambientales (PSA), también llamados servicios ecosistémicos, como un instrumento de gestión ambiental flexible y adaptable a diferentes condiciones que procura beneficiar a un grupo o comunidad para asegurar a cambio, un uso del suelo que garantice el mantenimiento o la provisión de uno o más de los servicios ambientales reconocidos por esta ley y su reglamento general de aplicación. La compensación incluye, aunque no se limita a la asesoría técnica o legal, el equipamiento y desarrollo

de infraestructuras públicas de beneficio colectivo. En ese sentido, el PSA se considera como un instrumento económico que busca armonizar la conservación de los servicios ecosistémicos con los intereses económicos de los actores involucrados.

Los PSA son una iniciativa implementada a nivel mundial, aunque América Latina, especialmente países como Costa Rica y México, han sido pioneros en su implementación y han desarrollado modelos exitosos. Así, el programa costarricense de PSA se basa en fondos tributarios y ha sido calificado como “el más exitoso” de su tipo (GEF 2005) y actualmente está fuertemente respaldado por la voluntad de los propietarios privados de tierras de contribuir al bien público. Este mecanismo facilita la vinculación de la conservación y la gestión de los recursos forestales con el desarrollo económico social. (Wallbott et al., 2019).

En África, se tiene el caso de Zambia, donde se destaca que los PSA podrían vincularse a programas de apoyo a la agricultura para lograr simultáneamente la intensificación agrícola y la conservación de los bosques, debido a que las ganancias potencialmente mayores de la agricultura intensificada que las de las transferencias puras de efectivo (Vorlauffer, T et al., 2017).

En la Unión Europea los debates políticos han enfatizado cada vez más los PSA como modelo para lograr objetivos agroambientales (Wynne-Jones, 2013).

En Australia, los PSA a propietarios de tierras rurales se aceptan como parte del conjunto de herramientas políticas para mejorar la gestión de los recursos naturales (Race, D; Curtis, A, 2013).

Finalmente, en China el programa Grain-to-Green (GTGP) de la Reserva Natural Wolong para pandas gigantes es uno de los PSA más grandes del mundo s. (Chen, XD; Lupi, F; He, GM; Ouyang, ZY; Liu, JG, 2009).

Justificación

La RD, es un país situado en el Archipiélago de las Antillas Mayores y ocupa las dos terceras partes de la isla La Hispaniola, que comparte con Haití. Limita al norte con el Océano Atlántico, al sur con el Mar Caribe o Mar de las Antillas, al este con el Canal de la Mona y al oeste con Haití. Tiene una superficie de 48.422 km² y una población de 11.117.873 personas, con una densidad de población de 228 habitantes por km², de acuerdo con el censo de 2023.

El Plan de Acción Nacional de Lucha contra la desertificación y Sequía 2018-2030 de la RD (PAN.LCD RD 2018-2030), destaca que en la RD las zonas secas cubren 69,6%, lo cual incluye las tierras en las siguientes subclasificaciones: híper-áridas (0%), áridas (12,2%), semiáridas (15,2%), y subhúmedas secas (42,2%), que en conjunto representan cerca del 70% de su territorio.

Se estima que 496.000 hectáreas, equivalente al 10% del territorio dominicano, están afectadas por procesos críticos de degradación de la tierra. De las 89 subcuencas del país, 24 están afectadas por procesos de degradación (PAN-LCD 2018-2030).

La pérdida de recursos naturales y el impacto económico afecta de manera significativa a los países con economías débiles, como la RD. La ocurrencia de sequías agrava la delicada situación de muchos territorios aumentando la desertificación y, por esta razón, se hace necesario buscar alternativas tendientes a mitigar los efectos de la desertificación combinadas con acciones que permitan la generación de recursos económicos a los pobladores de las comunidades afectadas.

La presente investigación se justifica con la finalidad de brindar la información actualizada, a las personas interesadas, grupos organizados y autoridades competentes, sobre experiencias de comunidades que utilizan o han utilizado los PSA como medida para afrontar la degradación de tierras.

Objetivo

El objetivo general de la presente comunicación es identificar el estado actual del conocimiento sobre los PSA como herramienta para el desarrollo socioeconómico de las zonas degradadas. Para ello se han establecido como objetivos específicos el precisar cuáles son las actividades socioeconómicas que

están presentes en las zonas donde se implementan los PSA, el determinar los principales resultados obtenidos tras la implementación de un programa de PSA y el identificar las principales limitantes o barreras para la implementación de un programa de PSA.

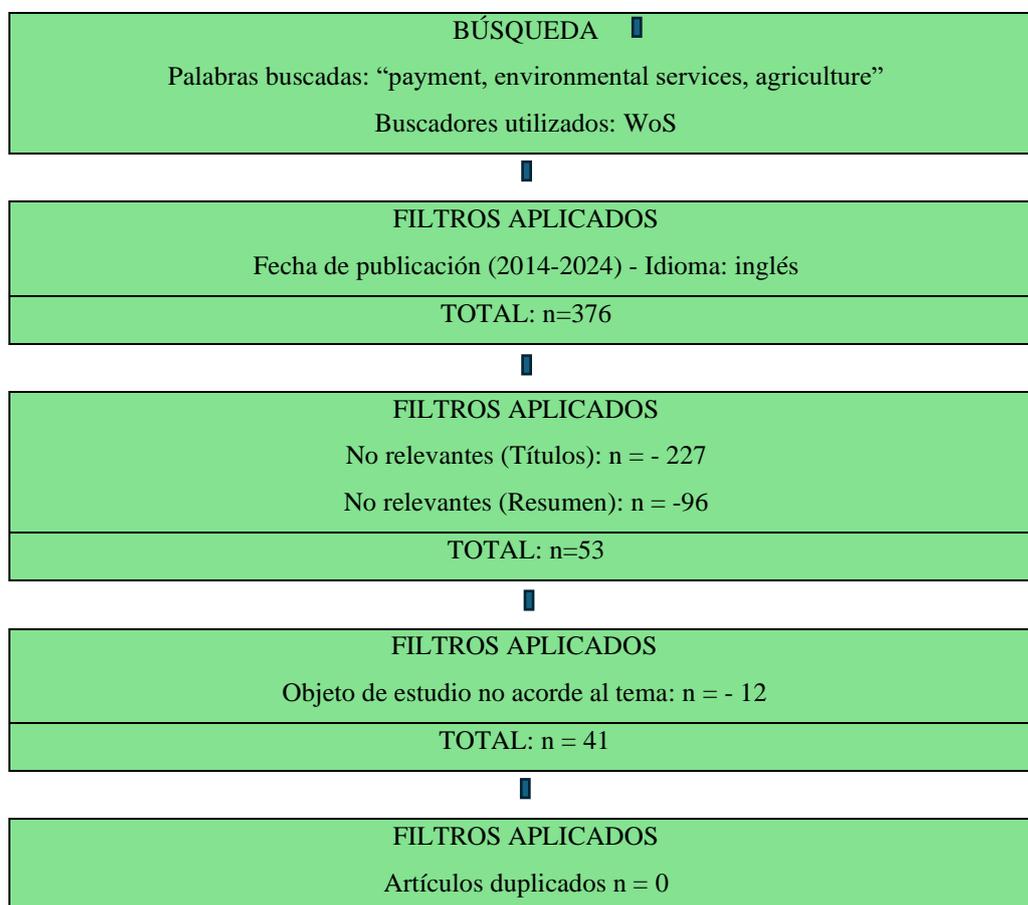
Materiales y Métodos

Esta revisión sistemática ha sido realizada bajo la metodología PRISMA 2020, (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses). La declaración PRISMA 2020 está destinada a ser utilizada en revisiones sistemáticas que incluyen síntesis. El objetivo de la declaración es útil a la hora de planificar y realizar revisiones sistemáticas para garantizar que se captura toda la información recomendada.

La base de datos consultada para la obtención de los artículos referidos a la revisión sistemática relativa a los PSA fue la Web of Science, Se aplicó una selección con criterios de exclusión e inclusión que se expone en la Figura 1.

En primer lugar, se realizó una búsqueda basada en las siguientes palabras en inglés presentes en el título del artículo: payment, environmental services and agriculture y que hubieran sido publicados como máximo 10 años antes (periodo 2014-2024), en la que se obtuvieron un total de 376 artículos. En segundo lugar, fueron eliminados 227 artículos por no ser relevante la información del título y 96 por no ser relevante la información del resumen, quedando 53 artículos. En tercer lugar, se aplicó un filtro basado en que el objeto de estudio no fuera acorde al tema y se eliminaron 12, por lo que la muestra quedó en 41 artículos. Al no haber artículos duplicados la muestra definitiva de artículos relevantes quedó en 41.

En la Figura 2 puede observarse la distribución de los artículos relevantes a lo largo del periodo, destacando los años 2019 y 2021 con 8 artículos en cada año.



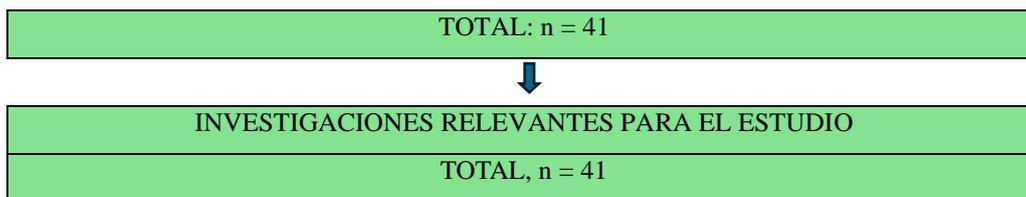


Figura 1: Diagrama de búsqueda con criterios de exclusión e inclusión

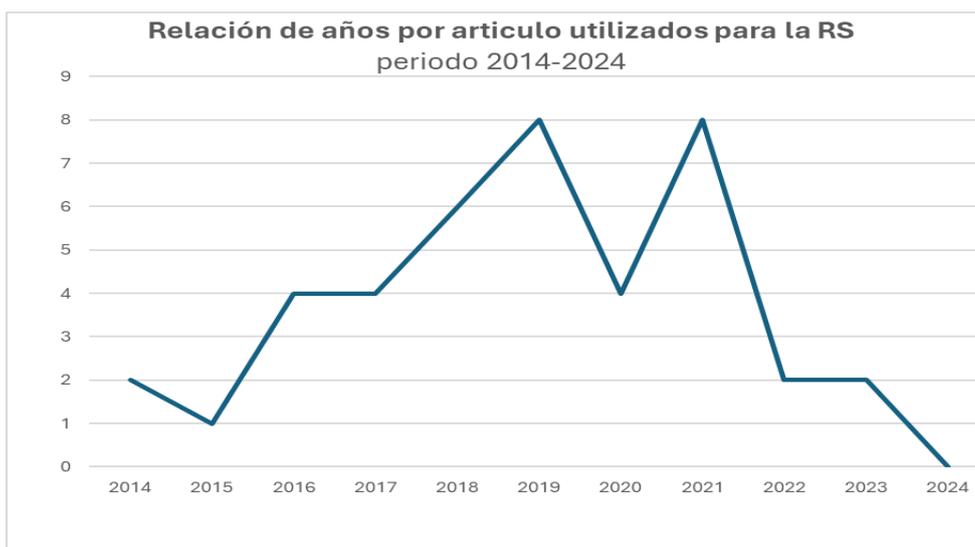


Figura 2. Relación de años por artículo utilizados para la RS.

Resultados y Discusión

En cuanto al primer objetivo específico de cuáles son las actividades socioeconómicas que están presentes en las zonas donde se implementan los PSA, las referencias bibliográficas consultadas indican que los PSA son un instrumento de política cada vez más discutido e implementado para reducir la deforestación y desempeñan un papel central en REDD+ como parte de las estrategias globales de mitigación del cambio climático (Manjula et al., 2014; Kemigisha et al., 2023). Además, los PSA han ganado una amplia popularidad como enfoques para promover el uso de la tierra o las prácticas de producción agrícola respetuosas con el medio ambiente (Engel, S; Muller, A, 2016). También los PSA han recibido mucha atención con respecto a su posible contribución tanto a la sostenibilidad ambiental como alivio económico de la pobreza, al vincular la idea de los pagos por servicios socioambientales (PSES) con las tres funciones de la justicia se podría aprovechar más plenamente su impacto beneficioso (Vennghaus, S y Selbmann, K., 2016). Además, la herramienta de PSA ha sido puesta en práctica en diversas partes del mundo por más de dos décadas y se ha comprobado que su éxito depende de la aceptación de los posibles partícipes, pero en el caso del sector agrario se ha verificado que aún no es asumida al 100% por los agricultores (Del Corso et al., 2017).

Respecto al segundo objetivo específico referido a los principales resultados obtenidos tras la implementación de un programa de PSA se han observado algunas prácticas agrícolas beneficiosas que proporcionan una gran variedad de servicios ecosistémicos factibles de aplicar PSA. Entre las mismas cabe destacar los sistemas agrícolas de bajos insumos, como los sistemas ganaderos basados en pasturas o los sistemas agrícolas mixtos integrados. Por el contrario, los sistemas agrícolas intensivos presentan dificultades para su aplicación. (Cooper et al., citado por Rodríguez-Ortega, T; Olaizola, AM; Bernués, A, 2019).

Finalmente, en el tercer objetivo específico se han identificado como principales limitantes para la implementación de un programa PSA algunas prácticas de agricultura ecológica que son complicadas de valorar para la aplicación de los PSA. Entre las citadas se encuentran la labranza mínima, el acolchado de los residuos de los cultivos, la rotación de cultivos y aquellos cultivos en las que muchos de los beneficios privados de la práctica se acumulan solo después de algunos años de adopción continua (Bell et al, 2014).

Conclusiones

La revisión sistemática da cuenta de que los PSA pese a que tiene años de implementación en varios países del mundo han sido probados de diversas formas combinando la base productiva principal de las comunidades donde se aplique con cuidados y/o conservación de los servicios ecosistémicos. Los PSA hacen énfasis en evitar degradación y conservación de la biodiversidad, pero existen elementos de permanencia entre las acciones productivas y las prácticas de conservación que garanticen la continuidad de la combinación adoptada. En adición, es necesario superar limitaciones que minimicen el abandono de las prácticas sostenible, siendo una de ellas la necesidad de disponer de capacidad técnica en los territorios.

Dado que la RD cuenta con una ley de PSA y es signatario de la Convención Marco de Naciones Unidas de Lucha contra Desertificación y Sequía, el diseño de una propuesta de PSA para el desarrollo socioeconómico con sistemas agrosilvopastoriles en zonas degradadas sería un tema a investigar para definir el potencial impacto en la agricultura dominicana.

Agradecimientos

Este artículo forma parte de un trabajo de investigación del programa de doctorado en el marco del acuerdo entre la Universidad Autónoma de Santo Domingo y la Universidad Miguel Hernández de Elche en el marco del acuerdo de colaboración entre ambas instituciones del año 2024.

Bibliografía

- Bell, A; Parkhurst, G; Droppelmann, K; Benton, TG, 2014. Scaling up pro-environmental agricultural practice using agglomeration payments: Proof of concept from an agent-based model, *Ecological Economics*, 126, pp. 32-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.03.002>
- Chen, X., Lupi, F., He, G., Ouyang, Z., Liu, J., 2009. Factors affecting land reconversion plans following a payment for ecosystem service program. *Biological Conservation*, 142 (8), pp. 1740-1747. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.03.012>.
- Del Corso, J., Nguyen, T., Kephaliacos, C., 2017, Acceptance of a Payment for Ecosystem Services Scheme: The Decisive Influence of Collective Action, *Environmental Values*, 26, pp. 177-202. <http://dx.doi.org/10.3197/096327117X14847335385517>.
- Engel, S., Muller, A., 2016. Payments for environmental services to promote "climate-smart agriculture"? Potential and challenges. *Agricultural Economics*, 47, pp. 173-184. <https://doi.org/10.1111/agec.12307>.
- Kemigisha, E., Babweteera, F., Mugisha, J., Angelsen, A., 2023. Payment for environmental services to reduce deforestation: Do the positive effects last?, *Ecological Economics*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107840>
- Ley No. 44-18 que establece pagos por Servicios Ambientales. G. O. No. 10919 del 3 de septiembre de 2018. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/dom185695.pdf> (acces 10 de septiembre de 2024).
- Manjula, M., Venkatachalam, L., Mukhopadhyay, P, Kumar, L.,2014. Ecosystem services approach for revitalizing agriculture in India, *Current Science*, 117, pp. 723-727. <http://dx.doi.org/10.18520/cs/v116/i5/723-727>.

Race, D., Curtis, A., 2013. Reflections on the Effectiveness of Market-Based Instruments to Secure Long-Term Environmental Gains in Southeast Australia: Understanding Landholders' Experiences. *Society & Natural Resources*, 26 (9) , 1050-1065. <https://doi.org/10.1080/08941920.2013.779338>.

Rodríguez-Ortega, T., Olaizola, A.M., Bernués, A., 2019. A novel management-based system of payments for ecosystem services for targeted agri-environmental policy, *Ecosystem Services*, 34, pp. 74-84.. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.09.007>.

Venghaus, S., Selbmann, K., 2016. Biofuel as social fuel: Introducing socio-environmental services as a means to reduce global inequity?. *Ecological Economics*, 97, pp. 84-92. <http://dx.doi.org/10.1111/agec.12307>.

Vorlaufer, T., Falk, D., Dufhues, T., Kirk, M., 2017. Payments for ecosystem services and agricultural intensification: Evidence from a choice experiment on deforestation in Zambia, *Ecological Economics*, 141, pp. 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.05.024>.

Wallbott, L., G. Siciliano y M. Lederer. 2019. Más allá de los PSA y REDD+: Costa Rica en camino hacia una gestión del paisaje climáticamente inteligente. *Ecología y Sociedad* 24(1):24. <https://doi.org/10.5751/ES-10476-240124>.

Wynne-Jones, 2013. Connecting payments for ecosystem services and agri-environment regulation: An analysis of the Welsh Glastir Scheme. *Journal of Rural Studies*, 31, pp.77-86. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2013.01.004>.

Diseño de una granja hidropónica modular adaptable a apartamentos de Bogotá: Un enfoque hacia ciudades y comunidades sostenibles

J. E. Tierradentro Cruz¹, J. M. Méndez Sayago² y G. Vera Rizzo³

¹ Fundación Universitaria del Área Andina, 110221, Bogotá, Colombia, jtierradentro3@areandina.edu.co

² Fundación Universitaria del Área Andina, 110221, Bogotá, Colombia, jmms1318@gmail.com

³ Fundación Universitaria del Área Andina, 110221, Bogotá, Colombia, gvera6@areandina.edu.co

Resumen

Esta comunicación se centra en el diseño, implementación y evaluación de un prototipo de granja hidropónica utilizando la técnica NFT (Nutrient Film Technique) en un vecindario residencial de Bogotá. La iniciativa aborda los desafíos actuales de la agricultura urbana, promoviendo la producción sostenible de alimentos frescos y saludables en espacios residenciales reducidos. El estudio evalúa la viabilidad y eficacia del sistema hidropónico, integrando tecnología IoT para optimizar el cultivo de lechugas. Los resultados indican que el sistema NFT es altamente eficiente en el uso de agua y recursos, además de mejorar la seguridad alimentaria local y promover la autosuficiencia en entornos urbanos, lo cual contribuye al desarrollo de comunidades más autosuficientes y ecológicamente responsables.

Palabras clave: Hidroponía, Agricultura urbana, Sostenibilidad, Seguridad alimentaria, IoT agrícola

Design and Implementation of a Residential Hydroponic Farm in a Neighborhood of Bogotá: A Focus on Sustainable Cities and Communities

Abstract

This communication focuses on the design, implementation, and evaluation of a hydroponic farm prototype using the Nutrient Film Technique (NFT) in a residential neighborhood of Bogotá. The initiative addresses the current challenges of urban agriculture by promoting the sustainable production of fresh and healthy food in limited residential spaces. The study evaluates the feasibility and effectiveness of the hydroponic system, incorporating IoT technology to optimize lettuce cultivation. The results indicate that the NFT system is highly efficient in the use of water and resources, enhances local food security, and promotes self-sufficiency in urban environments, contributing to the development of more self-sufficient and environmentally responsible communities.

Keywords: Hydroponics, Urban Agriculture, Sustainability, Food Security, Agricultural IoT

Introducción

La urbanización acelerada y el crecimiento poblacional en ciudades como Bogotá han generado una demanda creciente por soluciones sostenibles para la producción de alimentos en espacios limitados. La seguridad alimentaria en las áreas urbanas se ha convertido en un desafío crítico, ya que las prácticas agrícolas tradicionales no solo consumen grandes cantidades de agua y tierra, sino que también contribuyen a la degradación ambiental y a la emisión de gases de efecto invernadero (Alveal Concha & Campos González, 2014).

En este contexto, la hidroponía urbana emerge como una alternativa viable para la producción de alimentos en pequeñas superficies, aprovechando el espacio limitado de las ciudades para cultivar plantas de manera eficiente y sostenible (Sánchez, 2023). La hidroponía, al eliminar la necesidad de suelo y optimizar el uso de agua y nutrientes, permite un control más preciso de las condiciones de crecimiento, lo que resulta en un mayor rendimiento por unidad de área cultivada en comparación con los métodos agrícolas tradicionales (Pertierra & Quispe, 2020). Este estudio se centra en el diseño y

evaluación de un sistema hidropónico adaptable a apartamentos en Bogotá, con un enfoque en la sostenibilidad y la seguridad alimentaria urbana.

Materiales y Métodos

En esta investigación, se empleó un enfoque metodológico mixto, que combinó métodos cualitativos y cuantitativos con el fin de cumplir los objetivos planteados. El proceso metodológico se organizó en tres fases principales: revisión de literatura, desarrollo del prototipo del sistema hidropónico adaptado a apartamentos urbanos en Bogotá, y análisis de los costos del sistema y su implementación tecnológica.

En la primera fase, se llevó a cabo una revisión de la literatura para evaluar cinco tipos de sistemas hidropónicos: NFT (Nutrient Film Technique), aeropónico, flujo y reflujo, raíz flotante y riego por goteo. Se seleccionaron como indicadores clave la eficiencia en el uso del agua, costos de implementación, facilidad de mantenimiento y rendimiento de cultivos. Este análisis permitió determinar que el sistema NFT era el más adecuado para espacios reducidos, debido a su alta eficiencia en el uso de recursos y su adaptabilidad a entornos urbanos.

En la segunda fase, se construyó un prototipo del sistema hidropónico NFT. Este consistió en un circuito cerrado de tuberías de PVC, donde una solución nutritiva circula continuamente para alimentar las raíces de las plantas. El prototipo incluyó una bomba que recirculaba la solución desde un depósito, asegurando un uso eficiente del agua y proporcionando nutrientes esenciales de manera constante. Además, el sistema fue automatizado mediante un Arduino, que controla sensores de pH y humedad para ajustar las condiciones del cultivo en tiempo real, optimizando así el rendimiento de las plantas sin necesidad de intervención humana continua.

La tercera fase se enfocó en el análisis de los costos de implementación del sistema hidropónico NFT, así como en los costos asociados a la integración tecnológica, incluyendo la automatización con Arduino y los sensores. Se llevó a cabo una evaluación detallada de los costos de los materiales necesarios para la construcción del sistema, tales como tuberías de PVC, conexiones, y la bomba de recirculación, además de los costos del Arduino y los sensores de pH y humedad, los cuales fueron clave para la automatización del prototipo. El análisis económico incluyó los costos de adquisición, instalación y operación del sistema, proporcionando una visión clara de la inversión necesaria para su implementación en entornos urbanos.

Resultados y Discusión

La selección del sistema hidropónico se realizó mediante un análisis descriptivo de cinco tipos de sistemas hidropónicos: NFT, aeropónico, flujo y reflujo, raíz flotante y riego por goteo. La información se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación de Sistemas Hidropónicos

Sistema Hidropónico	Descripción con Fuente	Ventajas	Desventajas
NFT (Nutrient Film Technique)	El sistema NFT permite que una lámina delgada de solución nutritiva fluya continuamente sobre las raíces, proporcionando un suministro constante de nutrientes. Es ideal para cultivos de hoja como lechuga y espinaca, aunque requiere monitoreo constante para evitar acumulación de sales y estancamiento del agua (Alveal Concha & Campos González, 2014).	<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiencia en uso de agua y nutrientes. - Adecuado para cultivos de hoja. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere monitoreo constante.
Aeropónico	Las raíces suspendidas en el aire son rociadas periódicamente con una solución nutritiva, maximizando la oxigenación y promoviendo un crecimiento rápido. Es muy eficiente en el uso de agua, pero su implementación es costosa y compleja debido a los equipos necesarios (Rodríguez Pinto & Lozano Meneses, 2022).	<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiencia en el uso de agua. - Crecimiento rápido y vigoroso. 	<ul style="list-style-type: none"> - Implementación costosa y compleja.
Flujo y Reflujo (Ebb and Flow)	Este sistema inunda y drena periódicamente las raíces con solución nutritiva, permitiendo un ciclo controlado de riego y aireación. Es adecuado para plantas que requieren periodos secos, aunque menos eficiente en el uso de agua comparado con el NFT (Doty et al., 2020)	<ul style="list-style-type: none"> - Control preciso de riego y nutrientes. - Tolerante a fluctuaciones en el suministro de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor eficiencia en el uso de agua.
Raíz Flotante (Floating Root)	Las plantas flotan sobre una solución nutritiva, sostenidas por una placa flotante. Este sistema es fácil de implementar y mantener, ideal para cultivos como la lechuga, aunque requiere una oxigenación constante para evitar la asfixia de las raíces (Gutiérrez & Pacari, 2023)	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil implementación y mantenimiento. - Ideal para hortalizas de hoja como la lechuga. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere oxigenación continua de la solución nutritiva.
Riego por Goteo (Drip Irrigation)	Suministra agua y nutrientes directamente a las raíces mediante goteros, permitiendo un riego y fertilización precisos. Es altamente eficiente en el uso de agua, pero necesita mantenimiento constante para evitar la obstrucción de los goteros (Porras & Basantes, 2021)	<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiencia en el uso de agua. - Precisión en riego y fertilización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mantenimiento constante para prevenir obstrucción de goteros.

Estos sistemas se compararon en términos de eficiencia en el uso del agua, costos de implementación, facilidad de mantenimiento y rendimiento de cultivos. Los datos obtenidos se resumen en la Tabla 2, que muestra las principales características y ventajas de cada sistema. Como se puede observar en la Tabla 3, también se compararon los sistemas en términos del impacto en la huella de carbono entre los sistemas.

Tabla 2. Comparación de Sistemas Hidropónicos en Términos de Eficiencia y Costos

Sistema	Eficiencia en el Uso del Agua	Costos de Implementación (COP)	Facilidad de Mantenimiento	Rendimiento de Cultivos (kg/m ²)
NFT	Muy Alta	2,000,000 COP	Media	6.5
Aeropónico	Alta	3,200,000 COP	Baja	7.0
Flujo y Reflujo	Media	1,600,000 COP	Media	5.5
Raíz Flotante	Alta	1,800,000 COP	Alta	6.0
Riego por Goteo	Alta	1,200,000 COP	Alta	5.0

Nota. Adaptado de (Cebada-Merino et al., 2016); (Alveal Concha & Campos González, 2014). La abreviatura de COP se refiere a pesos colombianos.

Tabla 3. Comparación del Impacto en la Huella de Carbono (en toneladas de CO₂e por año) entre Sistemas Hidropónicos y Agricultura Tradicional

Sistema	Huella de Carbono (ton CO ₂ e/año)
NFT	1.2
Aeropónico	1.5
Flujo y Reflujo	1.8
Raíz Flotante	1.4
Riego por Goteo	1.6
Agricultura Tradicional	2.5

Nota. Basado en (Rodríguez Pinto & Lozano Meneses, 2022);(Castro et al., 2020)

A partir de esta comparación, se determinó que el sistema NFT es el más adecuado para su implementación en apartamentos urbanos de Bogotá. Su alta eficiencia en el uso del agua, combinada con su equilibrio entre costo y rendimiento, lo hacen ideal para espacios limitados. Estas ventajas se refuerzan aún más por su diseño compacto y versatilidad, que permiten organizar los canales de cultivo en estructuras verticales, optimizando el uso del espacio disponible. Este diseño es particularmente beneficioso en entornos urbanos, donde el espacio es un recurso escaso. Según (Forero et al., 2011), un sistema NFT instalado en un apartamento promedio de Bogotá puede producir hasta 30 kg de vegetales frescos al año en menos de 2 metros cuadrados, demostrando su alta productividad en espacios reducidos.

Además, la viabilidad económica del sistema NFT es otro factor decisivo. Aunque los costos iniciales de instalación pueden ser relativamente altos, el rápido retorno de la inversión, debido a la reducción en costos operativos y el eficiente uso del agua y los nutrientes, hace que este sistema sea económicamente viable para los hogares urbanos (Cebada et al., 2016). En menos de tres años, los costos iniciales pueden recuperarse, consolidando al sistema NFT como una opción sostenible y rentable para la producción de alimentos en la ciudad.

El sistema NFT es fácil de automatizar, lo que minimiza el mantenimiento y asegura un monitoreo constante de las condiciones de cultivo. La automatización, que permite ajustar parámetros críticos como el flujo de agua y la concentración de nutrientes, no solo mejora la eficiencia del sistema, sino que también facilita su manejo, haciéndolo accesible para personas con diferentes niveles de experiencia en agricultura (Rodríguez Pinto & Lozano Meneses, 2022).

El sistema NFT es la solución para la producción de alimentos en viviendas urbanas debido a su adaptabilidad, viabilidad económica y facilidad de automatización. Esta técnica hidropónica permite un uso eficiente del agua y los nutrientes, lo que resulta en un crecimiento óptimo de las plantas, reduciendo los costos operativos y el consumo de recursos. En Bogotá, donde los espacios son limitados y la necesidad de autosuficiencia alimentaria es creciente, el sistema NFT puede ser implementado de manera eficaz en las viviendas para promover la producción sostenible de alimentos (Cebada et al., 2016). A continuación, en la Figura 1 se presenta el plano de una vivienda VIS de 40 m² ubicada en una localidad de la ciudad.



Figura 1. Plano de apartamento VIS de 40m² de Bogotá

El diseño del sistema hidropónico propuesto, ilustrado en la Figura 2, para las viviendas urbanas de Bogotá, se basa en la técnica NFT (Nutrient Film Technique). Este método se caracteriza por la circulación continua de una fina capa de solución nutritiva a través de canales de PVC, los cuales forman la estructura principal del sistema. La solución es bombeada desde un depósito, circula a lo largo de los canales donde se encuentran las raíces de las plantas, y luego regresa al depósito para ser recirculada. Este diseño que presentan sus costos en la Tabla 4 que asegura un uso eficiente del agua, reduciendo significativamente su consumo, y garantiza un suministro continuo de nutrientes esenciales, promoviendo un crecimiento acelerado de las plantas (Mendonça et al., 2023).

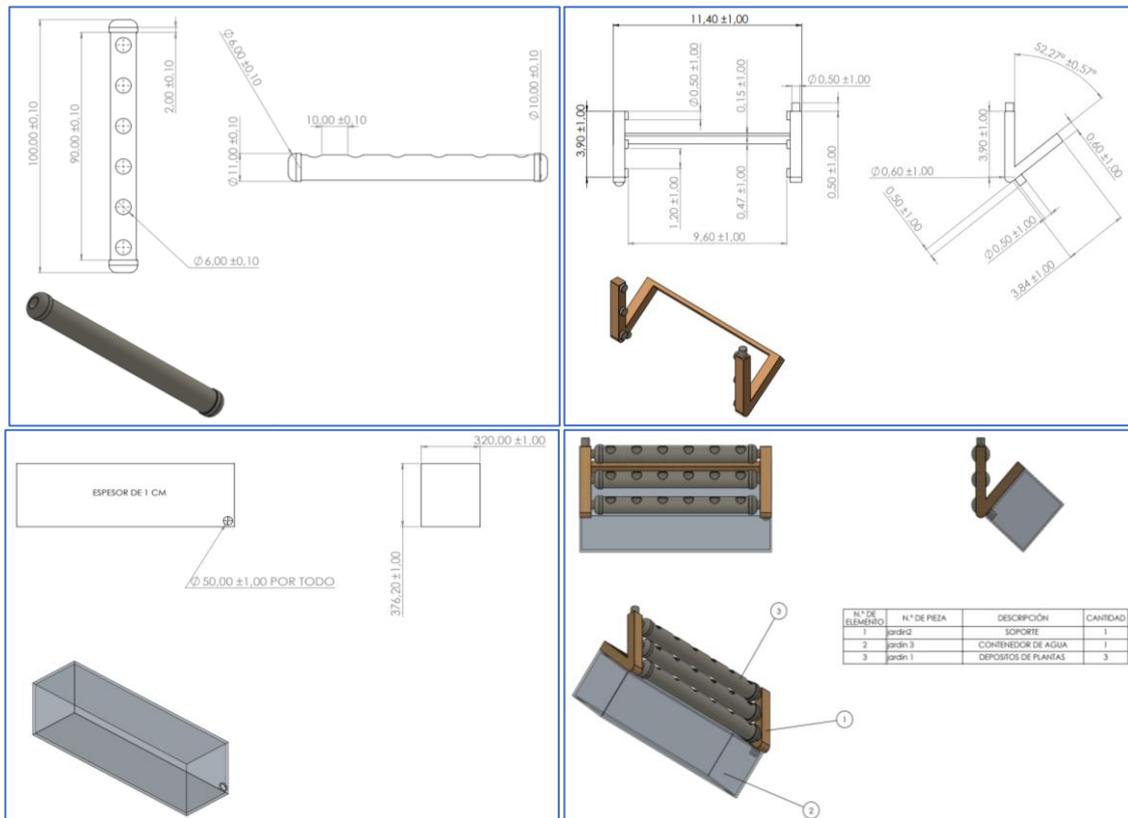


Figura 2. Diseño Prototipo sistema Hidropónico NFT

El sistema cuenta con sensores de pH y humedad, controlados mediante un Arduino, que permiten monitorear y ajustar las condiciones del cultivo en tiempo real. Estos sensores detectan variaciones en los niveles de acidez y humedad, ajustando automáticamente el flujo de la solución nutritiva para mantener un ambiente óptimo para el desarrollo de las plantas. Entre los componentes esenciales del prototipo se incluyen la bomba de recirculación, tuberías de PVC, y otros elementos de soporte que aseguran la durabilidad y eficiencia del sistema (Cebada et al., 2016; Mendonça et al., 2023).

La Tabla 4 presenta los costos de los materiales necesarios para la construcción del prototipo del sistema hidropónico NFT implementado en esta investigación. Cada componente fue seleccionado para optimizar la eficiencia y funcionalidad del sistema hidropónico, asegurando su durabilidad y bajo mantenimiento. Los elementos incluyen tuberías de PVC, conectores, una bomba de recirculación, nutrientes y sensores para el monitoreo de pH y humedad, los cuales son esenciales para la automatización del sistema mediante Arduino. El costo total de los materiales asciende a 289,300 COP, lo que representa una inversión inicial relativamente accesible considerando los beneficios a largo plazo en ahorro de agua y eficiencia en el uso de nutrientes.

Tabla 4. Costos Prototipo sistema Hidropónico NFT

Cantidad	Producto	Vr. Unitario (COP)	Vr. Total (COP)
8	T 1/2	\$700	\$5.600
4	Codos 1/2	\$600	\$2.400
4	Uniones 1/2	\$600	\$2.400
6	Tapón 2"	\$600	\$3.600
3	Tubo 2"	\$6.000	\$18.000
1	Soldadura	\$3.200	\$3.200
1	Limpiador	\$3.200	\$3.200
3	Tubo 1/2	\$3.900	\$11.700
1	Lija	\$1.800	\$1.800
2	Spray blanco	\$8.900	\$17.800
6	Hembras	\$150	\$900
6	Machos	\$150	\$900
6	Empaques	\$150	\$900
1	Silicona	\$5.900	\$5.900
1	Abrazaderas	\$6.000	\$6.000
6	Nutrientes	\$15.000	\$15.000
1	Madera	\$20.000	\$20.000
1	Bomba	\$170.000	\$170.000
	Total		\$289.300

Nota: COP se refiere a pesos colombianos.

La tecnología IoT que se muestra en la Figura 3 permite además el monitoreo remoto del sistema hidropónico mediante una plataforma en la nube. Los usuarios pueden realizar ajustes en las variables del sistema desde cualquier lugar, lo que optimiza la eficiencia del proceso y facilita la toma de decisiones en tiempo real. Con esta automatización, el sistema minimiza la intervención humana, permitiendo un control preciso de las condiciones de cultivo. Esta tecnología asegura que el sistema hidropónico NFT sea sostenible y adaptable a las demandas cambiantes de la producción de alimentos en entornos urbanos como Bogotá (Mendonça et al., 2023).

Finalmente, los costos de los sensores de temperatura y pH se detallan en la Tabla 5. Estos pueden incrementarse si se requieren módulos adicionales, como controladores de comunicación inalámbrica o componentes de expansión, que mejoren la funcionalidad del sistema. A pesar de la variabilidad en precio, el Arduino UNO es una opción económica y accesible para la automatización de sistemas hidropónicos, permitiendo un control eficiente y preciso de los sensores de pH y temperatura, optimizando así el rendimiento del cultivo (Cebada et al., 2016; Mendonça et al., 2023).

Tabla 5. Costos de sensor de Temperatura y pH

Producto	Vr. Unitario (COP)
Ventilador Cooler	\$ 11.500
Integrado ULN2003	\$ 6.400
Sistema Arduino	\$ 200.000
Protoboard	\$ 14.900
2 LEDs	\$ 5.000
Metro de cable para circuitos	\$ 1.000
Alambre	\$ 1.000
Total	\$ 239.800

Nota: COP se refiere a pesos colombianos.

En la Figura 3 se detalla el diseño del sensor:



Figura 3. Prototipo del Sensor de Temperatura y pH Controlado por Arduino.

La Tabla 2 refleja un análisis teórico de los costos de implementación de diversos sistemas hidropónicos, según la bibliografía consultada, mientras que las Tablas 4 y 5 presentan los costos reales de los materiales y sensores para un sistema hidropónico tipo NFT en un espacio residencial de Bogotá de 40 m². Aunque los costos teóricos de la Tabla 2 ofrecen un marco de referencia, los costos reales en la Tabla 4 revelan ajustes necesarios para implementar el sistema en condiciones locales, considerando precios de materiales y tecnología en el mercado colombiano.

Respecto al impacto de que los costos de la sensorica en la Tabla 5 sean comparables al resto de la instalación en la Tabla 4, esto sugiere que el monitoreo y control del sistema representan una inversión significativa. Sin embargo, esta inversión en sensorica asegura la automatización y eficiencia del sistema hidropónico, permitiendo un uso optimizado de agua y nutrientes, y reduciendo la intervención manual. La integración de esta tecnología, es esencial para mejorar la sostenibilidad y rendimiento del sistema en entornos urbanos como Bogotá.

El análisis de costos permite concluir que, aunque la implementación inicial puede parecer elevada debido a la tecnología utilizada, los beneficios a largo plazo, como la reducción en el consumo de agua y el control automatizado de nutrientes, compensan significativamente la inversión. Esta fase permite determinar la viabilidad económica del sistema y su potencial para ser replicado en otros entornos urbanos, como los apartamentos en Bogotá.

Conclusiones

Este estudio demuestra que la implementación de un sistema hidropónico basado en la técnica NFT (Nutrient Film Technique) en apartamentos urbanos de Bogotá es una solución viable y sostenible para la producción de alimentos frescos en espacios reducidos. El análisis de los distintos sistemas hidropónicos mostró que el NFT destaca por su alta eficiencia en el uso del agua y su capacidad para

maximizar el rendimiento de cultivos como la lechuga en áreas limitadas. La adaptación de este sistema a los apartamentos urbanos promueve la autosuficiencia alimentaria en un contexto de creciente urbanización y escasez de recursos.

Además, la integración de tecnologías para la automatización del monitoreo y ajuste de las condiciones del cultivo ha mejorado el funcionamiento del sistema hidropónico, minimizando la intervención humana y facilitando su operación. Aunque los costos iniciales pueden ser elevados, la reducción en el consumo de agua y la automatización del sistema sugieren que, con una mayor implementación, este modelo tiene el potencial de ser económicamente viable a largo plazo.

Este proyecto contribuye significativamente a la sostenibilidad urbana, alineándose con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles. La implementación de granjas hidropónicas en entornos residenciales ofrece una solución práctica y escalable para mejorar la seguridad alimentaria, reducir el impacto ambiental y fomentar comunidades más autosuficientes. Los resultados obtenidos proporcionan una base para futuras investigaciones, ya que el diseño del sistema hidropónico y el uso de tecnologías accesibles permiten su replicabilidad en otros contextos urbanos. La metodología empleada, que incluye la automatización y la optimización del uso de recursos hídricos y nutrientes, es aplicable en ciudades con desafíos similares de espacio limitado y sostenibilidad. Además, el enfoque en la sostenibilidad y la eficiencia energética subraya el potencial del sistema para ser adaptado en diferentes climas y entornos urbanos, lo que lo convierte en una opción viable para mejorar la seguridad alimentaria en otras ciudades.

Bibliografía

- Alveal Concha, M. A., & Campos González, K. del C. (2014). *Estudio comparativo de sistemas de riego hidropónico y por goteo*. http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/797/1/Alveal_Concha_Miguel_Angel.pdf
- Castro, E., Ruiz, W., & Santis, J. (2020). *Diseño conceptual de un sistema de bajo costo, de riego por goteo para proyecto experimental de cultivo hidropónico en invernadero*. <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/39d95c95-fac2-4fad-a819-ef21fd0d5736>
- Cebada, M., Herrera, J. A., Andrés, P., & Leyva, O. R. (2016). *Sistema eficiente para la producción de lechuga (Lactuca sativa L.)*. (Vol. 9, Issue 6). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/772>
- Doty, S., Dickson, R. W., & Evans, M. (2020). Evaluation of a novel shallow aggregate ebb-and-flood culture system and transplant size effects on hydroponic basil yield. *HortTechnology*, 30(5), 585–592. <https://doi.org/10.21273/horttech04635-20>
- Forero, R. A., Parra, H. G., Luna, R. A., & Rivera, E. R. (2011). *Agricultura urbana: Sistemas de implementación de cultivos hidropónicos*.
- Gutiérrez, A., & Pacari, M. (2023). *Evaluación de tres distancias de plantación de lechuga (Lactuca sativa L.) con aplicación de riego por goteo*. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/39752>
- Mendonça, V. V. O., da Silva, C. A., Mendonça, C. R. O. S. G., da Silva, C. J., & Guimarães, C. M. (2023). Lettuce production in hydroponic and fish-farming aquaponic under different channel slopes and nutrient solutions in the NFT system. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 27(9), 746–754. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n9p746-754>
- Pertierra, R., & Quispe, J. (2020). Economic analysis of hydroponic lettuce under floating root system in semi-arid climate. *Granja*, 31(1), 121–133. <https://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.09>
- Porras, C., & Basantes, M. (2021). *Análisis, desarrollo e implementación de un sistema hidropónico ebb and flow automatizado para la fundación Ecosur-Ecuador*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/7745>



Rodríguez Pinto, W., & Lozano Meneses, L. P. (2022). *Estudio técnico y financiero de un sistema hidropónico para un policultivo en zonas urbanas de Bogotá D.C.* <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/6003cf56-f304-4119-8b0a-ed57988ddf34/content>

Sánchez, E. (2023). *Hydroponics Systems and Principles Of Plant Nutrition: Essential Nutrients, Function, Deficiency, and Excess.*

Predicción de la Producción de Cacao en Santander mediante Modelos de Machine Learning en Python

J. González¹, H. Castro², J. E. Tierradentro Cruz³, J. M. Méndez Sayago⁴ y G. Vera Rizzo⁵

¹ Fundación Universitaria del Área Andina, 110221, Bogotá, Colombia,
Jgonzalez346@estudiantes.areandina.edu.co

² Fundación Universitaria del Área Andina, 110221, Bogotá, Colombia, hcastro23@estudiantes.areandina.edu.co

³ Fundación Universitaria del Área Andina, 110221, Bogotá, Colombia, jtierradentro3@areandina.edu.co

⁴ Fundación Universitaria del Área Andina, 110221, Bogotá, Colombia, jmendez97@areandina.edu.co

⁵ Fundación Universitaria del Área Andina, 110221, Bogotá, Colombia, gvera6@areandina.edu.co

Resumen

El proyecto desarrollado se centra en predecir la producción de cacao en Santander, Colombia, utilizando modelos de machine learning en Python. Este sistema se diseñó para ayudar a los productores de cacao a mejorar la toma de decisiones al proporcionarles predicciones precisas basadas en datos históricos. A diferencia de otros enfoques, se optó por incluir variables ambientales en conjunto con datos históricos de producción y datos geoespaciales, lo que permite al modelo ser más robusto. La metodología incluyó la recopilación y limpieza de datos, la selección de características relevantes y la evaluación de diversos modelos de machine learning, como regresión lineal, árboles de decisión y bosques aleatorios. Se realizó un ajuste de hiperparámetros, pero paradójicamente, este proceso llevó a una disminución en la precisión de las predicciones. Los resultados mostraron que los modelos desarrollados ofrecen estimaciones precisas de la producción de cacao, proporcionando una herramienta valiosa para los productores. Estas predicciones permiten a los agricultores planificar mejor sus operaciones y tomar decisiones informadas sobre la gestión de recursos y estrategias de mercado.

Palabras clave: Machine Learning, Toma de decisiones, Cacao, predicción, Optimización

Predicting Cocoa Production in Santander using Machine Learning Models in Python

Abstract

The project developed focuses on predicting cocoa production in Santander, Colombia, using machine learning models in Python. This system was designed to help cocoa farmers improve decision making by providing accurate predictions based on historical data. Unlike other approaches, it was chosen to include environmental variables in conjunction with historical production data and geospatial data, which allows the model to be more robust. The methodology included data collection and cleaning, selection of relevant features, and evaluation of various machine learning models, such as linear regression, decision trees, and random forests. Hyperparameter tuning was performed, but paradoxically, this process led to a decrease in the accuracy of the predictions. The results showed that the developed models offer accurate estimates of cocoa production, providing a valuable tool for producers. These predictions allow farmers to better plan their operations and make informed decisions about resource management and market strategies. Additionally, the integration of the model into a platform accessible to producers was explored, which would maximize its impact on the cocoa sector. This project not only seeks to optimize current production, but also contribute to the sustainable growth and competitiveness of Colombian cocoa in the national and international market. This project demonstrates the potential of artificial intelligence to transform agricultural management in Colombia, offering an innovative approach to predicting the production of key crops such as cocoa, and underscoring the importance of technological tools in strengthening local agriculture.

Keywords: Machine Learning, Decision Making, Cocoa, prediction, Optimization

Introducción

El proyecto se llevó a cabo en la región de Santander, Colombia, una zona reconocida por su alta producción de cacao. Santander aporta el 41,7 % de la producción de cacao total del país, con una productividad superior a la de otros departamentos como de Colombia como Antioquia. Esto sugiere que Santander podría servir como un modelo para mejorar la productividad en otras regiones (Saldarriaga, 2021). lo que hace que la implementación de modelos de machine learning sea particularmente relevante para optimizar la planificación y toma de decisiones en la agricultura local. La elección de esta ubicación se basa en la disponibilidad de datos históricos de producción, así como en la importancia económica del cacao para la región y el país.

Materiales y Métodos

El desarrollo propuesto se basó significativamente en los procesos descritos en la investigación de (Aworka et al., 2022) junto con la metodología descrita por (Géron, 2022). Esta investigación abarca etapas como el preprocesamiento de datos, el análisis de datos, la ingeniería de características, el proceso de entrenamiento y la evaluación posterior. La Figura 1 muestra el diagrama de procesos utilizados en esta investigación.

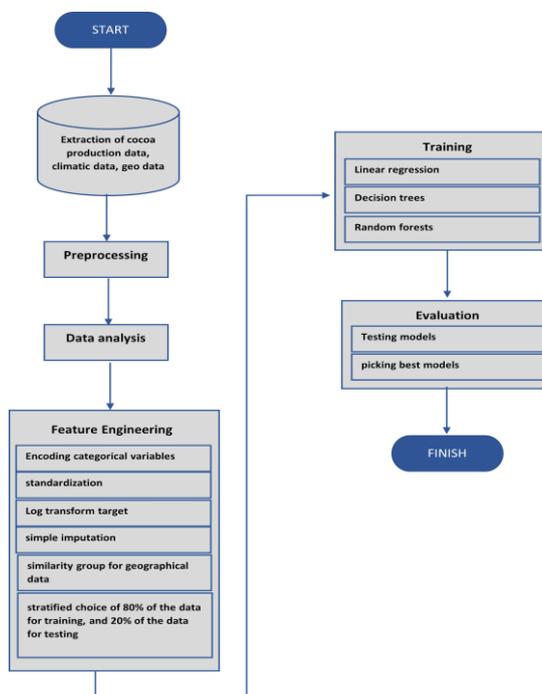


Figura 1. Diagrama de procesos para el desarrollo de los modelos de machine Learning

Con base a este diagrama de procesos, el proyecto comenzó con la identificación y extracción de datos relevantes, priorizando aquellos relacionados con la producción de cacao en Santander. La recopilación de datos se centró en fuentes abiertas, siendo el MADR (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural) el proveedor de los datos productivos, los datos recolectados incluyen variables como el área sembrada, área cosechada, la producción total, y el rendimiento. Adicionalmente, se identificó la necesidad de incluir datos ambientales específicos del departamento de Santander para el período 2007-2018. Estos datos, proporcionados por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), incluyen variables como precipitaciones, humedad, temperatura y brillo solar. Por último, se recopilieron datos geográficos, específicamente coordenadas de latitud y longitud, necesarios para realizar análisis geoespaciales que permitan comprender la distribución espacial de la producción de cacao en la región. Estos datos geográficos fueron obtenidos del Laboratorio Urbano

Bogotá, que proporciona conjuntos de datos en formato GeoJSON, facilitando el almacenamiento y manipulación eficiente de la información geoespacial.

Se realizó el preprocesamiento de datos porque es crucial en el desarrollo de modelos de machine learning, ya que ajusta y mejora los datos para un análisis eficiente, asegurando que estén en la forma adecuada para crear modelos predictivos confiables.

La limpieza de datos es fundamental para garantizar la consistencia y reducir sesgos en los modelos predictivos. Este proceso se basó en la eliminación de outliers, la corrección de errores tipográficos y la remoción de registros duplicados. En el conjunto de datos analizado, no se encontraron duplicados, y los valores faltantes se abordaron mediante imputación por la media. Este enfoque, que es tanto simple como efectivo, sustituye los valores ausentes por el promedio de los datos disponibles en cada variable, preservando la integridad del conjunto de datos y minimizando su impacto en el análisis y el desempeño del modelo.

Muchas técnicas de machine learning requieren que los datos sean numéricos, por lo que es necesario transformar las variables categóricas. Para ello, se identificaron todas las variables no numéricas en el conjunto de datos y se aplicó la técnica de codificación one hot, que convierte cada categoría en una columna binaria. Esto asegura que cada categoría se represente de manera independiente, evitando problemas de orden implícito. Después de aplicar la codificación, se verificó que todas las variables categóricas se transformaran correctamente.

La estandarización es esencial en el preprocesamiento de datos, especialmente cuando las variables tienen diferentes unidades de medida, como la producción de cacao en toneladas y la temperatura en grados Celsius. Sin estandarización, las variables con escalas mayores podrían dominar el análisis. Para evitar esto, se aplicó la estandarización, transformando las variables numéricas para que tengan una media de cero y una desviación estándar de uno, lo que las coloca en una escala común y asegura un modelado equilibrado. Gracias a la transformación logarítmica se identificaron variables con distribuciones sesgadas a la derecha, como la producción, lo que podría afectar negativamente el rendimiento de los modelos predictivos. Para corregir esto, se aplicó una transformación logarítmica, que redujo la cola pesada de la distribución, haciendo que la distribución sea más simétrica. La Figura 2 muestra cómo esta transformación mejoró la simetría en la variable de producción.

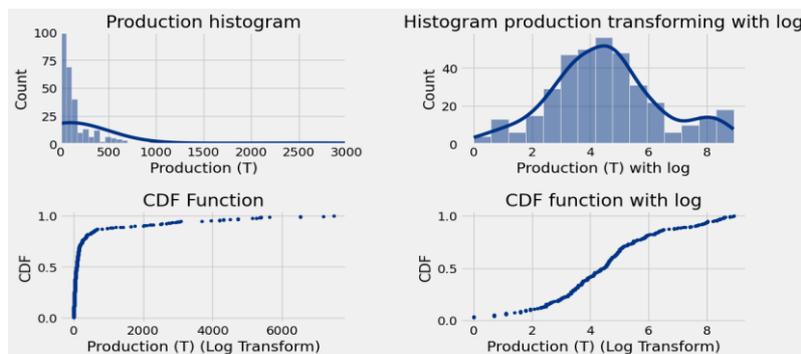


Figura 2. Transformación de una distribución sesgada a la derecha para acercarla a una distribución gaussiana

Toda la etapa de preprocesamiento de datos fue implementada a través de una canalización, también conocida como pipeline. Este enfoque tiene varias ventajas significativas. En primer lugar, permite automatizar y estandarizar los distintos pasos del preprocesamiento, asegurando que se apliquen de manera consistente a lo largo de todos los datos. Además, facilita la reproducibilidad del análisis, ya que cada transformación aplicada queda registrada dentro de la estructura del pipeline, lo que permite rastrear y replicar fácilmente los procedimientos. Finalmente, el uso de pipelines simplifica la integración del preprocesamiento con el entrenamiento de modelos, creando un flujo de trabajo más eficiente y menos propenso a errores, la figura 3 detalla la estructura del preprocesamiento canalizadas.

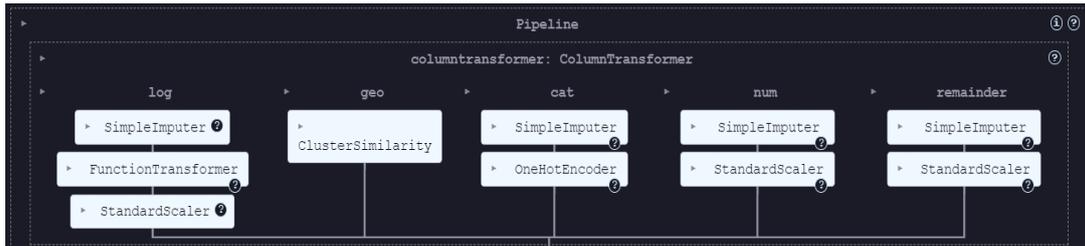


Figura 3. Estructura del Pipeline de Preprocesamiento de Datos

El objetivo principal del de este proceso es comprender la estructura y relaciones dentro del conjunto de datos antes de aplicar técnicas avanzadas. Se utilizaron técnicas estadísticas y visualizaciones gráficas para explorar los datos de manera efectiva. Se revisaron las distribuciones de las variables, especialmente las de producción y área cosechada, para identificar patrones espaciales y variaciones geográficas que influyen en el rendimiento del cacao.

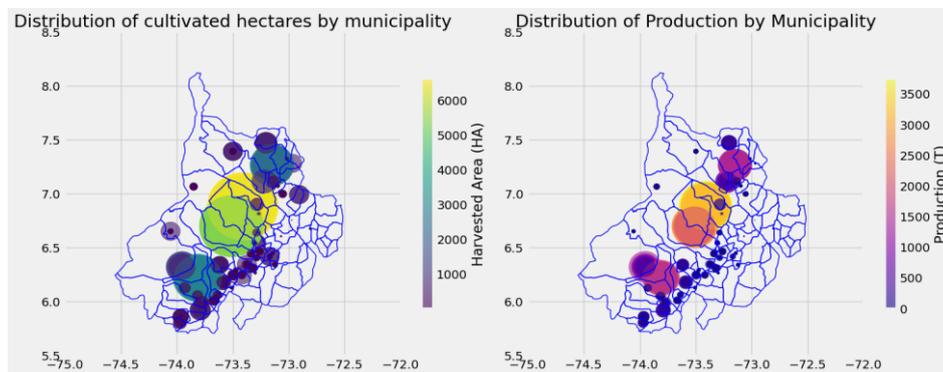


Figura 4. Comparación entre distribución geográfica de la variable de hectáreas cultivadas (HE) y la variable de producción (T)

También se decidió analizar la distribución de las variables ambientales, con el objetivo de obtener una visión integral del contexto y detectar posibles patrones. La Figura 5 muestra una comparación enfocada en estas variables.

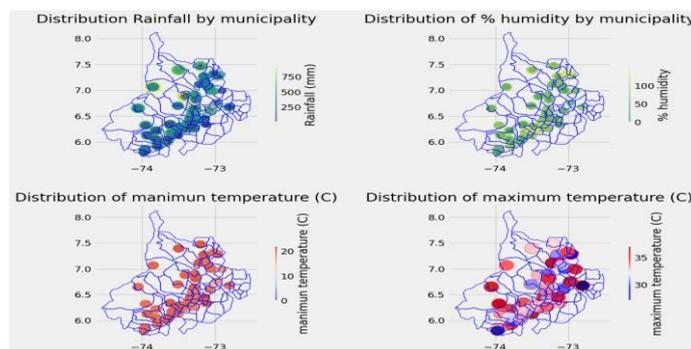


Figura 5. Comparación entre distribución geográfica de las variables ambientales de precipitación, humedad, temperatura máxima y temperatura mínima

Adicionalmente se generó una matriz de correlación de Pearson para evaluar la relación lineal entre las variables numéricas. Esta matriz, como se muestra en la Figura 6, ofrece una visión clara de las correlaciones, ayudando a identificar las variables más adecuadas para predicciones y las posibles variables objetivo.

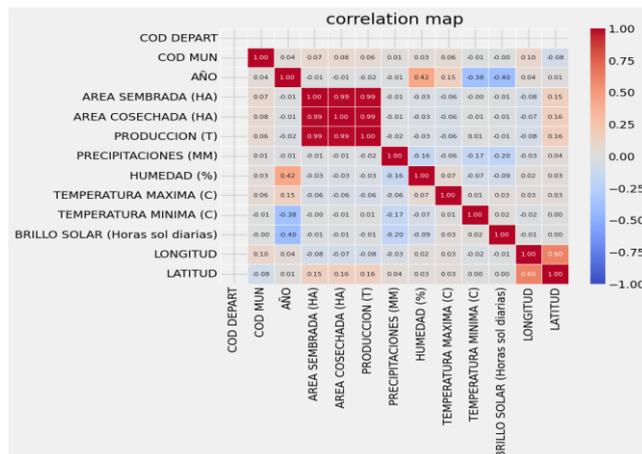


Figura 6. Matriz de correlación de Pearson

La matriz de correlación permitió identificar relaciones lineales significativas entre las variables analizadas, proporcionando una comprensión inicial de cómo están relacionadas. Este análisis es fundamental para evaluar la fuerza y dirección de las relaciones lineales entre las variables, lo que ayuda a interpretar cómo cambian conjuntamente. En este caso, se observó una correlación fuerte entre "Área Sembrada" y "Área Cosechada" con respecto a la variable "Producción". Esto indica que estas variables tienen una relación lineal positiva significativa. La Figura 7 presenta una matriz de dispersión que ilustra estas relaciones, facilitando una visualización detallada de las correlaciones identificadas."

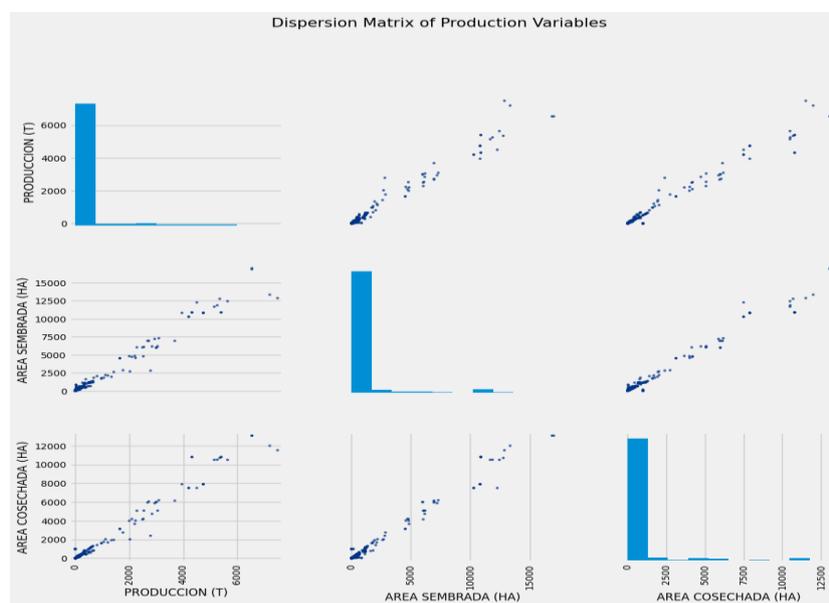


Figura 7. Gráfico de dispersión de variables mejor correlacionadas

Para el entrenamiento y validación de los modelos, el modelo de Regresión Lineal se entrenó utilizando la biblioteca scikit-learn para establecer una relación lineal entre las características de entrada y la variable objetivo. Se dividieron los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba mediante la técnica StratifiedShuffleSplit para mantener una proporción equilibrada de clases. Se creó un pipeline de preprocesamiento que incluyó la estandarización, codificación y manejo de valores faltantes. Tras entrenar el modelo con el conjunto de entrenamiento, se evaluó el modelo mediante técnicas de validación como el MSE y el MAPE, además de crear validaciones un poco más robustas

como la validación cruzada. Finalmente, el modelo fue evaluado con el conjunto de prueba, demostrando su capacidad para predecir la producción de cacao.

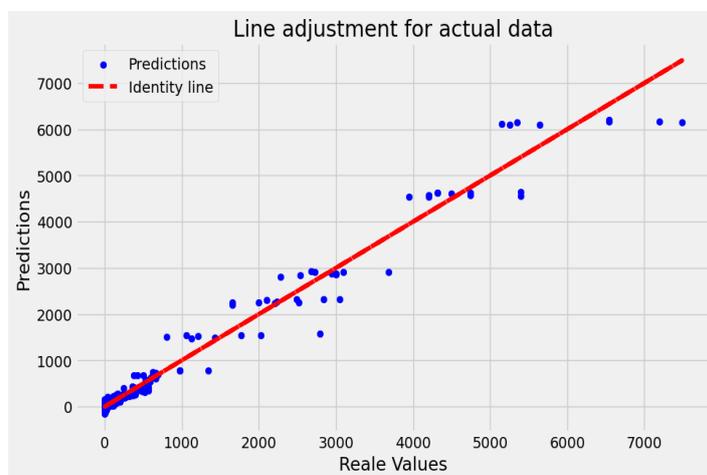


Figura 8. Ajuste de la línea de regresión para los datos de entrenamiento

El modelo de Árboles de Decisión se entrenó usando la implementación de DecisionTreeRegressor de scikit-learn, que modela decisiones y sus consecuencias mediante una estructura de árbol. A diferencia de la regresión lineal, este enfoque captura interacciones complejas entre características sin necesidad de extensas transformaciones de datos. Al igual que en la regresión lineal, los datos se dividieron en conjuntos de entrenamiento y prueba utilizando StratifiedShuffleSplit para mantener el equilibrio en las clases. Se empleó un pipeline de preprocesamiento para transformar las características numéricas, categóricas y geográficas, antes de integrar el modelo DecisionTreeRegressor. La figura 9 muestra como predijo este modelo, nótese que en los datos de entrenamiento sobre ajuste los datos.

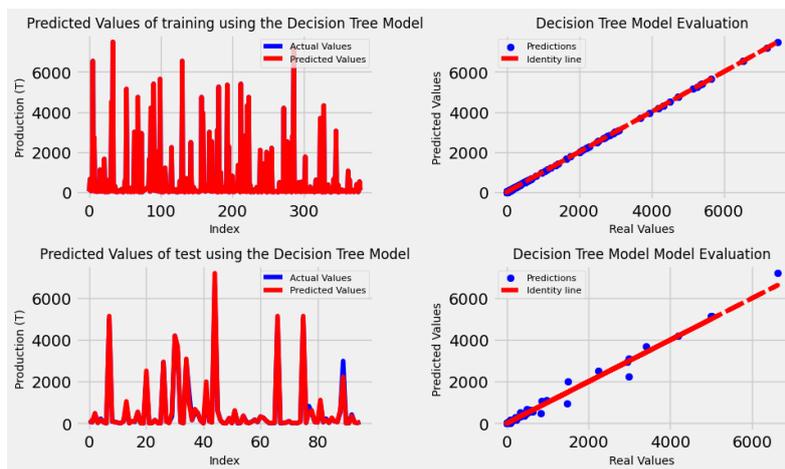


Figura 9. Comportamiento en las predicciones del modelo de árboles de decisión

En cuanto al modelo de bosques aleatorios se siguió la misma estructura dada por los anteriores modelos donde se reutilizó el pipeline de preprocesamiento utilizando la clase ColumnTransformer para aplicar diferentes transformaciones, otra diferencia destacable es que el modelo no sobreajustó los datos de entrenamiento a diferencia del modelo de árboles de decisión, el comportamiento de las predicciones tanto en los datos de entrenamiento como los datos de prueba de evidencian en la figura 10.

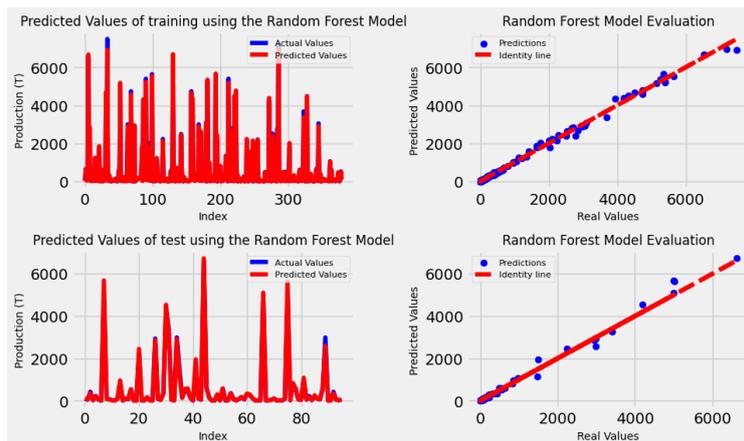


Figura 10. Comportamiento en las predicciones del modelo de bosques aleatorios

Resultados y Discusión

En el proceso de selección del modelo más adecuado para la predicción, se consideraron como criterios fundamentales diversas validaciones, entre las que se incluyen el Error Cuadrático Medio (MSE), el Error Absoluto Medio Porcentual (MAPE) y la validación cruzada. Estos métodos de evaluación permitieron medir la precisión y robustez de cada modelo en el contexto de los datos utilizados. Posteriormente, se llevó a cabo una comparación exhaustiva de las métricas obtenidas por los diferentes modelos entrenados, con el objetivo de identificar cuál ofrecía un mejor desempeño.

Los resultados de esta comparación se presentan en la Tabla 1. En dicha tabla, se observa que, aunque todos los modelos lograron un rendimiento satisfactorio, el modelo de bosques aleatorios se destacó significativamente por su capacidad para predecir con alta precisión. Este modelo alcanzó un rendimiento del 98.96%, un valor notablemente superior al de los demás. Esta alta precisión se debe a su capacidad para manejar relaciones no lineales entre las variables, lo que le permite capturar patrones complejos en los datos que otros modelos lineales podrían no detectar. Además, el modelo de bosques aleatorios mostró una gran habilidad para evitar el sobreajuste, lo que significa que no se limitó a ajustarse únicamente a los datos de entrenamiento, sino que también generalizó bien a datos nuevos y no vistos.

Este hallazgo se alinea con los estudios de (Aworka et al., 2022) y (Dhaliwal & Williams, 2024), que también observaron la superioridad de los bosques aleatorios en la predicción de variables agrícolas. En estas investigaciones encontraron que los bosques aleatorios superaron a otros métodos en la predicción de rendimientos de cultivos, atribuyendo esto a su capacidad para manejar la alta dimensionalidad y las interacciones complejas entre variables. Del mismo modo, destacaron que los bosques aleatorios ofrecieron mejores resultados en comparación con técnicas más simples, como los árboles de decisión y la regresión lineal, especialmente en escenarios donde la variabilidad de los datos era alta y las relaciones entre variables eran complejas.

Estos estudios refuerzan la validez de los resultados y sugieren que los bosques aleatorios son una herramienta potente para la predicción en el ámbito agrícola, proporcionando una solución más robusta y precisa en comparación con otros modelos evaluados. La capacidad de los bosques aleatorios para integrar y procesar múltiples árboles de decisión simultáneamente les permite capturar patrones y relaciones que otros métodos pueden pasar por alto, lo que es crucial para la toma de decisiones informadas en la agricultura.

Tabla 1. Comparación de las diferentes métricas de evaluación para cada uno de los modelos entrenados

Modelo	MSE entrena	MSE Prueba	MAPE entrena %	MAPE Prueba %	Valid. Cruzada	%Rendi. entrena	%Rendi. Prueba
Regresión Lineal	198,80	271,09	214,13%	222,58%	193,191	97,50%	95,51%
Árboles Decisión	0	142,88	0%	22,08%	192,887	100%	98,75%
Bosques Aleatorios	66,44	130,48	8,29%	17,57%	154,17	99,72%	98,96%

En el análisis de los bosques aleatorios, se identificó que las variables más importantes, conocidas como variables relativas o de importancia relativa, revelan que las variables geográficas desempeñaron un papel crucial en la precisión del modelo. Este hallazgo sugiere que factores como la ubicación geográfica tienen una influencia significativa en la capacidad predictiva del modelo.

Además de las variables geográficas, el análisis mostró que el área cosechada y el área sembrada también son fundamentales para las predicciones del modelo, aunque en menor medida. Sin embargo, es importante destacar que estas variables pueden estar reflejando otros factores subyacentes, como la eficiencia en el sistema de riego, la calidad del manejo del suelo o la aplicación de tratamientos fitosanitarios, especialmente en parcelas más grandes. Por tanto, no deben interpretarse como causales directas, sino como indicadores que capturan en parte la influencia de prácticas agrícolas y condiciones específicas del manejo del cultivo. Esto refuerza la idea de que, si bien las características geográficas tienen un peso predominante, las prácticas agronómicas asociadas a la extensión de las áreas de cultivo también contribuyen de manera significativa a la predicción de los rendimientos.

Para comprender mejor la influencia de las variables geográficas, se llevó a cabo un mapeo detallado de estas variables como se muestra en la Figura 11. Este proceso implicó la visualización de los datos geoespaciales para identificar y analizar los lugares donde el modelo mostró un mejor rendimiento. Al mapear las variables geográficas, se logró evidenciar patrones espaciales y relaciones entre las ubicaciones específicas y las predicciones del modelo. Esta visualización permitió observar cómo ciertas características geográficas, como la proximidad a infraestructura civil, o las cercanías a centros de comercio como la ciudad de Bucaramanga, afectaron positivamente las predicciones del rendimiento de los cultivos, aunque es imprescindible destacar que para poder determinar.

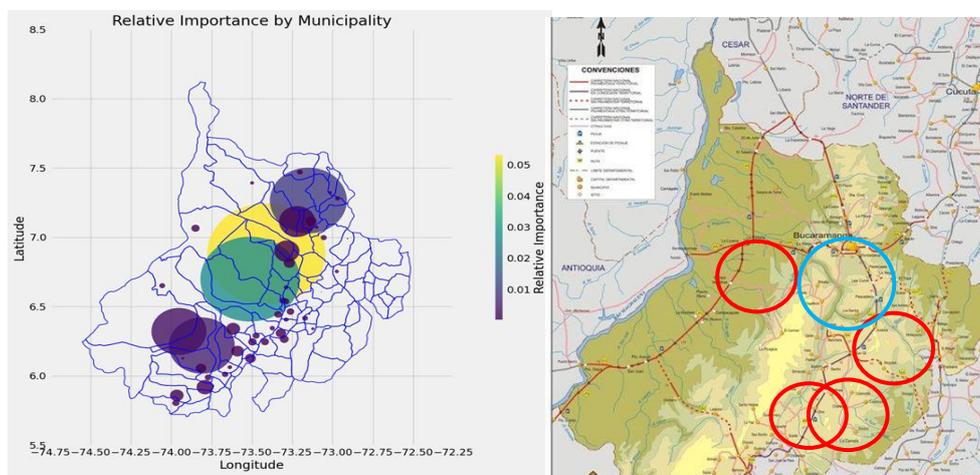


Figura 11. Comparación de la producción de cacao en relación con el acceso a las principales carreteras regionales y a las principales ciudades del departamento.

Conclusiones

Con base en la evaluación de diferentes modelos de *machine learning*, como la regresión lineal, los árboles de decisión y los bosques aleatorios, se ha demostrado que los modelos más complejos, como los bosques aleatorios, tienden a ofrecer una mayor precisión en la predicción de la producción. Sin embargo, es crucial tener en cuenta el balance entre la precisión del modelo y su interpretabilidad. Modelos más sencillos, como la regresión lineal, aunque menos precisos, pueden ser más fáciles de entender y aplicar en contextos prácticos.

Es importante destacar que, para lograr resultados confiables, la selección adecuada de las variables es fundamental. Esto implica tener cuidado de no asumir una relación de causalidad directa entre las variables analizadas y la producción. Identificar factores subyacentes y comprender las verdaderas relaciones entre las variables garantiza obtener correlaciones significativas y evitar interpretaciones erróneas.

Los resultados obtenidos de los diferentes modelos no solo ofrecen una comprensión profunda de la capacidad predictiva en la producción de cacao, sino que también tienen implicaciones significativas para la toma de decisiones estratégicas en la agroindustria. Al utilizar modelos como los bosques aleatorios, que han demostrado un equilibrio óptimo entre precisión y generalización, los empresarios agroindustriales pueden mejorar la planificación de sus operaciones, optimizando la asignación de recursos y anticipándose a fluctuaciones en la producción. Esto es particularmente relevante en las regiones analizadas, donde prever variaciones en la producción permite a los agricultores y empresarios ajustar sus estrategias de compra, venta y distribución de manera proactiva, reduciendo riesgos financieros y mejorando la rentabilidad.

Bibliografía

Aworka, R., Cedric, L. S., Adoni, W. Y. H., Zoueu, J. T., Mutombo, F. K., Kimpolo, C. L. M., Nahhal, T., & Krichen, M. (2022). Agricultural decision system based on advanced machine learning models for yield prediction: Case of East African countries. *Smart Agricultural Technology*, 2. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100048>

Dhaliwal, D. S., & Williams, M. M. (2024). Sweet corn yield prediction using machine learning models and field-level data. *Precision Agriculture*, 25(1), 51–64. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10057-1>

Géron, A. (2022). *Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems* (2nd ed.). O'Reilly Media, Inc.

IDEAM. (2024). *Recopilación Datos Ambientales*. IDEAM.

MADR. (2021, July 27). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/cacao/24jd-fsbf/about_data

Saldarriaga, J. (2021). Proyecto priorizado por la Comisión Regional de Competitividad e Innovación para su gestión. *Ministerio de Comercio*.

Nuevas estrategias basadas en biodiversidad y teledetección para reducir el uso de fertilizantes nitrogenados en la zona del mediterráneo

J. Muñoz-Acero¹, H. Puerto¹, L. Yabor², S. Pardo-Pina¹, F. García-Sánchez², J.M. Cámara-Zapata¹

¹ Instituto de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Universidad Miguel Hernández, 03312 Orihuela, Spain: julia.munoz@umh.es; hpuerto@umh.es; spardo@umh.es; jm.camara@umh.es

² Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC), Campus Universitario Espinardo, Murcia, 30100 Espinardo, Murcia: lolayabor0373@gmail.com; fgs@cebas.csic.es

Resumen

El exceso de nitrógeno en el agua puede dar lugar a la eutrofización, un fenómeno que provoca un crecimiento descontrolado de algas, lo que reduce los niveles de oxígeno y afecta a la biodiversidad acuática. Estos compuestos pueden llegar a los diferentes cuerpos de agua a través de la escorrentía de suelos agrícolas o de sistemas sépticos. Muchos países de la cuenca mediterránea con gran actividad agrícola sufren problemas ambientales como estos cada vez más frecuentes, debido al mal manejo agronómico del suelo agrario a la gran necesidad de producción. La mejora de la gestión del nitrógeno se ha vuelto crucial para mitigar estos impactos ambientales. Una manera de abordar el problema de forma sostenible, natural y que favorezca la biodiversidad es introducir en los cultivos plantas que liberen a través de sus raíces compuestos orgánicos capaces de interferir en el proceso de nitrificación. Estos compuestos llamados inhibidores biológicos de la nitrificación (NBI) interactúan con la actividad microbiana presente en el suelo responsable de la conversión del amonio a nitrato, ralentizan esta transición y permiten permanecer al amonio en el suelo durante mayor tiempo. Este compuesto ofrece una serie de ventajas como mayor absorción y asimilación, así como la reducción de la lixiviación hacia las capas profundas del suelo, evitando que alcance zonas de acuíferos y cuerpos de agua.

Palabras clave: Reducción contaminación nitratos, plantas NBI, Teledetección, Región agrícola mediterránea, Cultivos hortícolas

New biodiversity-based strategies and remote sensing to reduce the use of nitrogen fertilizers in the Mediterranean region

Abstract

An excess of nitrogen in water can lead to eutrophication, a phenomenon that causes uncontrolled algae growth, reducing oxygen levels and affecting aquatic biodiversity. These compounds can reach various bodies of water through runoff from agricultural soils or septic systems. Many countries in the Mediterranean basin with extensive agricultural activity are increasingly facing environmental problems like these due to poor land use and the high demand for production. Improving nitrogen management has become crucial to mitigating these environmental impacts. One sustainable and natural way to address the problem while promoting biodiversity is to introduce plants that release organic compounds through their roots capable of interfering with the nitrification process. These compounds, known as biological nitrification inhibitors (BNI), interact with the microbial activity in the soil responsible for converting ammonium to nitrate, slowing this transition and allowing ammonium to remain in the soil for a longer period. This approach offers several advantages, such as greater absorption and assimilation, as well as reducing leaching into the deeper layers of the soil, preventing it from reaching aquifers and bodies of water.

Keywords: nitrate pollution reduction, NBI plants, Remote sensing, Mediterranean agricultural region, Horticultural crops

Introducción

La nitrificación y la desnitrificación son procesos naturales importantes en la eliminación del nitrógeno de los residuos orgánicos. La alteración en los ritmos de estos procesos, siendo en gran medida responsables los sistemas agrícolas, pueden dar lugar a contaminaciones ambientales (Schlesinger, 2009; Subbarao et al., 2006). A lo largo de los años se han ido estudiando nuevas formas de mitigar el impacto de los fertilizantes nitrogenados sobre el medio ambiente, la mayoría centradas en el bloqueo o ralentización de la nitrificación en el suelo, llevado a cabo por algunas arqueas y las bacterias *Nitrosomonas sp.* y *Nitrobacter spp.* (Taylor et al., 2010). Este proceso consiste en la oxidación biológica de NH_4^+ a NO_3^- pasando por nitrito, siendo estos últimos compuestos controvertidos para el medio ambiente (Leninger et al., 2006).

Con una liberación de N aproximada de 4 millones de toneladas al año, los suelos agrícolas representan casi la mitad de las emisiones antropogénicas mundiales de NO_2^- (Mosier et al., 1998; IPCC, 2001). El exceso de nitrito en la atmósfera contribuye significativamente al calentamiento global debido a su capacidad para absorber la luz infrarroja y su larga vida atmosférica (IPCC, 2007). La facilidad de lixiviación de nitrato hacia las capas profundas de la tierra lo convierten en un serio problema para las masas de agua, acelerando procesos como la eutrofización (Purkhold et al., 2000; Strauss et al., 2014). Este proceso da como resultado importantes perturbaciones en los ecosistemas acuáticos: deterioro de la calidad del agua, pérdida de biodiversidad, cambios en los taxones dominantes, repercusiones sobre bienes y servicios ecosistémicos, etc. (Le Moal et al., 2019; Heino et al., 2021). El Mar Menor es una de las lagunas costeras saladas más grandes de Europa. En la actualidad existen múltiples normas de protección para asegurar su integridad, sin embargo, la contaminación difusa que proviene de las zonas agrícolas cercanas no se ha controlado (Perni & Martínez-Paz, 2013).

Se han propuesto y patentado numerosos compuestos sintéticos como inhibidores de la nitrificación (NI) que inhiben las enzimas encargadas de la degradación de NH_4^+ , permitiendo permanecer a este compuesto en el suelo durante más tiempo (Malzer, 1979; McCarty, 1999; Subbarao et al., 2006, Shaviv & Mikkelsen, 1993). La nitrapirina, diciandiamida (DCD) y el fosfato de 3,4-dimetil pirazol (DMPP) son algunos de los compuestos aislados y evaluados para mitigar los efectos nocivos de los fertilizantes nitrogenados. Sin embargo, su utilización no es eficaz debido a que aunque algunos NI pueden permanecer en el suelo durante mucho tiempo no son bioactivos debido a que se adsorben a los coloides, se hidrolizan rápidamente o volatilizan. Diversos factores del suelo como el pH o la temperatura limitan la eficiencia de los NI sintéticos, teniendo un rendimiento desigual en diversos entornos agroclimáticos y edafológicos (Gomes y Loynachan, 1984; McCall y Swann, 1978).

La influencia de la vegetación en la inhibición de la nitrificación se ha especulado y sospechado durante mucho tiempo. Ciertos árboles tropicales, forestales como el madroño (*Arbutus unedo*) y algunas gramíneas como el sorgo (*Sorghum spp.*) segregan compuestos por las raíces que influyen en la nitrificación, afectando la actividad del suelo (Castaldi et al., 2009; Christ et al., 2002; Subbarao et al., 2006). Estas especies, llamadas inhibidores biológicos de la nitrificación (NBI), necesitan ser estudiadas en profundidad para determinar cuáles son estos compuestos y la tasa de nitrificación en las diferentes áreas agrícolas, entre otras cuestiones, para desarrollar nuevas estrategias de cultivo sostenibles.

Tradicionalmente, se vienen utilizando pruebas de suelo, análisis de tejido vegetal, medidores de clorofila para evaluar la disponibilidad de N para los cultivos. Actualmente existen técnicas de bajo costo y no intrusivas para las plantas consistentes en mediciones de radiación reflejada por el cultivo, conocido como teledetección (Daughtry et al., 2000). El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es el índice más utilizado para control remoto en plantas en las dos últimas décadas, teniendo numerosas aplicaciones, como la estimación del rendimiento de los cultivos y la biomasa seca de fin de temporada (Gao, 1996; Tucker et al., 1986). Otro índice muy utilizado en agricultura de precisión es GNDVI, una modificación del NDVI más sensible al contenido de clorofila. Entre sus aplicaciones destaca la evaluación de variación de la cubierta vegetal, siendo un buen indicador del estrés y la mala salud de los cultivos (Lim y Nam 2007; Wright 1998).

Objetivos

- Comprender la distribución espacial y temporal de los nitratos en los sistemas agrícolas (suelo, planta, solución de drenaje y aguas subterráneas) y las necesidades nutricionales de las diferentes variedades de cultivos.
- Desarrollar rangos nutricionales para la interpretación del análisis mineral de los cultivos con el fin de gestionar eficientemente la fertilización nitrogenada
- Calibrar y validar la tecnología de vigilancia de nitratos en los sistemas agrícolas y desarrollo de un sistema de apoyo a la adopción de decisiones para ayudar a los agricultores a gestionar la fertilización de los cultivos de manera sostenible
- Selección de plantas con inhibidores naturales de la nitrificación, introducción y validación en los cultivos

Materiales y Métodos

Las actividades y tareas a realizar en el proyecto se pueden agrupar en cuatro bloques experimentales (Figura 1):

1. Agronómico: estudio de la producción y calidad de los cultivos hortícolas.
2. Nutricional: estudio del estado nutricional de las plantas y del suelo, medido mediante métodos analíticos estándar: nitratos, N-total, amonio, etc.
3. Herramientas de monitoreo: uso de nuevas tecnologías como drones, imágenes satelitales, índices de vegetación (Tabla 1), electrodos selectivos, sondas rhizon, parámetros de intercambio de gases, fluorescencia de clorofila y unidades SPAD.
4. Herramientas de análisis ómicas: uso de equipos de análisis ómicos para caracterizar las respuestas metabólicas y bioquímicas de las plantas, así como la composición de los exudados radiculares de plantas NBI.

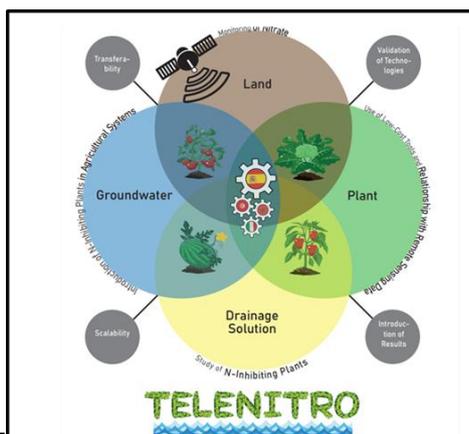


Figura 1. Herramientas tecnológicas para la gestión del nitrógeno en la nueva agricultura hortícola.

Tabla 1. Índices de vegetación.

Índice	Nombre	Ecuación	Bandas Sentinel (longitud nm)	Autores
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$	NIR (860nm): B8a RED (666nm): B4 NIR (801nm): B8 RED (670nm): B4	Gu, Y., E. Hunt, B. Wardlow, J. B. Basara, J. F. Brown, and J. P. Verdin (2008), Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data, <i>Geophys. Res. Lett.</i> , 35, L22401, doi:10.1029/2008GL035772. Daughtry, C. S., Walthall, C. L., Kim, M. S., De Colstoun, E. B., & McMurtrey Iii, J. E. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. <i>Remote sensing of Environment</i> , 74(2), 229-239.
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index	$GNDVI = \frac{(NIR - GREEN)}{(NIR + GREEN)}$	NIR (801nm): B8 GREEN (550nm): B3	Daughtry, C. S., Walthall, C. L., Kim, M. S., De Colstoun, E. B., & McMurtrey Iii, J. E. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. <i>Remote sensing of Environment</i> , 74(2), 229-239.
NDWI	Normalized Difference Water Index	$NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$	NIR (860nm): B8a SWIR (1240nm): B10	Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. <i>Remote sensing of environment</i> , 58(3), 257-266.
GCI	Green Coverage Index	$GCI = \frac{NIR}{GREEN} - 1$	NIR (840-880nm): B8, B8a GREEN (545-565nm): B3	A. A. Gitelson, A. Vina, T. J. Arkebauer, D. C. Rundquist, G. Keylan and B. Leavitt, "Remote Estimation of Leaf Area Index and Green Leaf Biomass in Maize Canopies", <i>Geophysical Research Letters</i> , vol. 30, pp. 1248, 2003.

Resultados y Discusión

- Desarrollar rangos de interpretación nutricional a partir del análisis mineral de los cultivos para gestionar de manera eficiente la fertilización con nitrógeno.
- Determinar las necesidades reales de nitrógeno de cada uno de los cultivos en estudio y cómo responden a dosis deficientes de este nutriente.
- Obtener algoritmos para interpretar imágenes hiperespectrales de satélite y drones en términos de concentración de nutrientes en las plantas y su crecimiento vegetativo.
- Determinar la capacidad de excreción de los productos NBI en cada variedad de planta estudiada.

- Diseñar una estrategia de cultivo basada en la optimización de la fertilización con nitrógeno y el uso de plantas NBI para mejorar el uso eficiente del nitrógeno, reducir el uso de fertilizantes y evitar la lixiviación de nitratos.
- Desarrollar un Sistema de Soporte a la Decisión (DSS) que ayude al agricultor a seleccionar y utilizar plantas inhibidoras de la nitrificación (NBI) y a gestionar la fertilización con fertilizantes nitrogenados.

Bibliografía

- Castaldi, S., Carfora, A., Fiorentino, A., Natale, A., Messere, A., Miglietta, F., & Cotrufo, M. F. (2009). Inhibition of net nitrification activity in a Mediterranean woodland: Possible role of chemicals produced by *Arbutus unedo*. *Plant and Soil*, 315, 273–283. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9750-x>
- Christ, M. J., Peterjohn, W. T., Cumming, J. R., & Adams, M. B. (2002). Nitrification potentials and land-landscape, soil and vegetation characteristics in two Central Appalachian watersheds differing in NO_3^- export. *Forest Ecology and Management*, 159(3), 145–158. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00725-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00725-8)
- Daughtry, C. S., Walthall, C. L., Kim, M. S., De Colstoun, E. B., & McMurtrey Iii, J. E. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote sensing of Environment*, 74(2), 229–239 [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9)
- Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gomes, S. L., & Loynachan, T. E. (1984). Nitrification of anhydrous ammonia related to nitrapyrin and time-temperature interactions 1. *Agronomy Journal*, 76(1), 76, 9–12. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600010003x>
- Heino, J., Alahuhta, J., Bini, L.M., Cai, Y.J., Heiskanen, A.-S., Hellsten, S., Kortelainen, P., Kotamäki, N., Tolonen, K.T., Vihervaara, P., Vilmi, A. & Angeler, D.G. (2021). Lakes in the era of global change: moving beyond single-lake thinking in maintaining biodiversity and ecosystem services. *Biological Reviews*, 96(1), 89–106. <https://doi.org/10.1111/brv.12647>.
- IPCC (2001): Climate Change 2001, in Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguera, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C. A. (eds.): The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis, in Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. (eds.): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Le Moal, M., Gascuel-Oudou, C., Ménesguen, A., Souchon, Y., Etrillard, C., Levain, A., Moatar, F., Pannard, A., Souchu, P., Lefebvre, A., & Pinay, G., 2019. Eutrophication: a new wine in an old bottle? *Science of the total environment*, 651, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139>.
- Leninger, S., Urich, T., Schloter, M., Schwark, L., Qi, J., Nicol, G. W., Prosser, J. I., Schuster, S. C., & Schleper, C. (2006). Archaea predominate among ammonia-oxidizing prokaryotes in soils. *Nature* 442(7104), 806–809. <https://doi.org/10.1038/nature04983>
- Lim, P. O., & Nam, H. G. (2007). Aging and senescence of the leaf organ. *Journal of Plant Biology*, 50(3), 291–300. <https://doi.org/10.1007/BF03030657>
- Malzer, G. L. (1979). Progress with nitrification inhibitors. *Down Earth*, 35, 1–3.
- McCall, P. J., & Swann, R. L. (1978). Nitrapyrin volatility from soil. *Down Earth*, 34, 21–27.

McCarty, G. W. (1999). Modes of action of nitrification inhibitors. *Biology and Fertility Soils*, 29, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s003740050518>

Mosier, A. C., Kroeze, C., Nevison, C., Oenema, O., Seitzinger, S., & Van Cleemput, O. (1998): Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 52, 225–248. <https://doi.org/10.1023/A:1009740530221>

Perni, A., & Martínez-Paz, J.M. (2013). A participatory approach for selecting cost-effective measures in the WFD context: The Mar Menor (SE Spain). *Science of the Total Environment*, 458–460, 303–311. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.029>

Purkhold U., Pommerening-Röser A., Juretschko S., Schmid M.C., Koops H.P. & Wagner M. (2000). Phylogeny of all recognized species of ammonia oxidizers based on comparative 16S rRNA and amoA sequence analysis implications for molecular diversity surveys. *Applied and environmental microbiology*, 66(12), 5368–5382. <http://dx.doi.org/10.1128/AEM.66.12.5368-5382.2000>.

Schlesinger, W. H. (2009). On the fate of anthropogenic nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(1), 203–208. <https://doi.org/10.1073/pnas.0810193105>

Shaviv, A., & Mikkelsen, R. L. (1993). Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation—A review. *Fertilizer research*, 35, 1–12. <https://doi.org/10.1007/BF00750215>

Strauss S.L., Reardon C.L. & Mazzola M. (2014). The response of ammonia-oxidizer activity and community structure to fertilizer amendment of orchard soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, 410–418. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.10.016>

Subbarao, G. V., Ito, O., Sahrawat, K. L., Berry, W. L., Nakahara, K., Ishikawa, T., Watanabe, T., Suenaga, K., Rondon, M., & Rao, I. M. (2006). Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems—Challenges and opportunities. *Critical reviews in plant sciences*, 25(4), 303–335. <https://doi.org/10.1080/07352680600794232>

Taylor, A. E., Zeglin, L. H., Dooley, S., Myrold, D. D., & Bottomley, P. J. (2010). Evidence for different contributions of archaea and bacteria to the ammonia-oxidizing potential of diverse Oregon soils. *Applied and environmental microbiology*, 76(23), 7691–7698. <https://doi.org/10.1128/AEM.01324-10>

Tucker, C. J., Justice, C. O., & Pince, S. D. (1986), Monitoring the grasslands of the Sahel 1984–1985, *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1571–1581. <https://doi.org/10.1080/01431168608948954>

Wright, P. R. (1998). Research into early senescence syndrome in cotton. *Better Crops International*, 12(2), 15.

AGROALNEX

Gemelo digital para el control climático en invernadero: Caso de uso en la producción de *Cannabis sativa*

S. Pardo-Pina¹, J.M. Cámara-Zapata¹, J. Muñoz-Acero¹, S. Alcañiz-Lucas², F.J. Ferrández-Pastor³

¹ Instituto de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Universidad Miguel Hernández, 03312 Orihuela, Alicante, España; spardo@umh.es; jm.camara@umh.es; julia.munoz@umh.es

² Unidad de Experimentación Vegetal, Servicios Técnicos de Investigación, Universidad de Alicante, 03690 Alicante España; exp.vegetal@ua.es

³ Departamento de Informática y Computación, Universidad de Alicante, 03690 Alicante, España; fjferan@dtic.ua.es

Resumen

El artículo propone el desarrollo y la implementación de un gemelo digital para optimizar el control climático en invernaderos dedicados a la producción de *Cannabis sativa*, enmarcado en el proyecto AGROALNEXT/2022/048 (CANNADIG). El gemelo digital se basa en la captura de datos a través de dispositivos IoT (Internet de las Cosas) y la simulación de estrategias de control utilizando el paradigma de Inteligencia Artificial (IA) denominado aprendizaje por refuerzo. En el estudio se desarrolló tanto la infraestructura de comunicación como el algoritmo para simular y evaluar diferentes condiciones, con el objetivo de optimizar el consumo energético en el invernadero y mantener los parámetros establecidos. La implementación y uso de un gemelo digital para predecir el comportamiento en el invernadero permite una gestión más eficiente de las condiciones climáticas en situaciones reales, lo cual es crucial para el crecimiento óptimo del cultivo. La simulación de estrategias de control mediante algoritmos de aprendizaje por refuerzo proporciona un enfoque innovador para minimizar el consumo energético, lo cual puede tener implicaciones significativas en la sostenibilidad y la rentabilidad de la producción de cannabis.

Palabras clave: Internet de las cosas, gemelo digital, aprendizaje por refuerzo, optimización, gestión energética.

Digital twin for climate control in a greenhouse: Use case in the production of *Cannabis sativa*

Abstract

The article proposes the development and implementation of a digital twin to optimize climate control in greenhouses dedicated to the production of *Cannabis sativa*, within the framework of the CANNADIG project. The digital twin is based on data capture through IoT (Internet of Things) devices and the simulation of control strategies using the Artificial Intelligence (AI) paradigm called reinforcement learning. In the study, both the communication infrastructure and the algorithm were developed to simulate and evaluate different conditions, with the aim of optimizing energy consumption in the greenhouse and maintaining the established parameters. The implementation and use of a digital twin to predict behavior in the greenhouse allows for more efficient management of climatic conditions in real situations, which is crucial for optimal crop growth. The simulation of control strategies using reinforcement learning algorithms provides an innovative approach to minimize energy consumption, which can have significant implications for the sustainability and profitability of cannabis production.

Keywords: Internet of Things, digital twin, reinforcement learning, optimization, energy management.

Introducción

Los gemelos digitales están revolucionando la agricultura moderna al proporcionar un marco avanzado para el monitoreo y control de las condiciones ambientales en invernaderos. Esta tecnología permite crear modelos virtuales que replican las condiciones reales de los cultivos, integrando datos en tiempo real a través de sensores distribuidos en el terreno. Esto no solo mejora la precisión en la gestión del riego, sino que también optimiza el uso de recursos como el agua y la energía, reduciendo así la huella ambiental de las operaciones agrícolas (Verdouw et al., 2021).

En el ámbito de la horticultura en invernaderos, los gemelos digitales facilitan la creación de entornos controlados que maximizan la producción de cultivos mientras minimizan el consumo de energía. Estos sistemas permiten a los agricultores ajustar automáticamente las condiciones climáticas internas, como la temperatura, la humedad y la iluminación, basándose en datos meteorológicos y de crecimiento de las plantas (Ariesen-Verschuur et al., 2022). Además, los gemelos digitales ofrecen la capacidad de simular diferentes escenarios de cultivo, lo que permite a los productores anticipar las necesidades de los cultivos y planificar de manera más eficaz la distribución de recursos (Purcell et al., 2023). La implementación de gemelos digitales en invernaderos también está alineada con las tendencias de la agricultura de precisión y la Agricultura 4.0, que buscan integrar tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial y el aprendizaje automático para mejorar la sostenibilidad y la eficiencia de las prácticas agrícolas (Benos et al., 2023). Estos avances no solo promueven una producción más sostenible, sino que también ofrecen soluciones escalables que pueden adaptarse a diferentes contextos y necesidades agrícolas (Tsolakis et al., 2024).

El uso de esta tecnología se justifica en cultivos con requerimientos y valor añadido elevado como es el caso del cannabis. Este cultivo requiere altos niveles de control y su optimización es indispensable para garantizar la rentabilidad de su producción. Por todo ello el diseño y desarrollo de gemelos digitales que anticipen su comportamiento y control es de interés en esta industria.

En conclusión, los gemelos digitales representan una herramienta poderosa para la gestión ambiental en invernaderos, permitiendo optimizar el uso de recursos y mejorar la productividad de manera sostenible. Su aplicación en la agricultura moderna representa una modificación en la forma en que se gestionan los cultivos, ofreciendo beneficios significativos, tanto para los productores como para el medio ambiente (Neethirajan y Kemp, 2021).

Objetivos

El objetivo de este trabajo es el diseño y desarrollo de un gemelo digital para la gestión ambiental y energética en un invernadero con cultivo de cannabis. El diseño se basará en las características de un invernadero de vidrio, con un equipamiento de control climática dado. A partir de los datos obtenidos mediante tecnología IoT en el comportamiento energético-ambiental frente a las condiciones exteriores, se define un modelo sobre el cual analizar y establecer estrategias de control en la temperatura del invernadero. El gemelo digital ofrecerá al usuario los resultados en el consumo energético y evolución de la temperatura en el invernadero para diferentes temperaturas de control (set-point). Del resultado obtenido, el usuario podrá aplicar las políticas de regulación del set-point que más convengan al crecimiento de la planta en sus diferentes fases.

En la Figura 1 se muestra la arquitectura propuesta para el desarrollo del gemelo digital. Comenzando por la interfaz de usuario, el técnico podrá conocer el comportamiento de la instalación simulando diferentes políticas de selección de la variable de control (temperatura de consigna). El gemelo es una copia digital del invernadero utilizado, que responderá de igual modo. Previo a este resultado, el invernadero se monitoriza y analiza desde los datos ofrecidos por los sensores IoT y el modelo de predicción de la temperatura en función de la temperatura exterior, desarrollada con algoritmos de “machine learning”. Es importante extraer el modelo de comportamiento del invernadero para recrear su comportamiento en el soporte informático que le ofrece un gemelo digital. La arquitectura, por tanto integra tecnologías habilitadoras como el Internet de las Cosas, la Inteligencia Artificial y el desarrollo de interfaces avanzadas de usuario.

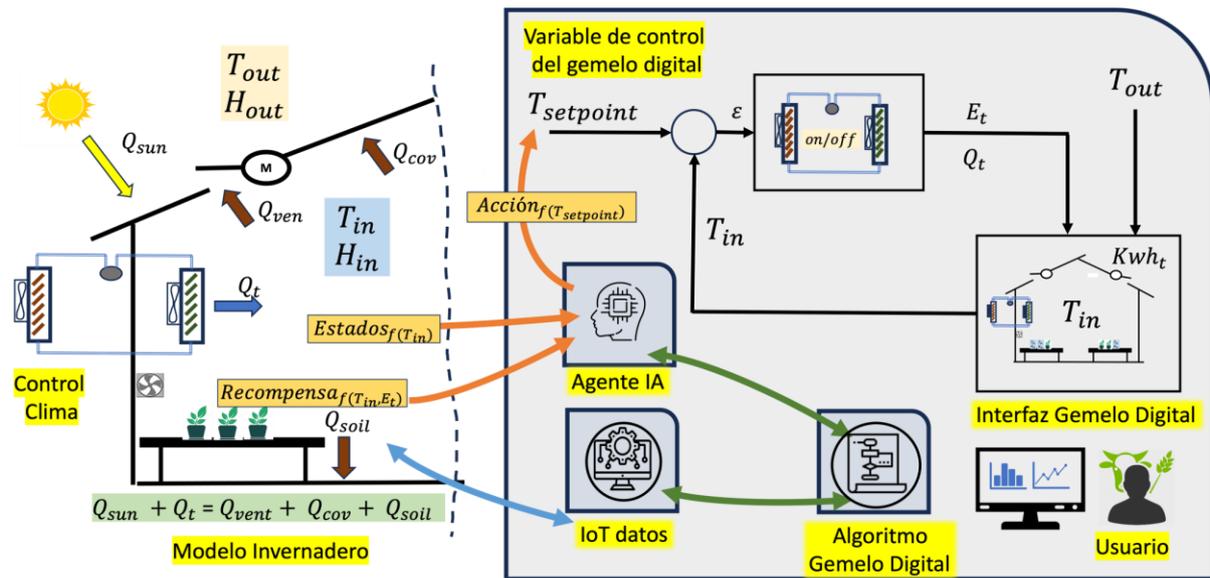


Figura 1. Arquitectura del gemelo digital. Integración IoT-IA para el desarrollo del gemelo digital

Materiales y Métodos

La toma de datos se realizó en un cultivo de *Cannabis sativa*, dentro del estudio realizado en el proyecto CANNADIG, en un invernadero tecnificado (Figura 2) con las siguientes características:

Invernadero de cristal de 50 m² (5 x 10 m).

Sistema automático de control de clima y riego con el siguiente equipamiento:

- Humidificador con nebulización de agua osmotizada.
- Acondicionadores de aire para calentar y enfriar los módulos. Twin, Triple Mitsubishi PUHZ-297 P200YKA Trifásico Clásico Inverter Capacidad nominal de refrigeración 19 kW. Capacidad nominal de calefacción 22 kW.
- Pantalla de sombreado térmico.
- Extractor de aire y ventanas de apertura cenital con malla anti-trip.
- Lámparas de luz artificial para aumentar la asimilación neta.
- Sistema de riego por microaspersión y goteo o inundación.
- Sondas de temperatura y humedad.
- Conexiones eléctricas, de aire comprimido, de agua de red y de agua osmotizada.
- Dispositivo embebido (raspberrypi4) que despliega una intranet (WiFi, Bluetooth Low Energy) para comunicación, monitorización y control.
- Contador de energía eléctrica en circuitos trifásicos y monofásicos (shelly 3 EM). Este contador de consumo se comunica con el sistema embebido a través del protocolo WiFi
- Comunicación a servidores Web para obtener la predicción de temperatura en la zona del invernadero.

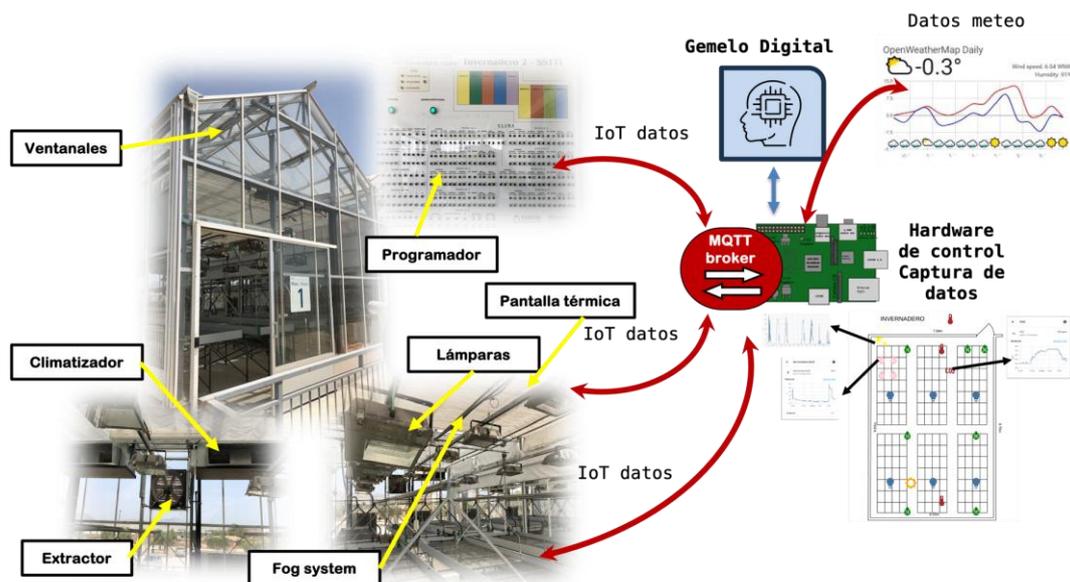


Figura 2. Invernadero utilizado. Hardware de captura de datos IoT

Este trabajo diseña, desarrolla y prueba una plataforma de red de sensores/actuadores de bajo coste, basada en el paradigma de comunicación: Internet de las Cosas (IoT), integrando protocolos de interfaz máquina-máquina y hombre-máquina utilizados en (Ferrández-Pastor et al., 2024). El sistema integró paradigmas IoT, redes de sensores inalámbricos en una intranet de sensorización y computación embebida local para crear un entorno agrícola inteligente. El trabajo se planificó siguiendo una serie de fases que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Fases en el desarrollo del gemelo digital

Fase	Descripción	Tareas
Instalación IoT	Diseño, despliegue red de sensores IoT (figura 2)	Instalación de la red de comunicación. Instalación de sensores. Pruebas, calibración y captura de datos
Captura de Datos	Captura de datos de sensores en base de datos local (figura 3)	Filtrado, etiquetado y comprobación de los datasets
Modelo digital clima invernadero	Diseño de modelo digital comportamiento climático del invernadero analizado. Comparar modelos de machine learning (figura 4)	Modelo de machine learning. Algoritmo del modelo de comportamiento climático del invernadero para incluir en el modelo del gemelo digital.
Gemelo Digital	Diseño y desarrollo algoritmo de simulación del comportamiento climático modificando la Temperatura setpoint (figura 5)	Desarrollo aplicación front-end (interfaz de usuario), back-end (algoritmo) y almacenamiento de datos del gemelo digital frente a actuaciones del usuario

La implementación incluyó protocolos de interfaz máquina a máquina y hombre-máquina para permitir procesos de control y comunicación considerando un escenario de agricultura de precisión, los datos capturados diariamente en la red IoT instalada se muestran en la Figura 3.

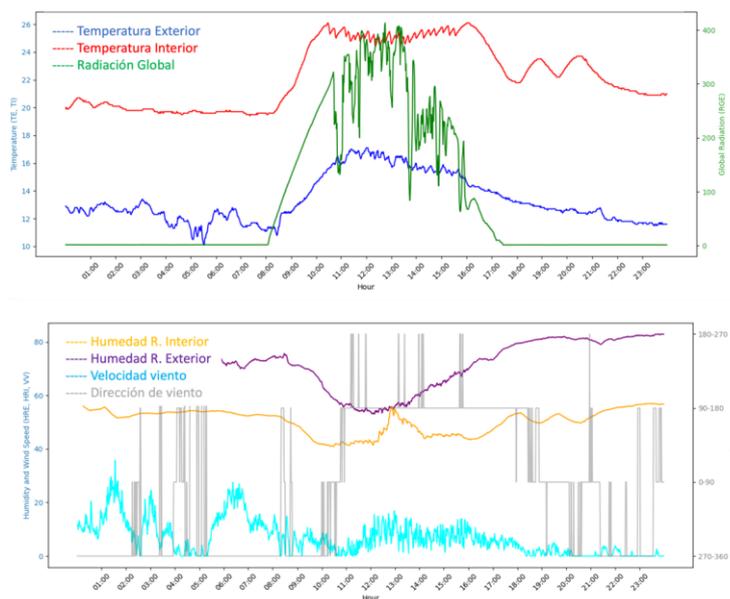


Figura 3. Muestra de datos diarios capturados desde red de sensores IoT

Una vez obtenido el modelo de comportamiento se despliega el algoritmo (back-end) del gemelo digital, basado en un código Python que simulan el comportamiento ambiental cuando se seleccionan diferentes valores de la temperatura de referencia o set-point del usuario (técnico de invernadero o agricultor). En la actualidad, la interfaz de acceso es la plataforma que el algoritmo despliega, quedando como tarea la mejora de las interfaces para ofrecer una mejor experiencia de usuario. Para construir el modelo se ha capturado durante un año, los valores ambientales en el interior y exterior, se ha estimado la capacidad calorífica del invernadero y desplegado un modelo de predicción de la temperatura en el interior.

Para determinar la temperatura en el invernadero, en el algoritmo del gemelo digital, se utiliza la siguiente fórmula numérica que considera la temperatura estimada por el modelo de predicción, el tiempo de muestreo y la energía aportada:

$$T_{\text{interior}} = T_{\text{estimada}} + (E/C) \times \Delta t \quad (1)$$

Donde:

- T_{interior} : Nueva temperatura interior en el algoritmo del gemelo digital.
- T_{estimada} : Temperatura interior estimada por el modelo machine learning desplegado.
- E : Energía aportada (positiva para calor, negativa para frío).
- C : Capacidad térmica del invernadero (calculado con el dataset obtenido desde IoT).
- Δt : Tiempo de muestreo.

El gemelo digital determina la evolución de la temperatura en el interior en función de las estrategias de control del usuario. Además de simular la evolución en el invernadero, determina la energía consumida para cada estrategia. Esto ofrece una nueva utilidad a la herramienta ya que permite calcular la mejor estrategia de control ambiental optimizando el consumo energético.

El algoritmo del gemelo digital se basa en el paradigma de Inteligencia Artificial denominado aprendizaje por refuerzo. Este algoritmo permite calcular la evolución de la temperatura para diferentes estrategias y puede calcular de forma automatizada el mejor valor para el menor consumo. El algoritmo toma resultados del control y calcula la mejor opción mejorando la interacción con el usuario.

Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos en las diferentes fases de diseño, desarrollo, despliegue del gemelo digital para un invernadero con cultivo de *Cannabis sativa* han validado de forma preliminar el sistema. La captura de datos y obtención del dataset necesario mediante protocolos de comunicación IoT se ha realizado sin ningún problema al utilizar tecnologías maduras ya introducidas en la industria. Por otra parte para el desarrollo del modelo climática mediante tecnologías de machine learning se han comparado diferentes alternativas, utilizando el modelo “random forest” que es el que ha mostrado el menor error en la predicción (Figura 4).

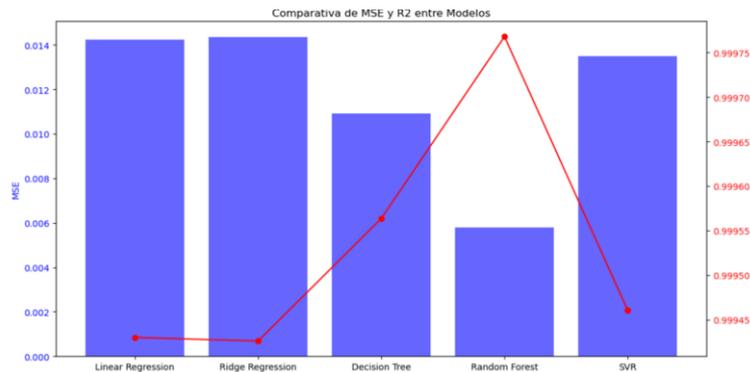


Figura 4. Comparativa entre diferentes modelos de machine learning para la predicción de la Tin

El algoritmo del gemelo digital ofrece al usuario información de interés para que el usuario programe el setpoint adecuado para garantizar las temperaturas exigidas en el crecimiento de la planta de cannabis sativa en invernadero, optimizando el consumo energético. En la Figura 5 se muestra el resultado final obtenido entre varias alternativas y su comparación del consumo eléctrico previstas en relación a una temperatura de referencia inicial.

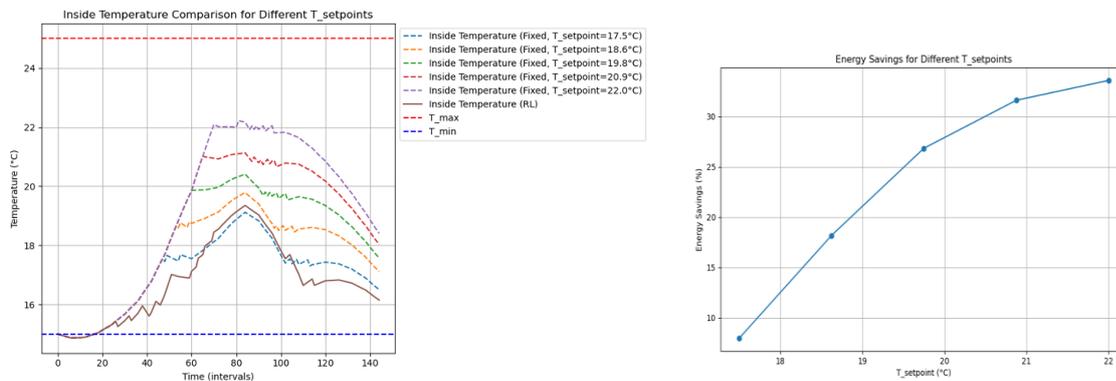


Figura 5. Simulación para determinar la mejor opción de selección de la Tsetpoint de control

Conclusiones

Se ha diseñado, desarrollado y testado en una primera versión de una plataforma de gemelo digital para simular el comportamiento climático en un invernadero con cultivo de cannabis sativa. Los resultados preliminares validan el método y herramientas integradas, así como los resultados obtenidos en el uso de la plataforma. Para próximos trabajos se ampliará el estudio con nuevos datos de validación y ampliación del gemelo digital en la mejora de la interfaz de usuario.

Agradecimientos

Este estudio forma parte del programa AGROALNEXT (AGROALNEXT/2022/048) y ha sido apoyado por MCIN con financiación de la Unión Europea NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y de la Generalitat Valenciana.

Bibliografía

Ariesen-Verschuur, N., Verdouw, C., Tekinerdogan, B., 2022. Digital Twins in greenhouse horticulture: A review. *Comput. Electron. Agric.* 199, 107183. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107183>.

Benos, L., Moysiadis, V., Kateris, D., Tagarakis, A.C., Busato, P., Pearson, S., Bochtis, D., 2023. Human–Robot Interaction in Agriculture: A Systematic Review. *Sensors* 23, 6776. <https://doi.org/10.3390/s230206776>.

Ferrández-Pastor, F.J.; García-Chamizo, J.M.; Nieto-Hidalgo, M.; Mora-Pascual, J.; Mora-Martínez, J. Developing Ubiquitous Sensor Network Platform Using Internet of Things: Application in Precision Agriculture. *Sensors* 2016, 16. <https://doi.org/10.3390/s16071141>

Neethirajan, S., Kemp, B., 2021. Digital Twins in Livestock Farming. *Animals* 11, 1008. <https://doi.org/10.3390/ani11041008>.

Purcell, W., Neubauer, T., Mallinger, K., 2023. Digital Twins in agriculture: challenges and opportunities for environmental sustainability. *Comput. Electron. Agric.* 202, 107456. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107456>.

Tsolakis, N., Bechtsis, D., Vasileiadis, G., Menexes, I., Bochtis, D.D., 2024. Sustainability in digital twins: A review. *Comput. Electron. Agric.* 210, 107642. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.107642>.

Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., Wolfert, S., 2021. Digital twins in smart farming. *Comput. Electron. Agric.* 184, 105942. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105942>.

Estudio de marcadores sanguíneos en conejos machos seleccionados por resiliencia

D. Serrano-Jara¹, M.J. Argente¹ y M.L. García¹

¹ Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Universidad Miguel Hernández de Elche, España, Orihuela: d.serrano@umh.es

Resumen

Los animales responden a estímulos estresantes mediante una serie de cambios hematológicos, los cuales están diseñados para restaurar la homeostasis, ser adaptativos y promover la supervivencia. El objetivo de este trabajo es estudiar los marcadores de sangre relacionados con la respuesta inmunitaria en dos líneas de conejo seleccionadas divergentemente por resiliencia. Se utilizaron un total de 43 machos (24 de la línea seleccionada por homogeneidad del tamaño de camada y 19 de la línea seleccionada por heterogeneidad del tamaño de camada). Los machos fueron pesados y las muestras de sangre se recogieron en tubos EDTA. El hemograma se realizó con el analizador hematológico Element HT5. Los parámetros que se midieron fueron: recuento de glóbulos blancos (WBC), neutrófilos (NEU), linfocitos (LYM), monocitos (MON), eosinófilos (EOS), basófilos (BAS), ratio neutrófilos-linfocitos (L/N), recuento de glóbulos rojo (RBC), hemoglobina (HGB), hematocrito (HCT), volumen corpuscular medio (MCV), hemoglobina corpuscular media (MCH), concentración media de hemoglobina corpuscular (MCHC), amplitud de distribución eritrocitaria (RDW), recuento de plaquetas (PLT) y volumen plaquetario medio (MPV). Los análisis estadísticos se realizaron con metodología bayesiana. La línea heterogénea presentó un mayor recuento de glóbulos blancos ($10,8 \times 10^9/L$) y linfocitos ($6,2 \times 10^9/L$) que la línea homogénea ($9,1 \times 10^9/L$ y $4,8 \times 10^9/L$; $P > 94\%$). Los niveles de hemoglobina fueron inferiores en la línea heterogénea que en la línea homogénea ($12,4$ y $13,3$ g/dL; $P = 92\%$ para HGB y $37,4$ y $38,0$ g/dL para MCHC). Ambas líneas presentaron valores similares en el resto de los parámetros. En conclusión, la selección por resiliencia varía el perfil de los marcadores sanguíneos de macho de conejo, pero es necesario ampliar el número de datos para que los resultados sean concluyentes.

Palabras clave: homeostasis, marcadores sanguíneos, selección, linfocito, hemoglobina

Study of blood markers in male rabbits selected for resilience

Abstract

Animals respond to stressful stimuli through a series of hematological changes, which are designed to restore homeostasis, be adaptive, and promote survival. The aim of this study is to investigate blood markers related to the immune response in two rabbit lines divergently selected for resilience. A total of 43 males were used (24 from the line selected for litter size homogeneity and 19 from the line selected for litter size heterogeneity). The males were weighed, and blood samples were collected in EDTA tubes. Hematological analysis was performed using the Element HT5 hematology analyzer. The parameters measured were: white blood cell count (WBC), neutrophils (NEU), lymphocytes (LYM), monocytes (MON), eosinophils (EOS), basophils (BAS), neutrophil-to-lymphocyte ratio (L/N), red blood cell count (RBC), hemoglobin (HGB), hematocrit (HCT), mean corpuscular volume (MCV), mean corpuscular hemoglobin (MCH), mean corpuscular hemoglobin concentration (MCHC), red cell distribution width (RDW), platelet count (PLT), and mean platelet volume (MPV). Statistical analyses were conducted using Bayesian methodology. The heterogeneous line showed a higher white blood cell count ($10.8 \times 10^9/L$) and lymphocyte count ($6.2 \times 10^9/L$) compared to the homogeneous line ($9.1 \times 10^9/L$ and $4.8 \times 10^9/L$; $P > 94\%$). Hemoglobin levels were lower in the heterogeneous line compared to the homogeneous line (12.4 and 13.3 g/dL; $P = 92\%$ for HGB and 37.4 and 38.0 g/dL for MCHC). Both lines showed similar values for the remaining parameters. In conclusion, selection for resilience alters the blood marker profile in male rabbits, but further data is required to confirm these results.

Keywords: homeostasis, blood markers, selection, lymphocyte, hemoglobin.

Introducción

La valoración de parámetros sanguíneos constituye una de las principales herramientas para la investigación en los animales (Parasuraman et al., 2010). El estrés asociado a la manipulación animal puede romper la homeostasis y provocar alteraciones perceptibles en las series roja y blanca (Kováčik et., 2015; Rhodes, 2017). La resiliencia es definida como la capacidad de un animal de recuperar su estado homeostático tras ser expuesto a un estímulo perturbador (Colditz y Hine., 2016). En las hembras de conejo, la homogeneidad en la variabilidad del tamaño de camada ha demostrado ser capaz de mejorar su robustez y resiliencia (García et al., 2016; Blasco et al., 2017; Argente et al., 2019).

El objetivo del presente trabajo ha sido estudiar los marcadores sanguíneos relacionados con la respuesta inmunitaria en los machos de dos líneas de conejo seleccionadas divergentemente por resiliencia.

Materiales y Métodos

The experimental procedures with animals have been approved by the General Directorate of Agriculture, Livestock and Fisheries of the Generalitat Valenciana with code 2022/VSC/PEA/0226.

Animals

El experimento se llevó a cabo en la granja cunícula de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela de la Universidad Miguel Hernández de Elche. El ambiente fue controlado con un fotoperiodo de 16:8 y agua y comida *ad libitum*.

Se utilizaron un total de 43 machos: 24 de la línea seleccionada por homogeneidad y 19 por heterogeneidad del tamaño de camada.

Toma de muestras

Las muestras fueron recogidas en el mismo día. La sangre se obtuvo de las arterias auricular y central de la oreja. Se llenó un tubo con la sangre de cada conejo (3 mL) que contenía ácido etilendiaminotetracético (EDTA) como anticoagulante.

La sangre recogida se introdujo en el analizador hematológico Element HT5 para la obtención de los parámetros a evaluar: glóbulos blancos (WBC), neutrófilos (NEU), linfocitos (LYM), monocitos (MON), eosinófilos (EOS), basófilos (BAS), glóbulos rojos (RBC), hemoglobina (HGB), hematocrito (HCT), volumen corpuscular medio (MCV), hemoglobina corpuscular media (MCH), concentración media de hemoglobina corpuscular (MCHC), amplitud de distribución eritrocitaria (RDW), plaquetas (PLT) y volumen plaquetario medio (MPV). Posteriormente se obtuvo la relación de neutrófilos y linfocitos (NEU/LYM).

Estadística

Los análisis estadísticos se realizaron con metodología bayesiana. En el modelo estadístico se incluyó el efecto de la línea (2 niveles) y el peso del animal como covariable.

Resultados y Discusión

La línea heterogénea presentó un mayor recuento de WBC ($10,8 \times 10^9$) y LYM ($6,2 \times 10^9/L$) que la línea homogénea ($9,1 \times 10^9/L$ y $4,8 \times 10^9/L$; $P > 94\%$) (Tabla 1). Estos resultados concuerdan con lo descrito por Argente et al. (2019) en las hembras de las mismas líneas antes de ser sometidas a un proceso de vacunación frente a la enfermedad vírica hemorrágica. Tres días después de la vacunación, los resultados se invirtieron y la línea homogénea mostró mayores niveles de LYM. Beloumi et al. (2020) también evaluaron los niveles de WBC y LYM 24h después de haber sometido a los animales a un estímulo estresante. En este último caso, la línea

homogénea presentó mayores valores de WBC. Nuestros resultados, al igual que los estudios mencionados, en ausencia de un estímulo capaz de originar una respuesta inflamatoria, la línea heterogénea mantiene una serie blanca más elevada. Este hecho podría deberse a una mayor tolerancia y/o adaptación a los cambios del medio no provocados.

Los niveles de HGB y MCHC fueron inferiores en la línea heterogénea (12,4 g/dL y P = 92%; 37,4 g/dL y P = 97%) que en la línea homogénea (13,3 g/dL; 38 g/dL) (Tabla 1). Estos resultados podrían deberse a un mayor número de triglicéridos y colesterol en sangre en la línea heterogénea, tal y como reportó Argente et al. (2019). Un desajuste en el metabolismo graso y un consecuente aumento de los niveles de triglicéridos y de colesterol puede inducir la autooxidación de la hemoglobina (Hb) promoviendo la conversión de la HbO₂ y las fracciones libres de Hb en Met-Hb y carboxihemoglobina (Abdelhalim y Moussa, 2010). Sin embargo, en este estudio no se analizaron los niveles lipídicos, por lo que tan solo constituye una hipótesis.

Tabla 1. *Marcadores sanguíneos.*

	WBC	LYM	BAS	L/N	RBC	HGB	MCHC	RDW	PLT
Homogénea	9,08	4,76	0,01	0,83	5,7	13,28	37,97	12,03	329,37
Heterogénea	10,82	6,25	0,02	0,61	5,39	12,35	37,40	12,63	387,34
P	0,94	0,99	0,81	0,82	0,89	0,92	0,97	0,84	0,84

P: probabilidad de que la diferencia entre las líneas sea menor de 0

Conclusiones

La selección por resiliencia varía el perfil de los marcadores sanguíneos en conejos macho, sin embargo, es necesario ampliar el número de datos para obtener resultados más concluyentes.

Agradecimientos

Este estudio forma parte del programa AGROALNEXT/2022/037 y apoyado por MCIN con la financiación NextGenerationEU de la Unión Europea (PRTR-C17.11) y la Generalitat Valenciana.

Bibliografía

- Abdelhalim, M., Moussa, S. 2010. Biochemical changes of hemoglobin and osmotic fragility of red blood cells in high fat diet rabbits. *PJBS*. 132, 73-7. <https://doi.org/10.3923/PJBS.2010.73.77>.
- Argente, M.J., García, M.L., Zbynovská, K., Petruska, P., Capcarová, M., Blasco, A. 2019. Correlated response to selection for litter size environmental variability in rabbits' resilience. *Animal*. 22, 2348-2355. <https://doi.org/10.1017/S1751731119000302>.
- Beloumi, D., Blasco, A., Muelas, R., Santacreu, M.A., García, M.L., Argente, M.J. 2020. Inflammatory correlated response in two lines of rabbit selected divergently for litter size environmental variability. 10, 1540. <https://doi.org/10.3390/ani10091540>.
- Blasco, A., Martínez-Álvaro, M., García, M.L., Ibáñez-Escriche, N., Argente, M.J. 2017. Selection for genetic environmental sensitivity of litter size in rabbits. *Genetics Selection Evolution*. 49, 48-55. <https://doi.org/10.1186/s12711-017-0323-4>.
- Colditz, I.G., Hine, B.C. 2016. Resilience in farm animals: biology, management, breeding and implications for animal welfare. *Animal Reproduction Science*. 122, 174-182. <http://dx.doi.org/10.1071/AN15297>.



García, M.L., Blasco, A., Argente, M.J. 2016. Embryologic changes in rabbit lines selected for litter size variability. *Theriogenology*. 86, 1247-1250. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.04.065>

Kováčik, J. 2015. *Animal Physiology*, first ed. Knut Schmidt-Nielsen, Nitra.

Parasuraman, S., Raveendran, R., Kesavan, R., 2010. Blood sample collection in small laboratory animals. *J. Pharmacol. Pharmacother.* 1, 87-93. <https://doi.org/10.4103/0976-500X.72350>.

Rhodes, M.E., 2017. *Andrenocorticotropic Hormone. Stress: Neuroendocrinology and Neurobiology*, second, ed. Elsevier, Melbourne.

Evaluación agronómica de nuevos biofertilizantes peletizados de base orgánica en un cultivo en condiciones controladas de ray-grass inglés (*Lolium perenne* L.)

S. Sánchez-Méndez¹, L. Orden^{1,2}, L. Valverde-Vozmediano¹, E. Martínez-Sabater¹, J. Andreu-Rodríguez¹, J. Saéz-Tovar¹ y R. Moral¹

¹ Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Universidad Miguel Hernández, Carretera de Beniel Km 3,2, Orihuela, Alicante 03312, España. s.sanchezm@umh.es

² Estación Experimental Agropecuaria INTA Ascasubi (EEA INTA Ascasubi), 8142, Hilario Ascasubi, Buenos Aires, Argentina.

Resumen

Actualmente la Unión Europea está demandando una transición hacia un modelo de agricultura sostenible donde los fertilizantes sintéticos tengan menos protagonismo y se utilicen otro tipo de fuentes renovables para abonar nuestros cultivos. Los fertilizantes orgánicos y orgánico-minerales son la principal alternativa a las fuentes tradicionales de abonado. El objetivo es estudiar el efecto de diversas fuentes de fertilizantes órgano-minerales peletizados sobre el rendimiento de ray grass inglés (*Lolium perenne* L.). Se realizó un ensayo en condiciones controladas en macetas de ray grass de (*Lolium perenne* L.) con distintas estrategias de fertilización orgánico-mineral al momento de la siembra a una dosis ajustada de P (0.11 g P tiesto⁻¹) y N (0.25 g N tiesto⁻¹). Los pellets (Ø= 5 mm) se desarrollaron en CompoLab (EPSO-UMH) en base a compost, enriquecidos con fuentes de P: harina de hueso (P-HHUE), estruvita (P-STR) y fosfato monoamónico (P-MAP) y aditivos ricos en N: harina de sangre (P-HS) y urea (P-UREA). Como tratamientos convencionales se utilizaron fertilizantes de síntesis química: Complex15 (15-15-15) (IN) y fosfato monoamónico (12-61-0) (MAP). En el diseño experimental se incluyó un control sin fertilizar (C) y los tratamientos se aplicaron por triplicado (N= 30). El ciclo de cultivo duró 35 días y se realizaron tres cortes (días 10, 20 y 35), en cada uno de estos cortes se determinó el peso fresco y peso seco del cultivo (g maceta⁻¹), se analizó en tejido vegetal el contenido de nutrientes totales (g kg material vegetal⁻¹) y se calculó la eficiencia de extracción de P y N (%). Las estrategias de fertilización convencional y los pellets órgano-minerales mostraron los mayores rendimientos diferenciándose significativamente (p<0,0001) de los tratamientos orgánicos y del control, como así también índices de extracción de N y P comparables con la estrategia de fertilización inorgánica convencional.

Palabras clave: compost, pellets, órgano-mineral, absorción de nutrientes, rendimiento.

Agronomic evaluation of new organic-based pelletised biofertilisers in a rye-grass (*Lolium perenne* L.) crop under controlled conditions

Abstract

The European Union is currently calling for a transition to a more sustainable agricultural model, where synthetic fertilizers play a smaller role and other types of sources are used to fertilize our crops. Organic and organic-mineral fertilizers are the main alternatives to traditional fertilizer sources. The aim of this study was to carry out a comparative analysis of different sources of organo-mineral pellet fertilizer and their effect on crop yield. A trial was conducted out under controlled conditions in ryegrass (*Lolium perenne* L.) pots with different organo-mineral fertilization strategies at sowing with adjusted doses of P (0.11 g P pot⁻¹) and N (0.25 g N pot⁻¹). Pellets (Ø= 5 mm) were developed in CompoLab (EPSO-UMH) based on compost enriched with P sources: bone meal (P-HHUE), struvite (P-STR) and monoammonium phosphate (PMAP) and N-rich additives: blood meal (P-HS) and urea (P-UREA). Conventional treatments were chemically synthesized fertilizers: Complex 15 (15-15-15) (IN) and monoammonium phosphate (12-61-0) (MAP). The experimental design included an unfertilized control (C) and the treatments were carried out in triplicate (N= 30). The growing cycle lasted 35 days and three cuttings were made (days 10, 20 and 35) at which the fresh and dry weight of the crop was determined (g pot⁻¹), the content of total nutrients in plant tissues was analyzed (g kg plant material⁻¹) and the

extraction efficiency of P and N (%) was calculated. Conventional fertilization strategies and organo-mineral pellets showed the highest yields, significantly different ($p < 0.0001$) from the organic and control treatments, and N and P extraction efficiencies comparable to the conventional inorganic fertilization strategy.

Keywords: compost, pellets, organo-mineral, nutrient uptake, yield.

Introducción

El nitrógeno (N) y el fósforo (P) son nutrientes esenciales para el desarrollo y el crecimiento de las plantas y están involucrados en procesos fisiológicos y metabólicos (Hammond et al., 2011, Bian et al., 2020). Los fertilizantes de N utilizados en la agricultura convencional conllevan procesos industriales que suponen alta demanda de energía. Para ello la Unión Europea (UE) depende de la importación de gas de otros países, además también importa un 90% de las reservas de P (Eurostat, 2020).

El uso de fertilizantes de base orgánica hace que se reduzca esta dependencia de la Unión Europea. Además, la UE está promoviendo el uso de fuentes orgánicas en agricultura y la reducción del exceso de nutrientes (EC, 2020). El uso de compost en la agricultura ha sido ampliamente estudiado, así como sus beneficios (Sanz-Cobeña et al., 2017; Vico et al., 2020; Sayara et al., 2020). Sin embargo, el compost no podría sustituir a los fertilizantes sintéticos para alimentar a una población creciente.

La mezcla de compost con fuentes ricas en N y P podría ser una alternativa a la fertilización convencional, también la mezcla de nutrientes N y P minerales en una matriz orgánica disminuiría la pérdida de nutrientes (Tejada et al., 2005). A parte de los fertilizantes de N y P convencionales, existen otras fuentes alternativas a partir de la recuperación de nutrientes de flujos residuales como la obtención de P mediante la extracción de estruvita en las plantas de depuración (Doyle and Parsons, 2002), harina de hueso o harina de sangre (subproductos de la industria cárnica) para obtener alternativas orgánicas al uso de fertilizantes convencionales (Yao et al., 2008).

Sin embargo, el uso y la dinámica de estos nutrientes en el sistema suelo-planta todavía es necesario estudiarla y medir la absorción de nutrientes que permite calcular la eficiencia (NUE y PUE) de estos fertilizantes para la agricultura (Antille et al., 2017). Por tanto, el objetivo de este trabajo es el análisis comparativo de diversas fuentes de fertilizantes pelletizados órgano-mineral y su efecto sobre el rendimiento vegetal.

Materiales y Métodos

Diseño experimental

Se estableció un ensayo en macetas con ray grass perenne (*Lolium perenne* L.) en un invernadero de ambiente controlado con una temperatura media de 21 °C, 60% de humedad relativa y un fotoperiodo de 12 h con luz artificial. Las macetas se dispusieron al azar y se cambiaron con regularidad. Se utilizó un suelo sintético (OECD, 1984) compuesto de una mezcla de suelo franco-arcilloso (tamizado <5 mm) recogido en la finca experimental de la EPSO-UMH Orihuela (38.069185, -0.985041) y dos tipos de arena (50 % de suelo, 25 % de arena fina y 25 % de arena gruesa). Se corrigió el pH del sustrato con el agregado de FeSO_4 a pH 6,5. Las macetas plásticas utilizadas (\varnothing 11 cm) se llenaron con 1500 g del sustrato preparado. Se aplicaron diez tratamientos fertilizantes (Tabla 1.) con tres repeticiones ($N=30$) a una dosis de 120 kg P ha^{-1} y de N 200 kg ha^{-1} , entre ellos: control sin fertilizar (C), ComplexIN (15-15-15) (IN), fosfato monoamónico (11-61-0) (MAP), estruvita (STR), harina de hueso (HHUE), pellet compost-MAP (P-MAP), pellet compost-estruvita (P-STR), pellet compost-harina de hueso (P-HHUE), pellet compost harina de sangre (P-BIM), pellet compost-urea (P-UREA). Se aplicó nitrato de potasio (13-0-46) para normalizar la dosis de N en los tratamientos (1537 kg ha^{-1}).

Tabla 1: *Tratamientos y dosis de los fertilizantes utilizados en el ensayo de ray grass*

Tratamientos	Dosis de aplicación
	(kg ha ⁻¹)
C	-
IN	1337
MAP	453
STR	1150
HHUE	14810
P-BIM	2126
P-UREA	779
P-MAP	1168
P-STR	2000
P-HHUE	1337

Los pellets se fabricaron en Compolab EPSO-UMH (España) por extrusión de las mezclas con una máquina peletizadora de pequeña escala (4 HP), alcanzando un tamaño final de 5 mm de longitud y 5 mm de diámetro. Los pellets se prepararon en base a compost (alperujo:gallinaza:poda de olivo; 60:20:20) y los ingredientes mencionados anteriormente, en una proporción 50:50 (p/p).

Una vez aplicados los tratamientos y distribuidos por la superficie del suelo de las macetas, se sembraron 2 g de semillas de ray grass y se regó para que el suelo alcanzara el 60% de la capacidad de campo, regándose de forma manual con agua destilada durante todo el ciclo de cultivo.

Análisis de planta

La duración total del experimento fue de 35 días. Se realizaron tres cortes manuales en cada maceta, cuando la parte aérea alcanzó 10-12 cm de altura (días 10, 20 y 35). En corte se pesó la biomasa aérea fresca (g maceta⁻¹), se secó a 60 °C durante 48 h y se pesó la biomasa seca (g maceta⁻¹) (Wang et al., 2020). De las muestras secas se analizaron carbono (C) y nitrógeno (N) del tejido vegetal mediante un microanalizador elemental automático (EuroVector Elemental Analyzer). El P total (Pt) se midió en un espectrofotómetro UV-V (Kitson y Mellon, 1944). El K y el Na se determinaron en un fotómetro de llama (Domingo y Klyne, 1949), los macroelementos Ca, S, Mg y los micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Zn) de los tejidos se determinaron mediante digestión con ácido nítrico (0,020 g en 10 mL) en un digestor microondas (Mars 6) y posteriormente se analizaron mediante espectroscopia de masas de plasma acoplado inducido (ICP-MS). También se calculó la eficiencia de uso de nutrientes de acuerdo con López-Bellido et al. (2005), como la relación entre la tasa de aplicación de nutrientes de los fertilizantes y la absorción de nutrientes. Se calcularon la eficiencia en el uso de nitrógeno (NUE) y la eficiencia en el uso de fósforo (PUE).

Resultados y Discusión

La eficiencia en el uso del P ha sido significativamente mayor en el tratamiento convencional con MAP seguidamente de la STR y los tratamientos de fertilización convencional INy P-MAP han obtenido PUE similares (Tabla 2). Con respecto a la eficiencia en el uso del N ha sido mayor en el IN seguidamente de P-UREA. Probablemente esta baja eficiencia en general del P haya sido debido a la corta duración del ciclo de cultivo 35 días, ya que el componente orgánico disminuye la disponibilidad del P al formar complejos orgánicos con el compost (Castán et al., 2016; Vico et al., 2020). El NUE ha sido mayor en la estrategia de fertilización inorgánica, esto es debido a la mayor disponibilidad de N en este fertilizante, ya que los fertilizantes órgano-minerales tienen una liberación más lenta y esto influye en la respuesta de la planta (Deeks et al., 2013).

Tabla 2: Eficiencia de extracción de nutrientes del cultivo de rye-grass.

Tratamiento	Extracción de P (g P maceta ⁻¹)	PUE (%)	Extracción de N (g N maceta ⁻¹)	NUE (%)
C	0.004 a		0.07 a	
IN	0.01 e	3.96 b	0.17 d	57.64 c
MAP	0.01 d	5.49 e	nd	nd
STR	0.01 bc	4.18 cd	nd	nd
HHUE	0.004 a	0.42 a	nd	nd
P- BIM	nd	nd	0.12 b	26.35 a
P- UREA	nd	nd	0.13 c	36.06 b
P-MAP	0.01 b	3.81 b	nd	nd
P-STR	0.01 c	4.73 d	nd	nd
P-HHUE	0.004 a	0.00 a	nd	nd
<i>F-ANOVA</i>	<i>111 ***</i>	<i>13.7 ***</i>	<i>113 ***</i>	<i>38.6 ***</i>

PUE:eficiencia utilización del P; NUE: eficiencia de utilización del N. ;nd: no determinado ***: diferencias significativas entre tratamientos at $p < 0.0001$. Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

El análisis estadístico ha mostrado diferencias significativas ($p < 0.0001$) entre tratamientos para el rendimiento (Fig. 1). Como podemos observar en la gráfica (Fig. 1.) la sumatoria de g maceta⁻¹ de los tres cortes de tejido vegetal el mayor rendimiento en biomasa fresca lo han obtenido los tiestos fertilizados con MAP y STR, seguidos de sus correspondientes pellets P-MAP y P-STR que han obtenido rendimientos similares a la estrategia de fertilización convencional IN. Esta tendencia se ha mantenido también en la biomasa obtenida en los distintos cortes, aumentando la cantidad de biomasa a medida que se alargaba el ciclo de cultivo.

Estos resultados concuerdan con los valores de PUE. Además, a estos tiestos se les aplicó nitrato de potasio para normalizar la dosis de N, por lo tanto esta combinación de pellets ricos en P junto con la aplicación de N inorgánico constituyen una buena alternativa a la fertilización de síntesis química puramente convencional, ya que han obtenido un rendimiento superior al tratamiento IN. El bajo rendimiento que han obtenido los fertilizantes de N (P-UREA y P-BIM) puede deberse a que en el ciclo de 35 días no ha permitido que la totalidad del N esté disponible de forma mineral para que la planta lo aproveche, ya que estos fertilizantes tienen una liberación lenta de nutrientes (Uddin et al., 2023).

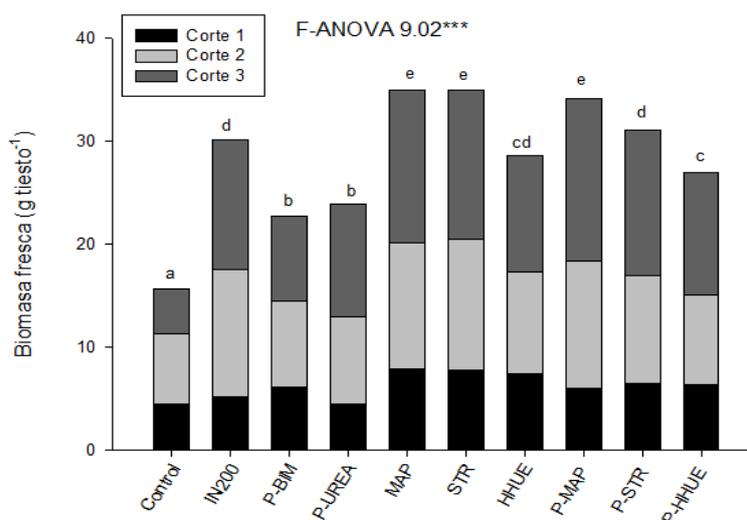


Figura 1. Biomasa total obtenida tras el ciclo de 35 días según los tratamientos

Conclusiones

Las estrategias de fertilización MAP y STR pelletizados y sin pelletizar obtienen rendimientos comparables a la estrategia de fertilización inorgánica IN. Por lo tanto esto nos sugiere que los pellets en base a compost con MAP y STR pueden ser una alternativa a la nutrición mineral que posibilita el aumento de la eficiencia en el uso de fertilizantes inorgánicos. Además, se incorpora materia orgánica al suelo proveniente del tratamiento y valorización de residuos sólidos orgánicos cerrando el ciclo en el marco de la economía circular.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto AGROALNEXT/2022/016 del MCIN con fondos de NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) y la Generalitat Valenciana.

Bibliografía

Antille, D.L., Godwin, R.J., Sakrabani, R., Seneweera, S., Tyrrel, S.F., Johnston, A.E. 2017. Field-scale evaluation of biosolids-derived organo-mineral fertilizers applied to winter wheat in England. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.09.0495>

Bian, Z., Wang, Y., Zhang, X., Li, T., Grundy, S., Yang, Q., Cheng, R. 2020. A Review of Environment Effects on Nitrate Accumulation in Leafy Vegetables Grown in Controlled Environments. *Foods*. 2020; 9(6):732. <https://doi.org/10.3390/foods9060732>

Castán, E., Satti, P., González-Polo, M., Iglesias, M.C., Mazzarino, M.J. 2016. Managing the value of compost as organic amendments and fertilizers *Agric. Ecosyst. Environ.*, 224 2016, pp. 29-38. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.03.016>

Eurostat (2022) European Commission, EU Food Loss and Waste Prevention Hub. https://ec.europa.eu/food/safety/food_waste/eu-food-loss-waste-prevention-hub/about

Domingo, W. R.; Klyne, W. 1949. "A photoelectric flame photometer". *The Biochemical Journal*. 45 (4): 400–408.

Deeks, L.K., Chaney, K., Murray, C., Sakrabani, R., Gedara, S., Le, M.S., Tyrrel, S., Pawlett, M., Read, R., Smith, G.H. 2013. A new sludge-derived organo-Mineral fertilizer gives similar crop yields as conventional fertilizers, *Agron. Sustain. Dev.* 33:539–549 [DOI 10.1007/s13593-013-0135-z](https://doi.org/10.1007/s13593-013-0135-z)

Doyle, D.J., Parsons, S.A. 2002 Struvite formation, control and recovery, 2002, *Water Research* 36 (2002) 3925–3940 DOI: [10.1016/s0043-1354\(02\)00126-4](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(02)00126-4)

Hammond, D. 2011. *Agronomy: Canola*, AOCS Press, p93-117, ISBN 9780981893655

Kabata-Pendias, A. 2010 *Trace Elements in Soils and Plants*, 4th ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, p 548

Kitson, R.E. and Mellon, M. G. 1944. Colorimetric Determination of Phosphorus as Molybdo-Vanadophosphoric Acid. *Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition*, 16, 379. <https://doi.org/10.1021/i560130a017>

López-Bellido, L., López-Bellido, J., Redondo, R., 2005. Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crop Res.* 94, 86–97 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.11.004>

Olsen, S., Cole, C., Watanabe, F., Dean, L. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. In USDA Circular Nr 939. US Gov. Print. Office: Washington, DC, USA.

Sanz-Cobena, A., Lassaletta, L., Aguilera, E., Prado, A. del, Garnier, J., Billen, G., Iglesias, A., Sánchez, B., Guardia, G., Abalos, D., Plaza-Bonilla, D., Puigdueta-Bartolomé, I., Moral, R., Galán, E., Arriaga, H., Merino, P., Infante-Amate, J., Meijide, A., Pardo, G., Smith, P. 2017. Strategies for greenhouse gas emissions mitigation in Mediterranean agriculture: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 238, 5–24. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.038>.

Sayara, T., Basheer-Salimia, R., Hawamde, F., & Sánchez, A. 2020. Recycling of Organic Wastes through Composting: Process Performance and Compost Application in Agriculture. *Agronomy*, 10(11), 1838. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111838>

Tejada, M., Benitez, C. and Gonzalez, J.L. 2005. Effects of Application of Two Organomineral Fertilizers on Nutrient Leaching Losses and Wheat Crop. *Agron. J.*, 97: 960-967. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0092>

Uddin, M.K., Yeasmin, S., Mohiuddin, K.M., Chowdhury, M.A.H., Saha, B.K. (2023). Peat-Based Organo-Mineral Fertilizer Improves Nitrogen Use Efficiency, Soil Quality, and Yield of Baby Corn (*Zea mays* L.). *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15119086> Vico, A., Sáez, J.A., Pérez-Murcia, M.D., Martínez-Tomé, J., Andreu-Rodríguez, J., Agulló, E., Bustamante, M.A., Sanz-Cobena, A., Moral, R. 2020 Production of spinach in intensive Mediterranean horticultural systems can be sustained by organic-based fertilizers without yield penalties and with low environmental impacts. *Agric. Syst.* 178, 102765. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102765>

Wang, J. , Dimech, A.M., Spangenberg, G., Smith, K., Badenhorst, P. 2020. Rapid Screening of Nitrogen Use Efficiency in Perennial Ryegrass (*Lolium perenne* L.) Using Automated Image-Based Phenotyping. *Front. Plant Sci.* <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.565361>

Yao, Y., Su, P., Shen, H., Dong, Y., Li, Y., Ma, C., Xu, L., Zhang, L. (2008). Preparation of animal resource organic fertilizer by preparing animal resource product including blood meal, meat meal, bone meal and eggshell meal, and adding readily available fertilizer needed by crop cultivation.

Postcosecha y Procesado de Productos Vegetales

Uso de la espectroscopía NIR para determinar el estado de madurez interno de la naranja sanguina

M.V. Pérez, S. Castillo-Gironés², D. Valero¹, S. Castillo¹, M. Serrano³

¹Departamento de Tecnología Agroalimentaria (CIAGRO), Escuela Politécnica Superior de Orihuela Universidad Miguel Hernández de Elche, Ctra. de Beniel km 3.2, 03312, Orihuela (Alicante), España.

e-mail: maría.perez27@goumh.umh.es

²Centro de Agroingeniería, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), Ctra. Moncada-Náquera km 4.5, 46113, Moncada (Valencia), España.

³Departamento de Biología Aplicada (CIAGRO), Escuela Politécnica Superior de Orihuela Universidad Miguel Hernández de Elche, Ctra. de Beniel km 3.2, 03312, Orihuela (Alicante), España.

Resumen

La naranja sanguina es un fruto muy apreciado por los consumidores en los últimos años, debido a su agradable sabor y a su atractivo color rojo, tanto externo como interno. Sin embargo, en trabajos previos se ha comprobado que la coloración externa no se corresponde con su color interno, ya que frutos con una coloración exterior poco rojiza pueden tener una coloración roja interna bastante intensa, así como un elevado contenido en azúcares, lo que indicaría un apropiado estado de maduración y una elevada calidad y viceversa. Por ello, el objetivo de este trabajo es utilizar la tecnología NIR para determinar el contenido de sólidos solubles de la pulpa de los frutos y comprobar si es una tecnología eficaz para determinar el grado de maduración y de calidad interna de los frutos. Una vez realizadas las medidas NIR, se analizarán con técnicas de laboratorio el contenido de sólidos solubles, de acidez y de antocianinas, así como la coloración interna por técnicas de espectroscopía para así correlacionar estos parámetros de calidad con los datos NIR.

Palabras clave: sólidos solubles, acidez, grado de maduración, antocianinas, calidad.

Using NIR spectroscopy to determine the internal ripeness of blood Orange

Abstract

The blood orange is a fruit that has been extremely popular within consumers in recent years, due to its pleasant taste and its attractive red color, both externally and internally. However, in previous studies it has been found that the external coloration does not correspond to its internal color, since fruit with a little reddish exterior coloration can have a fairly intense internal red coloration, as well as a high sugar content, which would indicate an appropriate state of ripeness and a high quality and vice versa. Therefore, the objective of this work is to use NIR technology to determine the soluble solids content of fruit pulp and to check if it is an effective technology to determine the degree of ripeness and internal quality of the fruit. Once the NIR measurements were made, the content of soluble solids, acidity and anthocyanins, as well as the internal staining by spectroscopy techniques, were analysed with laboratory techniques to correlate these quality parameters with the NIR data.

Keywords: soluble solids, acidity, degree of ripeness, anthocyanins, quality.

Introducción

La naranja sanguina (*Citrus sinensis* L. Osbeck) es una fruta única entre los grupos de naranjas dulces con un color rojo en la cáscara y jugo rojo intenso. Los consumidores perciben este color rojo de la corteza como un atributo de calidad importante de las naranjas sanguinas (Habibi et al., 2022). Por lo tanto, el desarrollo del color rojo que está relacionado con la presencia de antocianinas es de suma importancia en el comercio de la fruta de naranja sanguina. Aunque estos compuestos se acumulan principalmente en la pulpa de la fruta, en algunos cultivares se puede observar una cáscara sombreada de color púrpura o rojo (Rodrigo, et al., 2013). Esta acumulación se debe en ocasiones a la síntesis de antocianinas cuando el fruto se expone a condiciones ambientales adversas, como la radiación, las bajas temperaturas y el estrés hídrico (Muccilli et al., 2009). Además de su atractivo color, la naranja sanguina es uno de los cultivos cítricos más importantes debido a su alto valor nutricional, compuestos bioactivos y alta actividad antioxidante, especialmente antocianinas, el ácido ascórbico, los flavonoides y el ácido hidroxicinámico (Molinu et al., 2016).

Las concentraciones de antocianinas dependen en gran medida de las prácticas culturales, la etapa de maduración, las condiciones genéticas, estacionales y climáticas, el momento de la cosecha y los factores fisiológicos (Lo Piero, et al., 2005). Estos frutos cultivados bajo temperaturas extremadamente cálidas tienen menor color externo e interno y acumulan menos antocianinas en comparación con los cultivados en condiciones climáticas moderadas (Borochoy-Neori et al., 2011). Por otro lado, las bajas temperaturas por debajo de 4°C en el momento adecuado del desarrollo del fruto potencian la acumulación de antocianinas en las naranjas sanguinas (Caruso, et al. 2016) mientras que las altas temperaturas la reducen.

Las poliaminas (PAs) son aminas alifáticas de bajo peso molecular que están presentes en casi todos los organismos vivos (Valero et al., 2002). Las principales formas de PAs que se encuentran en las plantas son la putrescina (Put), la espermidina (Spd) y la espermina (Spm). La aplicación de PAs puede prevenir la senescencia, reducir la tasa de respiración, retrasar la producción de etileno, retardar los cambios de color, aumentar la firmeza de la fruta, inducir resistencia mecánica y reducir el daño por frío de los cultivos hortícolas (Valero et al., 2002).

Los brasinoesteroides (BR) son un nuevo grupo de esteroides polihidroxilados que han sido reconocidos como una clase de fitohormonas (Mostafa y Kotb, 2018), que son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Symons et al., 2006; Eid et al., 2016) y que estimulan la actividad antioxidante (Damghan, 2009), que permite la mitigación de las especies reactivas de oxígeno (ROS) bajo condiciones de estrés. Asimismo, los BR se han visto como una alternativa encaminada a mejorar los niveles de tolerancia de los cultivos al estrés abiótico, generado por el déficit hídrico del suelo, salinidad, altas temperaturas y metales pesados (Krishna et al., 2017; Nolan et al., 2017).

Hoy en día, la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) se ha convertido en el método de control de calidad preferido en el sector alimentario por sus ventajas analíticas frente a otras técnicas (Woodcock et al., 2008; Manley, 2014; Baeten et al., 2015), usándose para evaluar, de manera no destructiva las cualidades de las frutas y hortalizas (Walsh et al., 2004; Zheng y Tian, 2006). Un producto con una composición química dada, expuesta a la radiación NIR tendrá un espectro característico que es esencialmente el resultado de la absorción por diversos constituyentes químicos, aunque las propiedades físicas también pueden tener un impacto en los valores de absorbancia NIR. Para su aplicación, es necesario realizar una calibración mediante la determinación de la relación entre la composición química real de las muestras de fruta y sus espectros para construir modelos que predigan, de forma no destructiva, las variables dependientes deseadas de las muestras. Específicamente, se utiliza la quimiometría, que es la combinación de la aplicación de métodos matemáticos y estadísticos para descomponer datos espectrales complejos en estructuras aplicables que pueden mejorar la comprensión de los datos de las muestras (Alamar et al., 2016).

El objetivo del presente estudio fue determinar el estado de calidad interna de los frutos de naranja sanguina mediante el empleo de la tecnología NIR, con relación a los métodos tradicionales. Esta

tecnología se realizó sobre frutos de naranjas sanguinas previamente tratadas con elicitores, como brasinoesteroides, espermidina, putrescina y también en frutos control. Se midieron las propiedades físico-químicas de cada uno de los tratamientos, tales como acidez, pH, sólidos solubles, color y antocianinas totales, y se estableció mediante espectroscopia NIR de los frutos, la calidad interna de estos de una manera no destructiva.

Materiales y Métodos

Para este trabajo se analizaron naranjas sanguinas (*Citrus sinensis* L. Osbeck) de la empresa las moreras situada en Algorfa. Estas naranjas habían sido tratadas durante el periodo de su desarrollo con compuestos elicitores según el proyecto Prometeo en la campaña 2023-24, estos tratamientos se aplicaron cuatro veces durante la maduración del fruto en el árbol hasta su recolección, estos compuestos fueron Brasinosteroides 0,01 μ M, espermidina 0,01 mM y Putrescina 0,1 mM.

Se recolectaron 120 frutos por cada tratamiento y control, y una vez en el laboratorio se seleccionaron 100 frutos en buenas condiciones por tratamiento, además estos frutos se ordenaron por su índice de color para cada uno de los tratamientos de menor a mayor coloración externa, enumerándose del 1 al cien (1 la menos y 100 la más coloreada, formándose dos subgrupos 1-50 menos coloreadas y del 51 al 100 las más coloreadas), esta selección por índice de color se puede ver en la Figura 1.

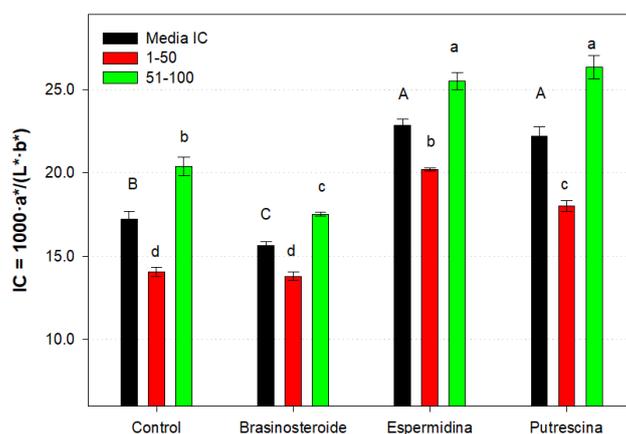


Figura 1. Índice de color medio de naranjas sanguinas de cada uno de los tratamientos y índice de color para cada subgrupo (1-50) y (51-100) de cada tratamiento.

Adquisición y preprocesamiento de espectros NIR

Una vez clasificados los 100 frutos de cada tratamiento (400 en total), se adquirieron los espectros en modo de reflectancia, utilizando un espectrómetro AvaSpec-NIR512-1.7-HSC-EVO – Spectrometers Este equipo es sensible al rango NIR de 900 nm a 1700 nm, con un intervalo medio de muestreo espectral de 3,1514 nm. Las mediciones se realizaron en cuatro puntos equidistantes de la zona ecuatorial del fruto, La reflectancia (R)(1) de las muestras se corrigió utilizando una referencia blanca (W) (WS-2-AVA-ACCESSORIES White reference.) y una negra(D) (evitando la entrada de luz).

$$(1) R = (S - D) / (W - D)$$

Posteriormente, se extrajo el espectro medio de cada fruta y se aplicó Standard Normal Variate (SNV) a los espectros para corregir la dispersión de la luz conservando la información más valiosa (Rinnan et al., 2009). A continuación, se utilizó el método de machine learning Partial Least Squares Regression (PLS-R) para predecir el contenido en sólidos solubles de la muestra. Las muestras se dividieron aleatoriamente en un conjunto de entrenamiento (70 %), y un conjunto de validación (30 %).

Para el análisis de los datos y creación de los modelos, con el fin de crear los modelos predictivos, se empleó la versión 3.9 de Python con las bibliotecas Scikitlearn, scikitimage, Pandas, matplotlib y Numpy. Se utilizó el método RandomizedsearchCV de Scikitlearn para buscar el número idóneo de

variables latentes para entrenar el modelo de PLS-R con la mayor precisión y el menor error cuadrático medio (RMSE). En este caso, se obtuvo el RMSE más bajo de los parámetros de entrenamiento utilizando 20 variables latentes.

Determinación de atributos de calidad de los frutos

Color de los frutos, externo e interno

A los frutos seleccionados se le realizaron fotografías a la parte externa y posteriormente a la parte interna del fruto. A partir de estas imágenes se obtuvieron los parámetros de color de los frutos mediante análisis de imagen con el programa **imageJ** obteniendo los valores RGB de la piel y de la pulpa, R_{ext} y R_{in} , respectivamente. (valores de R bajos indican una coloración oscura y altos un color claro de la muestra). Del sistema RGB se transforman los datos a los valores de $L^*a^*b^*$ y a partir de ellos se calculó el índice de color de los frutos $IC = 1000 \cdot a^*/(L^* \cdot b^*)$, ordenándose los frutos por IC de menor a mayor en cada tratamiento.

Características químicas del zumo

Después de la adquisición espectral, se midieron los sólidos solubles totales (SST), la acidez total (AT) y pH en el jugo de cada muestra de naranja sanguina. Los TSS se midieron con un refractómetro digital (Hanna Instruments, Rhode Island, EE. UU.) expresados %, la AT mediante titulación de 1 ml de jugo con NaOH 0,1 mM hasta pH 8,1 (g de equivalentes de ácido cítrico por 100 ml^{-1} de jugo) y el pH utilizando un valorador automático Metrohm (Mod. 760 Sample Changer).

Además, se midió la cantidad de antocianinas totales ($\text{mg } 100\text{g}^{-1}$) contenidas en el zumo, en una muestra de zumo de cada una de las naranjas sanguinas de forma individual, mediante un espectrofotómetro se midió en una longitud de onda de 540 nm cuando los niveles se pasaban de 1 se le añadió una parte proporcional disolución de agua destilada con un porcentaje de ácido cítrico de 1,3 %.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó con el programa SPSS, versión 20 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) SPSS Statistics versión 20) para Windows. Los datos fueron expresados como la media \pm ES. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar diferencias significativas en los parámetros evaluados entre los tratamientos y subgrupos. Las comparaciones de medias se realizaron utilizando el test de rango múltiple (HSD de Tukey) para examinar si las diferencias eran significativas a $p < 0,05$ para las diferencias observadas entre tratamientos y bloques.

Resultados y Discusión

Analizadas las naranjas sanguinas se puede ver que la coloración externa de los frutos estudiados, nos muestran una coloración que no es uniforme, como cabe esperar en este tipo de frutos y tal como se ve en la Figura 1, donde se pueden encontrar diferencias de IC de las distintas muestras, los tratamientos afectan a la coloración de estos frutos siendo las tratadas con espermidina y putrescina las que alcanzaron mayores valores ($IC \approx 22.7$) frente a los controles con $IC \approx 17.2$. Además, se puede apreciar que de los 100 frutos ordenados por color, existen diferencias significativas entre las primeras (1-50) y las restantes (51-100), observándose por tanto, una gran variabilidad en el color de las naranjas sanguinas en el momento de la recolección, esta variación de color es debidas a las zonas del fruto expuestas o no a la radiación UVB (Morales, et al., 2021) y comprobando que esta coloración no se distribuye de una forma uniforme en la superficie (Tarancón, et al., 2022).

El contenido de sólidos solubles y la acidez titulable son dos factores principales que determinan el sabor y la percepción de los consumidores. Generalmente durante la maduración, el contenido de SST en la fruta aumenta debido a la acumulación de azúcares, a través de la hidrólisis del almidón presente en la fruta (Hossain et al., 2016) mientras que ocurre una disminución de la acidez (Morales et al., 2021). En la Figura 2 podemos ver la variación del contenido de SST en los distintos tratamientos y estados de color. Siendo estos valores medios similares variando ente $9,77 \pm 0,053$ en la Esp hasta

9,46, \pm 0,077 en la Put. Teniendo en cuenta la coloración existe una ligera diferencia entre los dos grupos de frutos, observándose que, para mayor coloración exterior de la corteza en cada uno de los tratamientos, mayor son los SST, efecto visto por Tarancón et al., (2022). Sin embargo, en cuanto la acidez vemos que no existen estas diferencias entre subgrupos de coloración y si por tratamiento siendo los frutos de los árboles tratados con Put los que mostraron menor acidez (Figura 3). La relación SST y AT nos da el IM de para cada tratamiento y condiciones de coloración. En la Figura 4 se observa que los frutos menos coloreados, para cada tratamiento son los que muestran un menor índice de madurez, y siendo los tratamientos con Bras el que presenta menos valor, coincidiendo con el menor índice de color.

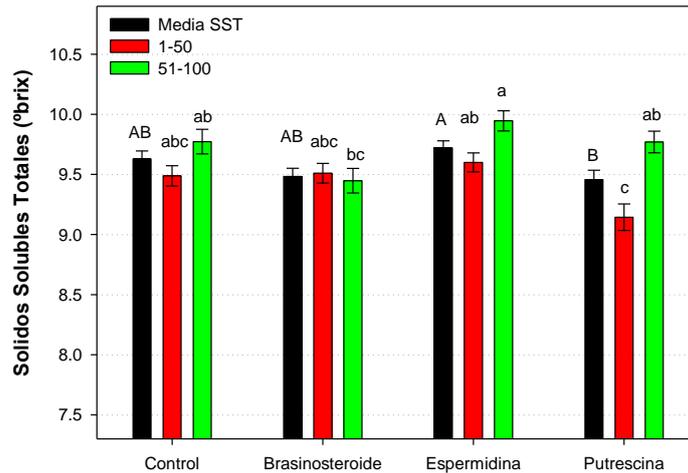


Figura 2. Solidos solubles totales de naranjas sanguinas de cada uno de los tratamientos y para cada subgrupo (1-50) y (51-100) de cada tratamiento. Los datos son la media \pm ES. Las letras mayúsculas indican diferencias entre tratamiento y letras minúsculas diferencias entre subgrupos, ($p < 0,05$).

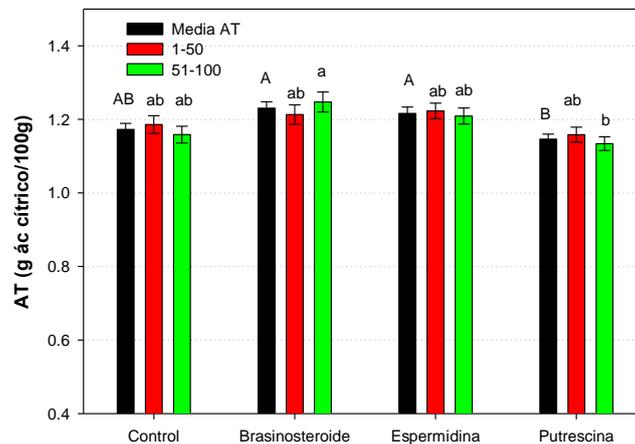


Figura 3. Acidez total (AT) de naranjas sanguinas de cada uno de los tratamientos y AT para cada subgrupos (1-50) y (51-100) de cada tratamiento. Los datos son la media \pm ES. Las letras mayúsculas indican diferencias entre tratamiento y letras minúsculas diferencias entre subgrupos, ($p < 0,05$).

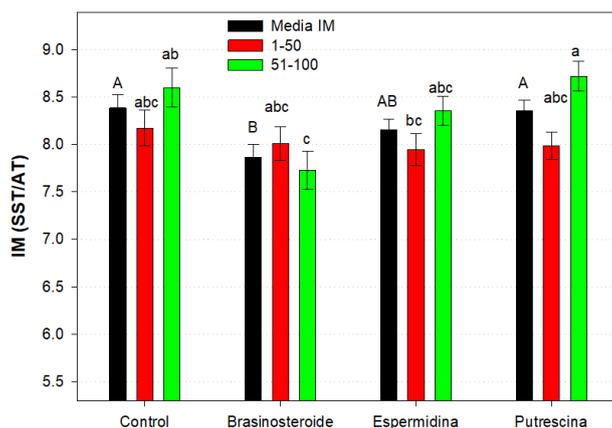


Figura 4. Índice de Madurez (IM) de naranjas sanguinas de cada uno de los tratamientos y AT para cada subgrupos (1-50) y (51-100) de cada tratamiento. Los datos son la media \pm ES. Las letras mayúsculas indican diferencias entre tratamiento y letras minúsculas diferencias entre subgrupos, ($p < 0,05$).

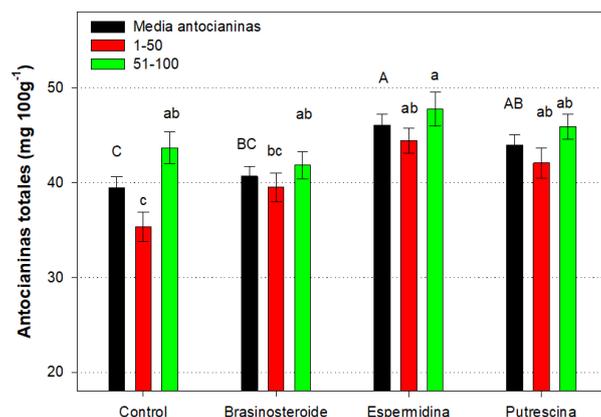


Figura 5. Antocianinas del zumo de naranja sanguina de cada uno de los tratamientos y para cada subgrupos (1-50) y (51-100) de cada tratamiento. Los datos son la media \pm ES. Las letras mayúsculas indican diferencias entre tratamiento y letras minúsculas diferencias entre subgrupos, ($p < 0,05$).

Con respecto a las antocianinas, su concentración fue mayor en los frutos más coloreados de cada uno de los tratamientos, de acuerdo con los trabajos previos (Tarancón et al., 2020), siendo los tratamientos con Spd y Put los que dieron valores más altos, no existiendo claras diferencias en la cantidad de antocianinas según coloración exterior del fruto Figura 5.

La relación de los distintos parámetros analizados, como son SST, AT, antocianinas, color R_{int} y R_{ext} (estos presentaron una mejor correlación que el IC), la podemos ver la Figura 6a, siendo la representación de la matriz de dispersión y distribución los parámetros, donde vemos una distribución normal de estos parámetros con cada uno de los tratamientos, observando que no existe una clara diferencia entre estos, pero si se puede ver que en cuanto al color R_{ext} por tratamientos se aprecia una diferencia entre las naranjas control a las tratadas con putrescina y espermidina en las que coloración es mayor.

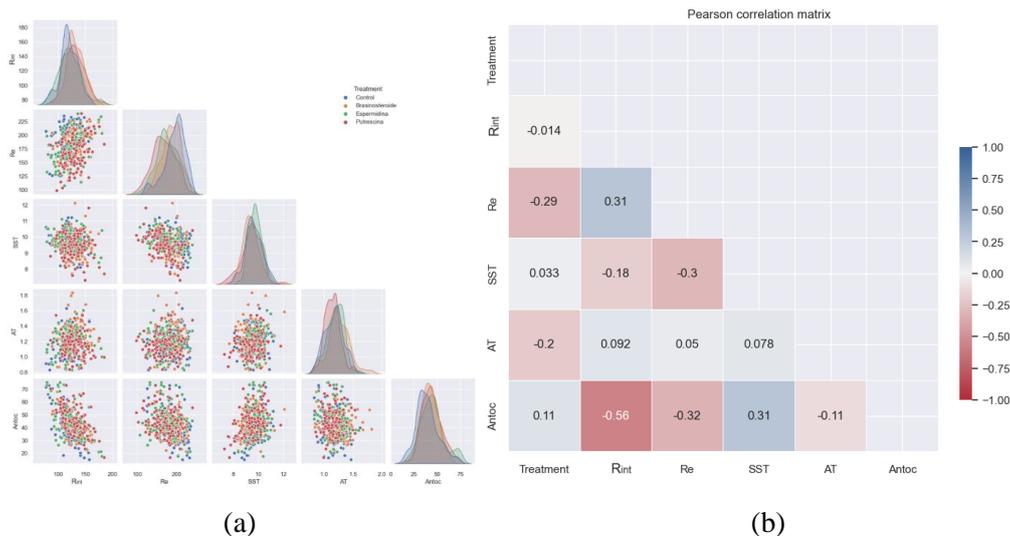


Figura 6. (a) Representación de la matriz de dispersión y distribución y (b) matriz de correlación de Pearson con relación de los parámetros estudiados para cada tratamiento como SST AT, R_{ext}, R_{int} y antocianinas.

Si se tiene en cuenta un estudio estadístico de los datos anteriores y obtenemos la matriz de correlación de Pearson se pueden apreciar las correlaciones entre los distintos parámetros estudiados. Observándose que la relación entre color externo del fruto (R_{ext}) con respecto a los parámetros de calidad SST, AT y antocianinas no supera el 0,32, por lo que esta correlación es moderada en el mejor de los casos y por tanto no se puede predecir con claridad la calidad interna del fruto con respecto a la apariencia exterior de este. Si se tiene en cuenta el color interno (R_{int}) de la naranja y antocianinas, la correlación está sobre 0,56 y esto nos indica que hay una correlación fuerte como cabría esperar ya que el color interno R_i depende de la cantidad de antocianinas que tiene el zumo de naranja sanguina (Tarancón, et al., 2020; Habibi, et al., 2022). Además, se puede ver que la relación entre tratamiento y color externo R_e es de 0,29, siendo esta por tanto una correlación débil.

Analizados los resultados y visto que la relación existente entre color externo del fruto y la calidad interna nos lleva como máximo a una correlación moderada, lo que se hizo es analizar los datos obtenidos por espectroscopía NIR de los frutos del estudio, y poder determinar la relación con la calidad del fruto. Para esto se obtuvieron las curvas características medias de cada uno de los tratamientos, estas se analizaron y corrigieron, obteniéndose los espectros característicos medios de los frutos analizados, como se puede apreciar en la Figura 7. En estos espectros no podemos encontrar grandes diferencias, aunque en algunas longitudes de onda se aprecia una ligera diferencia entre tratamientos, sobre todo entre los brasinosteroides y la putrescina. En 920 nm y 1450 nm, las diferencias corresponderían con las bandas de excitación de los enlaces C-H y O-H asociados a azúcares (Workman y Weyer, 2012).

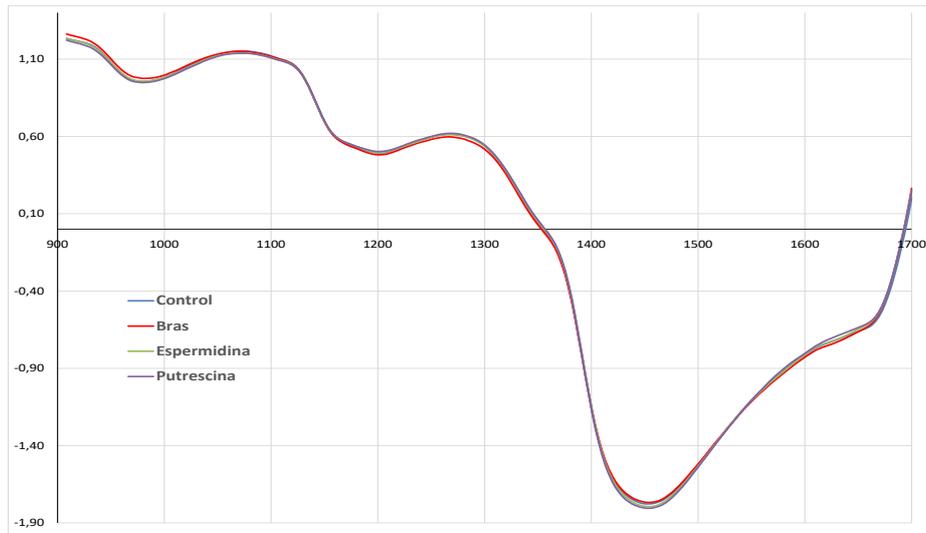


Figura 7. Espectro medio de los frutos por tratamiento en naranjas sanguinas donde se aplicó Standard Normal Variate (SNV) a los espectros para corregir la dispersión de la luz.

Para el análisis de los datos y creación de los modelos predictivos, se extrajo los datos de espectros. Tras realizar modelos predictivos de AT, IM, antocianinas y SST se ha podido comprobar que los mejores resultados en el conjunto de validación se han obtenido en las predicciones por NIRS en el contenido de sólidos solubles (SST, %). Con este sistema se puede llegar a obtener un R^2 de 0,577 lo que nos da una MAE = 0,446 y un RMSE = 0,569 (Figura 8). Estos son valores superiores a los obtenidos en otras investigaciones de naranjas dulces de variedad Valencia donde se obtuvo un R^2 de 0,46 (Riccioli, et al., 2021), aunque en otros estudios en limones finos esta relación llegó a alcanzar valores de $R^2=0,74$ en SST (Serna-Escolano, et al., 2024).

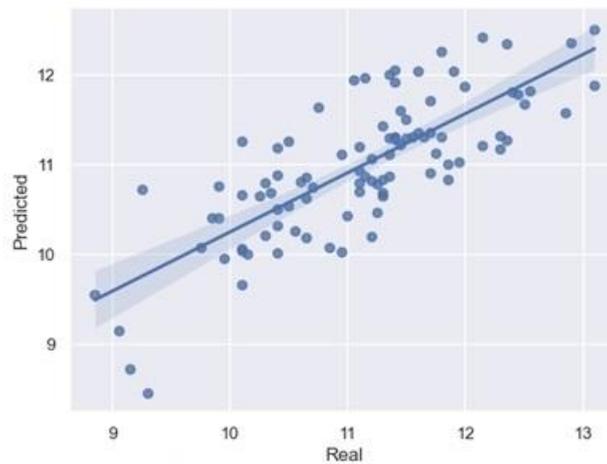


Figura 8. Diagramas de dispersión de las predicciones del conjunto de validación del contenido de sólidos solubles (SST, %) frente a los valores de referencia de laboratorio para los conjuntos de calibración.

Conclusiones

Del estudio de los diferentes parámetros de las naranjas sanguinas, se ha podido ver cómo una mayor coloración de los frutos nos da unas mayores concentraciones de SST, pero no ha llevado a una mejora del IM de estas. Asimismo, en el análisis de los distintos parámetros mediante la matriz de correlación de Person vemos que existe una correlación moderada en el mejor de los casos y por tanto no se puede predecir con claridad la calidad interna del fruto con respecto a la apariencia exterior de este.

En este trabajo se ha visto como mediante espectroscopia NIR en el rango 950–1700 nm y tras la creación de diversos modelos de PLS-R, se alcanzaron buenos resultados en la predicción de los TSS, con un R^2 de 0,577. Este estudio demuestra que la espectroscopía NIR es una herramienta prometedora para que los productores de naranjas sanguinas gestionen adecuadamente la comercialización, según estado de maduración de los frutos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado a través del proyecto GVA-PROMETEO/2021/089 y fondos FEDER. Salvador Castillo Girones agradece a INIA por la beca FPI-INIA PRE2020-094491, con el apoyo de fondos FSE de la Unión Europea.

Bibliografía

- Alamar, P.D., Elem T.S., Caramês, E.T.S., Poppi, R.J., Pallone, J.A.L. (2016). Quality evaluation of frozen guava and yellow passion fruit pulps by NIR spectroscopy and chemometrics. *Food Research International* 85 (2016) 209–214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2016.04.027>
- Baeten, V., Rogez, H., Fernández Pierna, J.A., Vermeulen, P., Dardenne, P. (2015). Vibrational spectroscopy methods for the rapid control of agro-food products. In: Toldra, Nollet, *Hand book of Food Analysis*. Third ed. In: vol. II. pp. 591-614. (Chapter 32). DOI: [10.1201/b18668-74](https://doi.org/10.1201/b18668-74)
- Borochoy-Neori, H., Judeintein, S., Harari, M., Bar-Ya`akov, I., Patil, B. S., Lurie, S., Holanda, D., 2011. Efectos climáticos sobre la acumulación y composición de antocianinas en los arilos de la fruta de granada (*Punica granatum L.*). *Revista de Química Agrícola y Alimentaria*, 59, pp. 5325-5334.
- Caruso, M.; Filippo Ferlito, F., Licciardello, C., Allegra, M., Strano, M.C., Di Silvestro, S., Russo, M.P., Paolo, D.P., Caruso, P., Las Casas, G., Stagno, F., Torrisi, B., Rocuzzo, G., Recupero, G.R., Russo, G. (2016). Pomological diversity of the Italian blood orange germplasm. *Scientia Horticulturae* 213 (2016) 331–339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2016.10.044>
- Damghan, I. R., 2009. Exogenous application of brassinosteroid alleviates drought-induced oxidative stress in *Lycopersicon esculentum L.* *Gen. Appl. Plant Physiol*, 35, 22-34.
- Eid, F. S., El-Kholy, M. F., & Hosny, S. S., 2016. Effect of Foliar Sprays Application of Milagrow on Yield and Fruit Quality of Avocado Tree cv. *Journal of Plant Production*, 7(12), 1495-1499. <https://doi.org/10.21608/JPP.2016.47106>
- Habibi, F., García-Pastor, M.E., Puente-Moreno, J., Garrido-Auñón, F., Serrano, M., Valero, D. (2022), Anthocyanin in blood oranges: a review on postharvest approaches for its enhancement and preservation. *Crit Rev Food Sci Nutr*. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2098250>
- Hossain, M, M., Paul, D.K., Rahim, M.A., 2016. Physio-chemical changes during growth and development of sapota fruit. *Turkish I. Agric. Nat. Sci*, 3, 58-64.
- Krishna, P., Prasad, B. D., & Rahman, T. (2017). Brassinosteroid action in plant abiotic stress tolerance. In *Brassinosteroids* (pp. 193-202). Humana Press, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6813-8_16

- Lo Piero, A.R., Puglisi, I., Rapisarda, P., Petrone, G. (2005). Anthocyanins accumulation and related gene expression in red orange fruit induced by low temperature storage. *J Agric Food Chem* 53(23): 9083-9088. <https://doi.org/10.1021/jf051609s>.
- Manley, M., 2014. Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials. *Chem. Soc. Rev.* 43, 8200–8214. [doi: 10.1039/c4cs00062e](https://doi.org/10.1039/c4cs00062e).
- Molinu. M.G., Dore, A., Palma, A., D’Aquino, S., Azara, E., Rodov, V., D’hallewin, G., (2016). Efecto del almacenamiento de oxígeno superatmosférico sobre el contenido de fitonutrientes en la naranja sanguina “Sanguinello Comune”. *Biología y Tecnología Postcosecha*, 112, pp. 24-30.
- Morales, J.; Bermejo, A.; Navarro, P., Forner-Giner, M.A., Salvador, A. (2021). Rootstock effect on fruit quality, anthocyanins, sugars, hydroxycinnamic acids and flavanones content during the harvest of blood oranges ‘Moro’ and ‘Tarocco Rosso’ grown in Spain. *Food Chemistry* 342 128305. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128305>
- Mostafa, L.Y., Kotb, H.R. (2018). Effect of brassinosteroids and gibberellic acid on parthenocarpic fruit formation and fruit quality of sugar apple *Annona squamosa* L. *Middle East J*, 7(4), 1341-1351.
- Muccilli, V., Licciardello, C., Fontanini, D., Russo, M. P., Cunsolo, V., Saletti, R., et al. (2009). Proteome analysis of *Citrus sinensis* L. (Osbeck) flesh at ripening time. *Journal of Proteomics*, 73(1), 134–152. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2009.09.005>
- Nolan, T., Chen, J., Yin, Y. (2017). Crosstalk of Brassinosteroid signaling in controlling growth and stress responses. *Biochemical Journal*, 474(16), 2641-2661. <https://doi.org/10.1042/BCJ20160633>
- Riccioli, C., Pérez-Marín, D., Garrido-Varo, A. (2021). Optimizing spatial data reduction in hyperspectral imaging for the prediction of quality parameters in intact oranges. *Postharvest Biology and Technology* 176. 111504. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111504>
- Rinnan, A., Van den Berg, F., Engelsen, S.B., 2009. Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. *Trends Anal. Chem.* 28, 1201–1222.
- Rodrigo, M. J., Alquézar, B., Alós, E., Lado, J., Zacarías, L. (2013). Biochemical bases and molecular regulation of pigmentation in the peel of *Citrus* fruit. *Scientia Horticulturae*, 163, 46–62. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.08.014>
- Serna-Escolano, V., Giménez, M.J., Zapata, P.J., Cubero, S., Blasco, J., Munera, S. (2024). Non-destructive assessment of “Fino” lemon quality through ripening using NIRS and chemometric analysis. *Postharvest Biology and Technology*. 212, 112870. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2024.112870>
- Symons, G. M., Davies, C., Shavrukov, Y., Dry, I. B., Reid, J. B., Thomas, M. R. (2006).
- Grapes on steroids. Brassinosteroids are involved in grape berry ripening. *Plant physiology*, 140(1), 150-158. <https://doi.org/10.1104/pp.105.070706>
- Tarancón, P.; Cebrián, B.; Fernández-Serrano, P.; Besada, C. (2022). Relation between Rind Pigmentation and Internal Quality of Blood Orange ‘Sanguinelli’: Physicochemical and Sensory Studies. *Horticulturae*. 8, 448. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8050448>
- Valero, D., Martínez-Romero, D., Serrano, M., 2002. El papel de las poliaminas en la mejora de la vida útil de la fruta. *Tendencias en Ciencia y Tecnología de los Alimentos*, 13, pp. 228-234.
- Walsh, K.B., Golic, M., Greensill, C.V., 2004. Sorting of fruit using near infrared spectroscopy: application to a range of fruit and vegetables for soluble solids and dry matter content. *J. Near Infrared Spectrosc.* 12, 141–148.
- Woodcock, T., Downey, G., O’Donnell, C.P., 2008. Better quality food and beverages: the role of near infrared spectroscopy. *J. Near Infrared Spectrosc.* 16, 1–29. <https://doi.org/10.1255/jnirs.758>



Workman, J. and Weyer, L. (2012). Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near-Infrared Spectroscopy. (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11894>

Zheng X, Tian S (2006) Effect of oxalic acid on control of postharvest browning of litchi fruit. Food Chem 96(4):519–523. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.02.049>

Efecto de la aplicación precosecha de ácido clorogénico en naranja Navel Late Powell

V. Torres-Vincent, P.J. Zapata

Universidad Miguel Hernández de Elche. Escuela Politécnica Superior de Orihuela. Ctra. De Beniel km 3.2
(Desamparados) Orihuela 03312, vivianatorres798@gmail.com

Resumen

La búsqueda de métodos para mejorar la calidad y prolongar la vida útil de los cítricos es esencial en la agricultura moderna. El artículo investiga el efecto de la aplicación precosecha de ácido clorogénico en la calidad de la naranja Navel Late Powell, un cultivo frutal de gran importancia comercial que destaca en relevancia el mercado global de cítricos, donde la aceptación de las frutas depende de su apariencia, propiedades organolépticas y beneficios para la salud. El objetivo de este estudio fue evaluar el impacto de la aplicación de ácido clorogénico (ACG) en precosecha sobre la calidad y conservación refrigerada de la naranja "Navel Late Powell". Se realizaron pulverizaciones con dos concentraciones de ACG (5 ppm y 50 ppm) y control en campo durante la fase de desarrollo del fruto. Los parámetros de calidad analizados incluyeron pérdida de peso, firmeza, tasa de respiración, sólidos solubles totales, acidez titulable, índice de maduración y contenido de fenoles totales, tanto en el momento de la recolección como durante la conservación refrigerada (15, 30 y 45 días desde la recolección). Los resultados mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en los parámetros de calidad evaluados, indicando que el tratamiento con ácido clorogénico mejoró la firmeza y redujo la pérdida de peso y la tasa de respiración en comparación con los controles, especialmente a 5 ppm, mejorando la calidad de las naranjas en el momento de la cosecha, prolongando su vida útil hasta 45 días de almacenamiento refrigerado. Se concluye que la aplicación precosecha de ácido clorogénico se presenta como una estrategia efectiva para mejorar la calidad postcosecha de la naranja Navel Late Powell, lo que podría beneficiar tanto a productores como a consumidores al ofrecer frutas de mejor calidad y mayor durabilidad en el mercado.

Palabras clave: ácido clorogénico, naranja, calidad de la fruta, conservación

Effect of pre-harvest application of chlorogenic acid on Powell Late Navel orange

Abstract

The search for methods to improve the quality and extend the shelf life of citrus fruits is essential in modern agriculture. The article investigates the effect of pre-harvest application of chlorogenic acid on the quality of the Navel Late Powell orange, a fruit crop of great commercial importance that stands out in relevance in the global citrus market, where the acceptance of fruits depends on their appearance, organoleptic properties and health benefits. The objective of this study was to evaluate the impact of the application of chlorogenic acid (CGA) in pre-harvest on the quality during refrigerated storage of the Navel Late 'Powell' orange. Sprays were carried out with two concentrations of ACG (5 ppm and 50 ppm) and control in the field during the fruit development phase. The quality parameters which were measured included weight loss, firmness, respiration rate, total soluble solids, titratable acidity, ripening index and total phenolic content, both at the time of harvest and during refrigerated storage (15, 30 and 45 days from collection). The results showed significant differences ($p < 0.05$) in the quality parameters evaluated, indicating that treatment with chlorogenic acid improved firmness and reduced weight loss and respiration rate compared to controls, especially at 5 ppm, improving the quality of oranges at harvest time and prolonging their shelf life up to 45 days of refrigerated storage. It is concluded that the pre-harvest application of chlorogenic acid is presented as an effective strategy to improve the post-harvest quality of the Navel Late Powell orange, which could benefit both producers and consumers by offering fruits of better quality and greater durability in the market.

Keywords: Chlorogenic acid, orange, fruit quality, preservation

Introducción

Los cítricos son uno de los cultivos frutales comerciales más importantes a nivel mundial en términos de producción, comercialización y consumo. La demanda y aceptación de frutas cítricas para consumo fresco o producción de jugo es muy variable en diferentes mercados nacionales e internacionales, dependiendo de las elecciones y preferencias del consumidor, pero en general, se basa principalmente en la apariencia externa, propiedades organolépticas, calidad nutricional y beneficios relacionados con la salud (Ma et al., 2021).

La naranja Navel Late Powell pertenece a la familia de las naranjas navel, conocidas por su distintivo "ombligo" en el extremo del fruto, una característica que facilita su identificación y se caracteriza por su sabor dulce, su jugosidad y su textura firme, lo que la convierte en una de las preferidas en el mercado de frutas frescas (Seminara et al., 2023).

Las naranjas (*Citrus sinensis*) son fuentes relevantes de varios nutrientes y fitoquímicos, incluyendo carbohidratos, proteínas, lípidos, vitaminas, elementos minerales, fenólicos, limonoides y carotenoides entre otros (Lu et al., 2021). Los azúcares son los principales nutrientes de los frutos de la mayoría de las especies de cítricos y, junto con los ácidos orgánicos, tienen un fuerte impacto en el sabor característico de la fruta, jugando un papel crucial en sus propiedades organolépticas y aceptación del consumidor (Ma et al., 2020). Los compuestos fenólicos en cítricos han sido ampliamente caracterizados en naranja, y los ácidos fenólicos y flavonoides son el grupo más grande, estando presentes tanto en estado libre (agliconas) como en derivados de glicosilo (Saini et al., 2022). Sin embargo, el contenido de estos compuestos puede verse afectado de manera diferente dependiendo de la variedad, la madurez y las condiciones de almacenamiento (Baltazari et al., 2019).

El ácido clorogénico (ACG, ácido 3-*O*-cafeoilquínico), es un compuesto fenólico importante que pertenece a la familia de derivados del ácido hidroxicinámico y se compone de ácido cafeico y ácido quínico mediante esterificación (Santana-Gálvez et al., 2017). En la actualidad, se estudia ampliamente por sus propiedades antioxidantes y es un compuesto bioactivo prometedor que se utiliza como suplemento dietético, conservante de alimentos y alimento funcional. Además, puede haber una estrecha relación entre el nivel de contenido de ACG y las respuestas de defensa en las plantas. Se ha informado que las variedades de plantas más resistentes a la aparición de enfermedades tienen niveles más altos de ACG (Jiao et al., 2018). Por otro lado, el ACG es uno de los polifenoles más estudiados debido a sus diversas funciones biológicas, está ampliamente distribuido en numerosas frutas y verduras, y su contenido varía significativamente durante los procesos de maduración y senescencia (Ilea et al., 2024).

Actualmente, distintos estudios en postcosecha han evaluado el efecto de ACG para retrasar las pérdidas de calidad en nectarina, manzana y tomate (Xi et al., 2017a; Shu et al., 2020; Ilea et al., 2024). La aplicación en poscosecha de ACG exógeno pudo retrasar significativamente la senescencia de la manzana, mejorando la calidad e incrementando las propiedades antioxidantes (Xi et al., 2016). Sin embargo, hasta donde se conoce, no se ha evaluado el efecto de la aplicación precosecha de ACG en la calidad de cítricos, concretamente en naranja, por ello, el objetivo del estudio fue determinar si la aplicación del tratamiento precosecha tiene un efecto en la calidad en el momento de la cosecha y durante la conservación refrigerada de los frutos.

Materiales y Métodos

Material vegetal y diseño experimental

Las naranjas Navel Late Powell fueron recolectadas en una finca comercial, localizada en la provincia de Murcia, término municipal de Alhama. Para cada tratamiento y variedad se distribuyeron 3 bloques al azar formados por 15 árboles. Se aplicaron 3 tratamientos diferentes, ACG a dos concentraciones (5 y 50 ppm) y un tratamiento control. Para preparar el tratamiento con ACG se diluyó directamente en agua y se añadió Tween 20 al 0,5 % como mojante. Los tratamientos control contenían únicamente Tween 20 al 0,5 % y agua. Se realizaron cuatro aplicaciones de cada tratamiento mediante pulverización foliar en intervalos de un mes, aplicándose el último 3 días antes de la recolección. Todos los frutos fueron recolectados en el mismo día. Posteriormente, fueron transportadas al laboratorio de la Universidad Miguel Hernández de Elche (Orihuela, Alicante, España) inmediatamente después de la recolección. La clasificación de las naranjas se llevó a cabo visualmente en base al tamaño, color y aspecto visual, con el fin de obtener una muestra homogénea que no presentase defectos visuales. Por otro lado, 15 frutos ($n = 3$) fueron analizados en el momento de la recolección (día 0). Posteriormente, los frutos fueron almacenados a una temperatura de 8 °C y una humedad relativa del 85 %. Para las determinaciones analíticas se dividieron tres lotes de conservación (15, 30 y 45 días) [15 frutos, $n = 3$] para cada uno de los tratamientos, fueron rotulados y pesados de forma individual.

Determinaciones analíticas

Pérdida de peso y firmeza

Las pérdidas de peso se determinaron pesando las naranjas el día 0 y tras el almacenamiento refrigerado, expresando los resultados como porcentaje (%). Finalmente, la firmeza se determinó utilizando un texturómetro TX.XT plus Texture Analyser acoplado a una placa de acero, aplicando una fuerza de deformación de 5% del diámetro del fruto (Serna-Escolano et al., 2021), la compresión se realizó una vez por unidad experimental y los resultados se expresaron en $N\ mm^{-1}$. Los resultados obtenidos en cada una de las determinaciones fueron la media \pm error estándar (ES).

Tasa de respiración

La tasa de respiración (TR) se determinó colocando 5 naranjas por cada réplica y tratamiento (15 naranjas en total) en recipientes con una capacidad 4,6 litros. Los recipientes se cerraron y tras 60 minutos se extrajo el aire de cabeza con 3 jeringuillas de 1 mL. Posteriormente, las jeringuillas fueron utilizadas para cuantificar el CO_2 en un cromatógrafo de gases Shimadzu 14B-GC acoplado a un detector de conductividad térmica, expresando los resultados como $mg\ de\ CO_2\ kg^{-1}\ h^{-1}$ (Martínez-Esplá et al., 2017). Los resultados fueron la media \pm ES.

Sólidos solubles y acidez titulable

Se recogieron muestras de zumo de la combinación de 5 naranjas por tratamiento y réplica. Los sólidos solubles totales (SST) se midieron por duplicado utilizando un refractómetro digital (Hanna Instruments, Rhode Island, EE. UU.). Por otro lado, la acidez titulable (AT) se determinó añadiendo 1 mL de la muestra de zumo en 25 mL de agua destilada. Se utilizó un valorador automático (OMNIS, Metrohm AG, Herisau, Suiza), el cual dosificó NaOH 0,1 mM hasta alcanzar un pH de 8,1 en la muestra. Los resultados se expresaron como ° Brix para los SST y % de ácido cítrico para la AT, respectivamente. Los resultados de ambos parámetros fueron la media \pm ES.

Contenido de fenoles totales

Las extracciones de fenoles totales se realizaron homogeneizando 2 g de piel con 15 mL de disolución metanol-NaF. El homogeneizado se centrifugó a 10.000 x g durante 10 minutos a 4 °C, y el sobrenadante fue transferido a un eppendorf (dilución 1:5). Los fenoles se cuantificaron por duplicado, utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteu de acuerdo con Serna-Escolano et al. (2019). Los resultados se expresaron como mg de ácido gálico equivalentes en 100 g^{-1} de peso fresco. Para las medidas se

utilizó un espectrofotómetro UV-1700 Phama Spec (Shimadzu) a una longitud de onda de 760 nm. Los resultados fueron la media \pm ES.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico, se utilizó el programa SPSS v. 20 para Windows (IBM, Chicago, EE. UU.). Para ello, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y se empleó la prueba de rango múltiple (HSD de Tukey) para comprobar el nivel de significancia ($p < 0,05$) con el fin de determinar las diferencias significativas entre tratamientos (letras mayúsculas) y días de conservación (letras minúsculas).

Resultados y Discusión

Los resultados del análisis estadístico realizado mostraron diferencias significativas en los parámetros de calidad evaluados entre tratamientos durante su almacenamiento que fueron: pérdida de peso, firmeza, tasa de respiración, sólidos solubles totales, acidez titulable, índice de maduración y contenido de fenoles totales estableciendo diferentes grupos estadísticos (Tabla 1).

Tabla 1. Efecto del ácido clorogénico ACG sobre las pérdidas de peso, firmeza, tasa de respiración, sólidos solubles totales, acidez titulable e índice de maduración de las naranjas Navel Late Powell.

Parámetros	Tratamientos	Tiempo	(Tratamiento x Tiempo)
Pérdida de peso (%)	2,221 NS	166,488 ***	0,674 NS
Firmeza (N mm ⁻¹)	1,914 NS	121,978 ***	4,103 ***
Tasa de respiración (mg CO ₂ · kg ⁻¹ · h ⁻¹)	15,408 ***	28,771 ***	33,169 ***
Sólidos solubles totales (° Brix)	31,759 ***	79,945 ***	8,386 ***
Acidez titulable (g 100 mL ⁻¹)	21,353 ***	3,738 **	1,562 NS
Índice de maduración	279,984 ***	30,507 ***	8,691 ***
Contenido de fenoles totales (mg 100 g ⁻¹)	7,53 **	36,475 ***	0,278 NS

Los valores representan el valor de *F* tras el análisis de varianza ANOVA. NS indica no significativo, * indica significativo a $p < 0.1$, *** a $p < 0.05$ y **** a $p < 0.01$, respectivamente.

Pérdida de peso

Como era de esperar, las pérdidas de peso aumentaron significativamente ($p < 0,01$) durante su almacenamiento en frío, debido a la tasa de transpiración (Tabla 1). En el día 15, se puede observar que todos los tratamientos pierden peso de forma similar y progresiva hasta el final del experimento, en donde ACG a 50 ppm presentó un valor más bajo ($3,57 \pm 0,19$ %) en comparación con ACG 5 ppm ($3,79 \pm 0,24$ %) y el control ($4,08 \pm 0,25$ %) sin presentar diferencias significativas entre tratamientos (figura 1). La tasa de pérdida de agua está determinada por el gradiente de presión de agua entre el tejido de la fruta y el ambiente circundante, lo cual podría estar relacionado con el grado de madurez de la fruta y la temperatura a la que se almacena (Xi et al., 2017). Además, los tratamientos aplicados

durante el desarrollo de la naranja en precosecha no provocaron alteraciones en la fruta durante la postcosecha que pudieran llevar consigo incrementos en las pérdidas de peso.

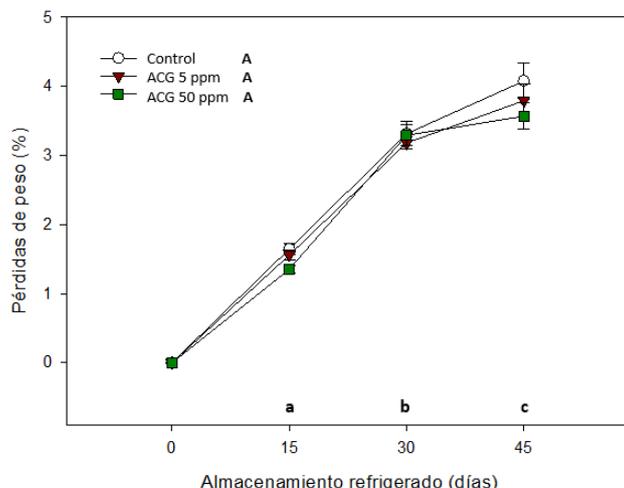


Figura 1. Pérdida de peso (%) en naranja de plantas control y tratadas con ACG durante el almacenamiento a 8 °C. Los datos son la media \pm ES de tres réplicas.

Firmeza

No se observaron diferencias significativas entre tratamientos, pero sí durante el periodo de almacenamiento ($p < 0,01$) (Tabla 1). El tratamiento con ACG a 5 ppm presentó una firmeza inicial mayor ($10,13 \pm 0,22 \text{ N mm}^{-1}$) en comparación con el control ($9,29 \pm 0,40 \text{ N mm}^{-1}$) y ACG a 50 ppm ($9,50 \pm 0,27 \text{ N mm}^{-1}$). La tendencia de disminución es similar en los tres tratamientos, aunque ACG a 50 ppm en los 45 días presentó una firmeza ligeramente superior ($6,56 \pm 0,24 \text{ N mm}^{-1}$) comparada con el control ($5,35 \pm 0,28 \text{ N mm}^{-1}$) y el tratamiento a 5 ppm ($5,06 \pm 0,17 \text{ N mm}^{-1}$) (figura 2). El ACG puede regular el metabolismo energético interno de la fruta, manteniendo la integridad de la membrana y aliviando la respuesta fisiológica adversa de las frutas causada por el estrés (Shu et al., 2020). En un estudio previo se observó que el tratamiento con ACG podría regular la actividad de la enzima NADP-másica en manzana (Xi et al., 2016), lo que sugiere que el tratamiento con ACG puede regular la maduración de la fruta, la senescencia y la respuesta a las lesiones. Sin embargo, en nuestro estudio en el que los tratamientos fueron aplicados durante la precosecha, no observamos el efecto del tratamiento con ACG para los diferentes muestreos realizados, aunque al final del experimento la concentración más alta mostró un 18,44% superior al control.

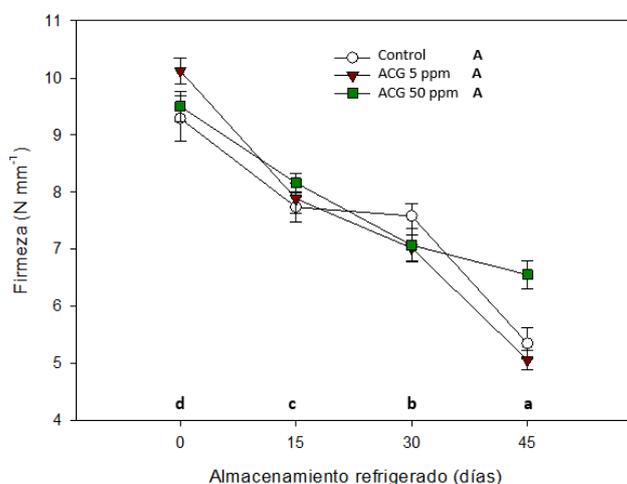


Figura 2. Firmeza (N mm^{-1}) en la naranja de plantas control y tratadas con ACG durante el almacenamiento a 8 °C. Los datos son la media \pm ES de tres réplicas.

Tasa de respiración (TR)

Los frutos cítricos son considerados como no climatéricos, caracterizados por una reducción progresiva en la tasa de respiración y una baja producción de etileno durante su proceso de maduración (Lado et al., 2018). El mantenimiento de la tasa de respiración varió significativamente ($p < 0,01$) entre los tratamientos y el tiempo de almacenamiento (Tabla 1). Inicialmente, todos los tratamientos mostraron una tendencia similar en la tasa de respiración. No obstante, se observó un aumento significativo en la tasa de respiración para ACG a 5 ppm ($18,27 \pm 1,02 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$) hacia el final del período de almacenamiento. En cambio, los tratamientos tratados con 50 ppm de ACG mantienen una tasa de respiración más estable y baja ($9,06 \pm 0,36 \text{ CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$), similar al control ($11,74 \pm 0,61 \text{ CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$) al final del período de almacenamiento. La tasa de respiración reducida de la naranja Navel Late Powell tratada con ACG 50 ppm podría dar lugar a un retraso en la senescencia poscosecha. Una alta tasa de respiración durante el período de almacenamiento daría como resultado un consumo excesivo de nutrientes orgánicos que llevaría al deterioro de la calidad y finalmente a la senescencia de la fruta (Ma et al., 2021).

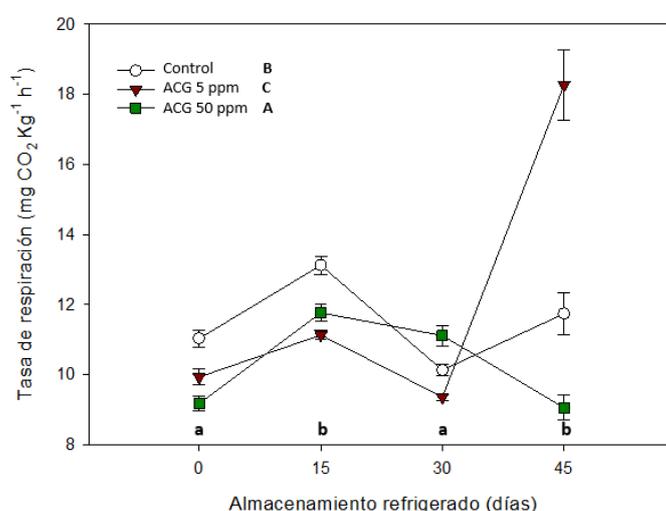


Figura 3. Tasa de respiración ($\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$) en naranja de plantas control y tratadas con ACG durante el almacenamiento a 8°C . Los datos son la media \pm ES de tres réplicas.

Sólidos solubles totales (SST)

La sacarosa y los azúcares reductores fructosa y glucosa son los principales azúcares presentes en la naranja (Borba et al., 2020). Se observaron diferencias significativas ($p < 0,01$) en la concentración de SST entre tratamientos y el tiempo de almacenamiento (Tabla 1). En el día 15, los tratamientos ACG 5 y 50 ppm presentaron niveles más bajos de SST ($12,28 \pm 0,10$ y $12,60 \pm 0,09$ °Brix) en comparación con el control ($13,60 \pm 0,07$ °Brix), mientras que, en el día 30, se observó una disminución de SST en todos los tratamientos, siguiendo la misma tendencia ACG 5 y 50 ppm niveles inferiores ($11,85 \pm 0,06$ y $11,40 \pm 0,07$ °Brix) y el control con un contenido superior ($12,18 \pm 0,07$ °Brix), esta disminución de SST observada podría estar asociada con el consumo de azúcares debido a la respiración. Sin embargo, en el día 45, el contenido de SST presentó un leve aumento hacia el final del almacenamiento entre los tratamientos, control ($13,33 \pm 0,08$ °Brix), seguido ACG 50 y 5 ppm ($13,10 \pm 0,16$ y $12,90 \pm 0,24$ ° Brix). Estos valores mostraron que la aplicación de ACG a las concentraciones estudiadas no afecta considerablemente este parámetro de calidad durante el periodo de conservación de 45 días, lo que indica que la naranja mantenía una buena calidad comestible (figura 4).

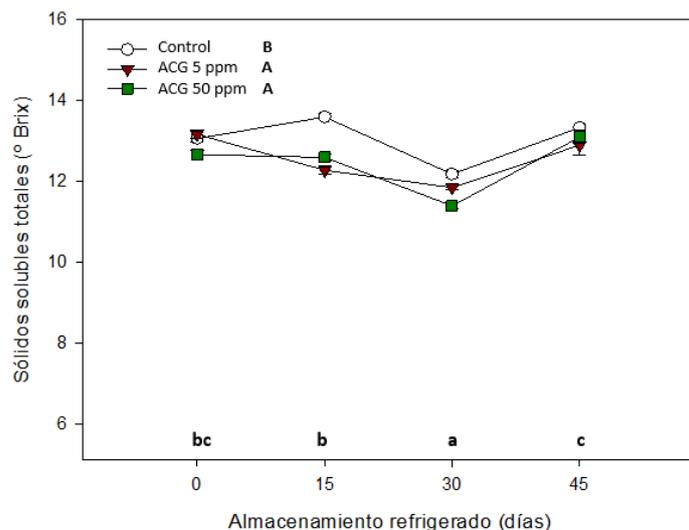


Figura 4. Sólidos solubles totales (° Brix) en naranja de plantas control y tratadas con ACG durante el almacenamiento a 8 °C. Los datos son la media \pm ES de tres réplicas.

Acidez titulable (AT)

En la AT se observaron diferencias significativas entre tratamientos y durante los 45 días de almacenamiento en frío (Tabla 1). Las naranjas tratadas con ACG a 5 ppm mostraron un contenido de AT significativamente superior ($p < 0,05$) tanto al inicio de la recolección como al final del experimento, lo cual puede influir en el perfil de sabor y en la percepción de frescura de la fruta durante el almacenamiento; mientras que, el control y ACG a 50 ppm mantienen niveles de acidez similares a lo largo del período de almacenamiento, sin cambios significativos a través del tiempo (figura 5). Esta diferencia inicial sugiere que el tratamiento con 5 ppm ACG puede inducir un incremento en la acumulación de ácidos orgánicos, posiblemente debido a una mayor actividad metabólica relacionada con la síntesis de ácidos en la fruta (Xi et al., 2017b). El ácido cítrico no solo es el ácido predominante en las naranjas, sino que también es un factor clave que influye en su calidad, sabor, valor nutricional y conservación (Borba et al., 2020). Como se ha comentado anteriormente, la disponibilidad estos compuestos en mayor concentración, permite a la fruta tener una mayor disponibilidad de sustratos para el mantenimiento del metabolismo durante el periodo de conservación, lo que permite retrasar la senescencia. Numerosos autores han resaltado la importancia de una AT alta para aumentar la vida útil de la fruta en cítricos (Serna-Escolano., 2021).

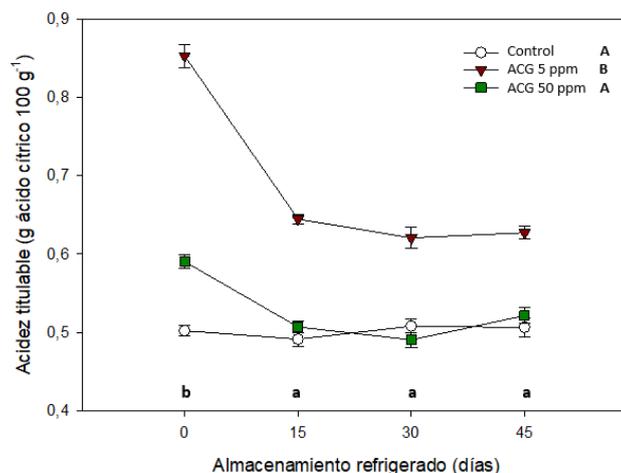


Figura 5. Acidez titulable (g ácido cítrico) en naranja de plantas control y tratadas con ACG durante el almacenamiento a 8 °C. Los datos son la media \pm ES de tres réplicas.

Índice de maduración (IM)

El IM muestra la relación entre los SST y AT de los frutos, así, se observaron diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) entre los tratamientos y durante los 45 días de almacenamiento en frío (Tabla 1). En el día 0, el control presentó el IM más alto ($26,19 \pm 0,24$), mientras que el tratamiento con ACG a 5 ppm tiene un índice más bajo ($15,27 \pm 0,27$). A los 15 días, todos los tratamientos aumentan su índice de maduración, alcanzando el control su pico más alto en el control ($27,79 \pm 0,43$). A los 30 días, el índice disminuye en el control y ACG 50 ppm ($24,00 \pm 0,43$ y $23,28 \pm 0,50$), manteniéndose más estable en ACG 5 ppm ($19,13 \pm 0,43$). En el día 45, todos los tratamientos muestran un aumento en el índice de maduración, presentando una similitud el control y CG5 50 ppm ($26,39 \pm 0,67$ y $25,14 \pm 0,33$), mientras que ACG 5 ppm ($20,58 \pm 0,44$) sigue siendo el más bajo, pero en aumento (figura 6). Estos resultados sugieren que el tratamiento con ACG 5 ppm es más efectivo en retardar la maduración inicial, mientras que ACG 50 ppm muestra ventajas en la preservación de la calidad durante el almacenamiento prolongado.

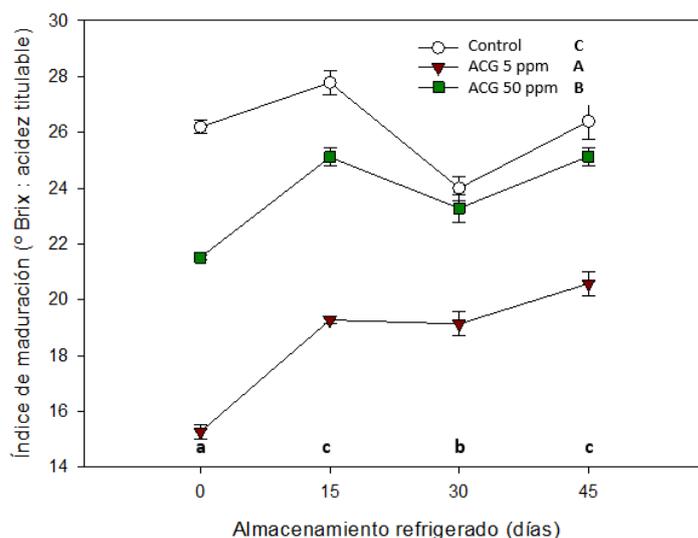


Figura 6. Índice de maduración (° Brix; acidez titulable) en naranja de plantas control y tratadas con ACG durante el almacenamiento a 8 °C. Los datos son la media ± ES de tres réplicas.

Contenido de fenoles totales

Se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos y el tiempo de almacenamiento (Tabla 1). Inicialmente, en el día 0, los fenoles totales son más altos en el control en comparación con los tratamientos con ACG. A lo largo del tiempo de almacenamiento refrigerado (15, 30 y 45 días), se observa una disminución general en el contenido de fenoles totales en todos los tratamientos (figura 7), lo cual es consistente con la degradación y oxidación de fenoles debido a las condiciones de almacenamiento. Sin embargo, a los 45 días, se observa una recuperación en el contenido de fenoles, lo cual podría estar relacionado con la activación de mecanismos de defensa antioxidante en respuesta al estrés prolongado del almacenamiento refrigerado (Zhao et al., 2022).

Los tratamientos con ACG muestran una tendencia similar en el contenido de fenoles totales al final del periodo de almacenamiento de 45 días. Aunque a lo largo de los primeros 30 días, el tratamiento con 50 ppm tiende a mantener niveles de fenoles ligeramente superiores, sin embargo, esta diferencia no es tan marcada al final del periodo de almacenamiento. Estos hallazgos pueden ser el resultado del equilibrio de dos procesos antitéticos: el proceso de degradación y la biosíntesis de moléculas de defensa inducidas por el estrés externo (Pannitteri et al., 2017).

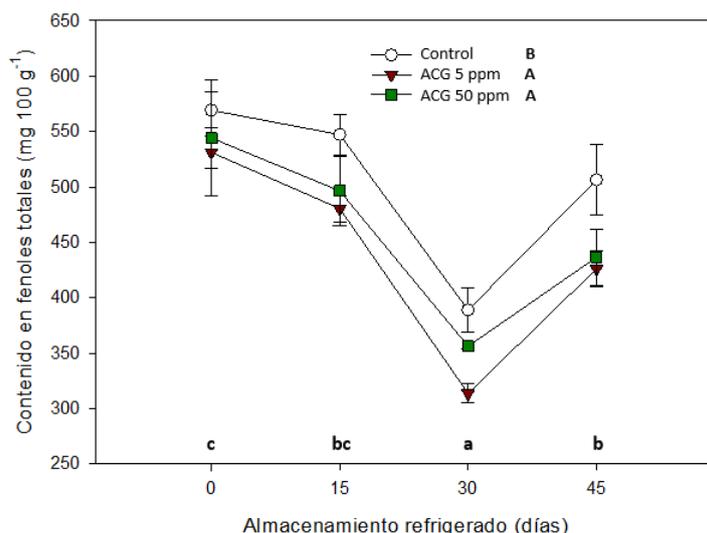


Figura 7. Contenido de fenoles totales en naranja de plantas control y tratadas con ACG durante el almacenamiento a 8 °C. Los datos son la media \pm ES de tres réplicas.

Conclusiones

La aplicación precosecha de ácido clorogénico, especialmente a la concentración de 5 ppm, incrementó la acumulación de ácidos orgánicos en el momento de la recolección, y estos niveles de acidez se mantuvieron durante el almacenamiento refrigerado, lo que mantendría la calidad de la naranja Navel Late Powell durante más tiempo, aumentando así su vida útil durante el almacenamiento refrigerado. Mientras que, en el resto de los parámetros analizados, no se observaron efectos negativos por la aplicación de la concentración más baja del ACG, mostrando así este tratamiento como una posible herramienta para aplicar durante el cultivo, aunque más estudios son necesarios para la confirmación de estos resultados.

Bibliografía

- Baltazari, A., Mtui, H. D., Mwatawala, M. W., Chove, L. M., Msogoya, T., Samwel, J., & Subramanian, J., 2019. Effects of storage conditions, storage duration and post-harvest treatments on nutritional and sensory quality of orange (*Citrus sinensis* (L) Osbeck) fruits. *International Journal of Fruit Science*, 20(4), 737-749. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1673278>
- Borba, K. R., Spricigo, P. C., Aykas, D. P., Mitsuyuki, M. C., Colnago, L. A., & Ferreira, M. D., 2020. Non-invasive quantification of vitamin C, citric acid, and sugar in 'Valência' oranges using infrared spectroscopies. *Journal of food science and technology*, 58, 731-738. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04589-x>
- Ilea, M. I. M., Zapata, P. J., Fernández-Picazo, C., Díaz-Mula, H. M., Castillo, S., & Guillén, F., 2024. Chlorogenic Acid as a Promising Tool for Mitigating Chilling Injury: Cold Tolerance and the Ripening Effect on Tomato Fruit (*Solanum lycopersicum* L.). *Plants*, 13(15), 2055. <https://doi.org/10.3390/plants13152055>
- Jiao, W., Li, X., Wang, X., Cao, J., & Jiang, W., 2018. Chlorogenic acid induces resistance against *Penicillium expansum* in peach fruit by activating the salicylic acid signaling pathway. *Food Chemistry*, 260, 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.010>
- Lado, J., Gambetta, G., & Zacarias, L., 2018. Key determinants of citrus fruit quality: Metabolites and main changes during maturation. *Scientia Horticulturae*, 233, 238-248. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.055>
- Lu, X., Zhao, C., Shi, H., Liao, Y., Xu, F., Du, H., Xiao, H., & Zheng, J., 2021. Nutrients and bioactives in citrus fruits: Different citrus varieties, fruit parts, and growth stages. *Critical Reviews In Food Science And Nutrition*, 63(14), 2018-2041. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1969891>

Ma, G., Zhang, L., Sugiura, M., & Kato, M., 2020. Citrus and health. En Elsevier eBooks (pp. 495-511). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812163-4.00024-3>

Ma, Q., Lin, X., Wei, Q., Yang, X., Zhang, Y., & Chen, J., 2021. Melatonin treatment delays postharvest senescence and maintains the organoleptic quality of 'Newhall' navel orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) by inhibiting respiration and enhancing antioxidant capacity. *Scientia Horticulturae*, 286, 110236. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110236>

Martínez-Esplá, A., Zapata, P. J., Valero, D., Martínez-Romero, D., Díaz-Mula, H. M., & Serrano, M., 2017. Preharvest treatments with salicylates enhance nutrient and antioxidant compounds in plum at harvest and after storage. *Journal Of The Science Of Food And Agriculture*, 98(7), 2742-2750. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8770>

Pannitteri, C., Continella, A., Lo Cicero, L., Gentile, A., La Malfa, S., Sperlinga, E., Napoli, E., Strano, T., Ruberto, G., & Siracusa, L., 2017. Influence of postharvest treatments on qualitative and chemical parameters of Tarocco blood orange fruits to be used for fresh chilled juice. *Food Chemistry*, 230, 441-447. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.041>

Saini, R. K., Ranjit, A., Sharma, K., Prasad, P., Shang, X., Gowda, K. G. M., & Keum, Y., 2022. Bioactive Compounds of Citrus Fruits: A Review of Composition and Health Benefits of Carotenoids, Flavonoids, Limonoids, and Terpenes. *Antioxidants*, 11(2), 239. <https://doi.org/10.3390/antiox11020239>

Santana-Gálvez, J., Cisneros-Zevallos, L., & Jacobo-Velázquez, D. A., 2017. Chlorogenic acid: Recent advances on its dual role as a food additive and a nutraceutical against metabolic syndrome. *Molecules*, 22(3), 358. <https://doi.org/10.3390/molecules22030358>

Seminara, S., Bennici, S., Di Guardo, M., Caruso, M., Gentile, A., La Malfa, S., & Distefano, G., 2023. Sweet Orange: Evolution, Characterization, Varieties, and Breeding Perspectives. *Agriculture*, 13(2), 264. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020264>

Serna-Escolano, V., Martínez-Romero, D., Giménez, M. J., Serrano, M., García-Martínez, S., Valero, D., Valverde, J. M., & Zapata, P. J., 2021. Enhancing antioxidant systems by preharvest treatments with methyl jasmonate and salicylic acid leads to maintain lemon quality during cold storage. *Food Chemistry*, 338, 128044. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128044>

Serna-Escolano, V., Valverde, J. M., García-Pastor, M. E., Valero, D., Castillo, S., Guillén, F., Martínez-Romero, D., Zapata, P. J., & Serrano, M., 2019. Pre-harvest methyl jasmonate treatments increase antioxidant systems in lemon fruit without affecting yield or other fruit quality parameters. *Journal Of The Science Of Food And Agriculture*, 99(11), 5035-5043. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9746>

Shu, C., Zhang, W., Zhao, H., Cao, J., & Jiang, W., 2020. Chlorogenic acid treatment alleviates the adverse physiological responses of vibration injury in apple fruit through the regulation of energy metabolism. *Postharvest Biology and Technology*, 159, 110997. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110997>

Xi, Y., Cheng, D., Zeng, X., Cao, J., & Jiang, W., 2016. Evidences for Chlorogenic Acid — A Major Endogenous Polyphenol Involved in Regulation of Ripening and Senescence of Apple Fruit. *PloS One*, 11(1), e0146940. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146940>

Xi, Y., Jiao, W., & Cao, J., 2017. Effects of chlorogenic acid on capacity of free radicals scavenging and proteomic changes in postharvest fruit of nectarine. *PLoS ONE*, 12(8), e0182494. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182494>

Xi, Y., Fan, X., Zhao, H., Li, X., Cao, J., & Jiang, W., 2017. Postharvest fruit quality and antioxidants of nectarine fruit as influenced by chlorogenic acid. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie/Food Science & Technology*, 75, 537-544. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.10.004>

Zhao, J., Ao, M., He, X., Li, W., Deng, L., Zeng, K., & Ming, J., 2022. Changes in phenolic content, composition, and antioxidant activity of blood oranges during cold and on-tree storage. *Journal Of Integrative Agriculture/Journal Of Integrative Agriculture*, 21(12), 3669-3683. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.09.011>

Efecto del tratamiento precosecha de sorbitol sobre la calidad de *Prunus persica* (L). Batsch durante su periodo de conservación postcosecha

A. Solana-Guilabert¹, A. Guirao¹, H. M. Díaz-Mula¹, J. M. Valverde¹ y D. Martínez-Romero¹

¹ Instituto de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO), Universidad Miguel Hernández, Ctra. Beniel km. 3.2, 03312, Orihuela, España, e-mail: asolana@umh.es

Resumen

La nectarina, *Prunus persica* (L). Batsch cv ‘Garcima’, es una subespecie de melocotón cultivada y consumida en todo el mundo la cual presenta una piel suave debido a la falta de tricomas y que exhibe sutiles variaciones en cuanto a sabor y tamaño en comparación con el melocotón. La nectarina contiene una gran variedad de compuestos nutricionalmente destacables que promueven la salud, entre los que destacan la fibra dietética, cantidades significativas de vitamina C y β -caroteno y un alto contenido de polifenoles. Entre los parámetros de calidad de los frutos que logran una mayor aceptación por parte de los consumidores se encuentran los sólidos solubles, la acidez y la firmeza, factores de calidad que podrían verse mejorados y preservados a lo largo de la conservación del fruto gracias a la aplicación de sorbitol exógeno durante la precosecha, lo que constituye el objetivo de este estudio. El sorbitol es el principal fotosintato de los árboles frutales de la familia *Rosaceae*, y se trata de una forma reducida de la glucosa. Se ha observado el efecto osmoprotector del sorbitol, el cual mejora la tolerancia al estrés de las plantas, y la estrecha relación entre el contenido de minerales con la presencia y distribución de sorbitol dentro de la planta. Se aplicaron tratamientos en campo mediante pulverización foliar con una solución de sorbitol en una concentración al 2% en tres estados diferentes de crecimiento del fruto, (E1) tras el cuajado del fruto, (E2) en el momento del viraje y (E3) 15 días antes de la recolección, y los frutos tratados y control se almacenaron a 2°C y 95% de humedad relativa durante 30 días. El tratamiento con sorbitol dio lugar a mejoras significativas en parámetros de calidad clave como la pérdida de peso, la firmeza o la tasa de respiración, observándose mejores resultados para los frutos que recibieron el tratamiento en los estados E2 y E3.

Palabras clave: nectarina, polialcoholes, almacenamiento, maduración, fotosintato

Role of pre-harvest sorbitol treatment on the quality of *Prunus persica* (L). Batsch during its post-harvest conservation

Abstract

Nectarine, *Prunus persica* (L). Batsch cv ‘Garcima’, is a subspecies of peach cultivated and consumed throughout the world which has a soft skin due to the lack of trichomes and which exhibits subtle variations in flavor and size compared to peaches. Nectarine contains a wide variety of nutritionally remarkable compounds that promote health, among which dietary fiber, significant amounts of vitamin C and β -carotene, and a high content of polyphenols stand out. Among the quality parameters of the fruits that achieve greater acceptance by consumers are soluble solids, acidity and firmness, quality factors that could be improved and preserved throughout the conservation of the fruit thanks to the application of exogenous sorbitol during preharvest, which constitutes the objective of this study. Sorbitol is the main photosynthate of fruit trees of the *Rosaceae* family, and it's a reduced form of glucose. The osmoprotective effect of sorbitol has been observed, which improves the stress tolerance of plants, and the close relationship between the mineral content and the presence and distribution of sorbitol within the plant. Treatments were applied by foliar spraying with a 2% sorbitol concentration solution in three different states of fruit growth, (E1) after fruit setting, (E2) at the time of color turning and (E3) 15 days before harvesting, and the treated and control fruits were stored at 2°C and 95% relative humidity for 30 days. Sorbitol treatment led to significant improvements in key quality parameters such as weight loss, firmness or respiration rate, with better results observed for fruits that received the treatment in states E2 and E3.

Keywords: nectarine, polyalcohols, storage, ripening, photosynthate

Introducción

La nectarina (*Prunus persica* (L.) Batsch cv. ‘Garcima’), tiene su origen en el mismo árbol que el melocotón, *Prunus persica* L., de la familia de las rosáceas, siendo una subespecie que se cultiva y se consume en todo el mundo (Konopacka et al., 2010), tratándose del tercer cultivo frutal económicamente más importante tras las manzanas y las peras (Weisskopf y Fuller, 2020). La producción mundial supera los 24,2 millones de toneladas, siendo China, Italia, Estado Unidos, España y Grecia los principales productores (USDA, 2023). Se trata de una fruta de hueso típica, compuesta por una semilla en un hueso duro (endocarpio), una pulpa blanda y carnosa que rodea el hueso (mesocarpio), y la superficie recubierta por una piel relativamente fina (epicarpio) (Blattný, 2003; Pande et al., 2017). La mayoría de frutas de hueso de clima templado pertenecen al género *Prunus*, son frutas climatéricas y, debido a su naturaleza altamente perecedera, una gran cantidad de estas se desperdicia.

La nectarina presenta una variedad de componentes nutricionalmente importantes que promueven la salud, entre los que se incluyen la fibra dietética, cantidades significativas de vitamina C y β -carotenos, y altos contenidos de polifenoles y antocianinas, siendo estos últimos los que presentan una mayor contribución a la actividad antioxidante (Gil et al., 2002), y habiendo sido reportada, especialmente en el caso de antocianinas y antocianidinas, su influencia en la inhibición de la carcinogénesis química (Hou, 2003). La reducción de los niveles de enfermedades cardiovasculares también se asocia con el consumo de alimentos vegetales ricos en flavonoides y otros compuestos fenólicos.

Estudios demuestran que el ácido clorogénico es el principal derivado hidroxicinámico de las nectarinas. En cuanto a los flavanoles, destaca la catequina, con cantidades menores de epicatequina, galocatequina y epigalocatequina. Respecto a los pigmentos de antocianina, sólo se encontraron cianidina-3-glucósido y 3-rutinósido. Estos compuestos se encontraron, principalmente, en la piel de las nectarinas. (Tomás-Barberán et al., 2001).

La calidad de los frutos es determinante de cara a su comercialización. En las frutas de hueso de clima templado, entre los criterios de calidad principales destacan su apariencia, color, tamaño, textura, aroma y composición interna (azúcares, fenoles...). El tamaño de la fruta de hueso es muy variable y depende de la temperatura, mientras que la nutrición mineral determina los niveles de fotosintatos, azúcares, ácidos y otros compuestos (Mir et al., 2021). La calidad no se puede mejorar tras la cosecha, pero se puede conservar. La tendencia en la demanda de los consumidores va enfocada a la mayor preservación de la calidad de los frutos durante su conservación.

El sorbitol es un polialcohol que se encarga de una serie de funciones determinantes para la supervivencia de las plantas. Principalmente se produce en los órdenes rosales y lamiales, destacando el género *Prunus* como mayores productores de sorbitol. Es un fotosintato primario que puede formarse de manera reversible a partir de glucosa-6-fosfato, glucosa o fructosa, siendo transportado por el floema y pudiendo almacenarse para su posterior uso. Su papel es importante en plantas expuestas a estreses abióticos y bióticos (Pleyerová et al., 2022).

Los datos sugieren que el sorbitol desempeña un papel importante en la mitigación del estrés abiótico, principalmente a la tolerancia a bajas temperaturas, la sequía y el estrés salino. Además, se conoce que los polialcoholes pueden formar compuestos estables con otros metabolitos, facilitando así su transporte a través del floema. Esto ha sido determinado para minerales, los cuales tienen baja movilidad por el floema (Guirao et al., 2024).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es determinar la influencia del sorbitol al 2%, aplicado en 3 estados fenológicos del fruto diferentes, en los parámetros de calidad de las nectarinas durante su conservación en postcosecha.

Materiales y Métodos

Diseño experimental

El material vegetal utilizado para este proyecto fue la nectarina (*Prunus persica* (L.) Batsch cv. 'Garcima'), recolectadas en su momento de maduración comercial. Se realizaron 6 tratamientos con una solución de sorbitol a una concentración del 2%, aplicando 2 L de la solución a cada árbol mediante un rociador mecánico por pulverización foliar en 3 estados fenológicos del fruto: E1 (tras el cuajado del fruto), E2 (en el momento del viraje) y E3 (15 días antes de la recolección), como se observa en la figura 1. Se seleccionaron 4 filas de árboles y se distribuyeron según se observa en la figura 1, dejando una fila como control tratada con agua, mientras que al resto de filas se les aplicó la solución en el estado fenológico indicado y hasta la recolección, realizando 2 tratamientos por estado.

Una vez recolectados los frutos, se seleccionaron aquellos que no presentaban desórdenes fisiológicos o podredumbres, y se conservaron 45 frutos por tratamiento, dividiéndose en 3 lotes de tres repeticiones de 5 frutos, los cuales correspondían con los análisis determinados para el día 0, M1 y M2. Estos lotes se conservaron a 2°C y, cada 7 días, con un periodo de vida útil de 2 días a 20°C, se realizó un muestreo en el que se llevaron a cabo las determinaciones analíticas que se comentan a continuación. Todos los resultados se indicaron como la media \pm ES de las tres repeticiones de cinco frutos.

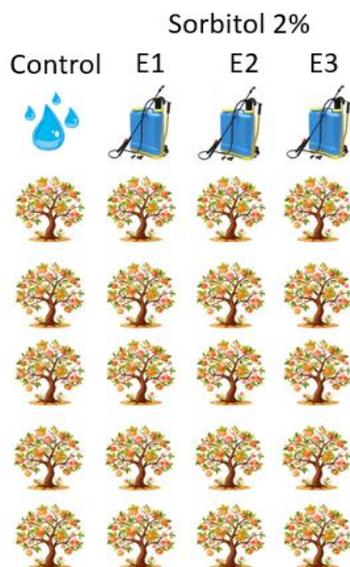


Figura 1. Diseño experimental

Pérdida de peso y firmeza

Se registró el peso individual de todas las nectarinas que se conservaron durante el día 0 para poder realizar una comparación los días determinados de muestreo. Las pérdidas de peso acumuladas durante la conservación se han expresado como el porcentaje de pérdida de peso con respecto al anotado el día 0.

Se determinó la firmeza individual de cada nectarina mediante el uso de un analizador de textura TX-XT2i (Stable mycosystems, Godalming, Reino Unido), el cual se programó para aplicar la fuerza necesaria hasta alcanzar una deformación del 5% del diámetro de la nectarina. Los resultados se representaron como la relación existente entre la fuerza aplicada y la distancia recorrida ($N\ mm^{-1}$).

Color externo

Se analizó el color externo de los frutos mediante el uso de un colorímetro Minolta (CRC200, Minolta Camera Co., Kanto, Tokio, Japón) y se expresó como Hue ($\arctg\ b^*/a^*$) según las coordenadas del espacio de color CIELab. Se realizaron medidas en 3 puntos diferentes del perímetro del fruto.

Tasa de respiración

Se depositaron 4 nectarinas de cada repetición en un recipiente cerrado herméticamente con un volumen de 3.7 L durante 1 hora. Transcurrido este tiempo, se recogieron muestras de 1 mL de la atmósfera del interior del recipiente mediante jeringas para posteriormente medir por duplicado la tasa de respiración ($\text{mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ de CO_2) mediante un cromatógrafo de gases Shimadzu CG-14B, que contaba con un detector de conductividad térmica y una columna Chromosorb 102 80/100 de 2 m por 1/8 de pulgada.

Sólidos solubles totales, acidez total e índice de maduración

Finalizados los análisis no destructivos del fruto, se procedió a extraer zumo de las nectarinas mediante un paño de algodón. Se evaluaron por duplicado los sólidos solubles totales (SST) a 20°C mediante un refractómetro digital (Atago PR-101, Atago Co. Ltd., Tokio, Japón), y se indicó por °Brix ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$ de SST en peso fresco). Por su parte, se determinó la acidez total (AT), también por duplicado, diluyendo 1 mL de zumo a 25 mL de agua destilada, y se tituló a pH 8.1 mediante un titulador automático (785 DMP Titrino, Metrohm) con NaOH 0.1 N. Los resultados se expresaron como $\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$ equivalentes de ácido málico en peso fresco. El índice de maduración (IM) se derivó como la relación entre SST y AT.

Análisis estadístico

Los datos se sometieron a un ANOVA de dos vías para evaluar los efectos del tratamiento, las variaciones temporales y sus interacciones en cada experimento. Posteriormente, se empleó la prueba de Tukey para detectar diferencias significativas entre los tratamientos y en diferentes puntos temporales. La significancia estadística se determinó en $p < 0.05$. Los resultados se presentan como medias \pm error estándar (ES) en base a tres réplicas. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando SigmaPlot para Windows versión 11.0.

Resultados y Discusión

De acuerdo con lo ya comentado en el diseño experimental del proyecto, las nectarinas recolectadas en estado de madurez comercial se seleccionaron y se conservaron a 2°C durante 30 días, realizándose un análisis de los parámetros de calidad el día de la recolección y cada 7 días, previo un periodo de vida útil de 2 días a 20°C.

Los resultados obtenidos para los diferentes análisis realizados son los que se indican en la Tabla 1. Dicha tabla permite comparar los resultados en función del tiempo de almacenamiento, del tratamiento aplicado y del estado fenológico del fruto en el que se aplicó dicho tratamiento.

La tendencia por parte del consumidor respecto a productos frescos se dirige hacia la exigencia de mayor calidad de los frutos, así como la conservación de esta calidad durante el mayor tiempo posible. Las nectarinas presentan un alto contenido de agua durante su etapa temprana de postcosecha, y debido a la transpiración y al metabolismo respiratorio, las plantas pierden agua gradualmente, marchitándose y afectando a su apariencia, calidad y sabor (Lan et al., 2024). Por lo tanto, reducir la pérdida de agua durante el almacenamiento y conservación de las nectarinas se presenta como un aspecto crucial para garantizar su calidad.

Las nectarinas conservadas en los lotes se pesaron el día de la recolección y los días de muestreo indicados, permitiendo determinar el porcentaje de peso perdido. Como se pudo observar en el primer muestreo, las diferencias no fueron prácticamente apreciables. Sin embargo, a los 14 días de conservación, se encontraron diferencias estadísticamente significativas, obteniéndose una mayor pérdida de peso en los frutos control ($8,51 \pm 0,47 \%$), mientras que el tratamiento aplicado a partir de E2 fue el que dio lugar a una menor pérdida de peso ($5,67 \pm 0,3 \%$). Todos los tratamientos presentaron resultados favorables en cuanto a la reducción de la pérdida de peso se refiere.

La firmeza es un factor importante de cara a la calidad y la comercialización de estos frutos. El ablandamiento es un índice de madurez que se produce en los tejidos debido a la actividad de algunas

enzimas que alteran los componentes estructurales de la pared celular, disminuyendo la adherencia de las células. El día de la recolección se pudo observar como los tratamientos aplicados para los estados E1 y E2 presentaron valores de firmeza superiores ($26,58 \pm 1,08 \text{ N mm}^{-1}$ y $24,59 \pm 1,19 \text{ N mm}^{-1}$) a los frutos control ($22,15 \pm 0,78 \text{ N mm}^{-1}$). Durante los 14 días de conservación, se siguieron observando valores superiores de firmeza para los frutos tratados, aunque estos resultados no fueron estadísticamente significativos.

Estudios como el realizado por Kim et al. (2014) analizaron la influencia de tratamientos con sorbitol 0,5 mM y 1 mM, solos o en combinación con ácido salicílico, observando aumentos en la firmeza, entre otros parámetros de calidad, lo que refuerza los resultados obtenidos.

Según la literatura, los frutos del género *Prunus* contienen diferentes tipos de azúcares solubles y polialcoholes, siendo la sacarosa el principal azúcar en la pulpa del melocotón en su madurez, seguido de fructosa, glucosa y sorbitol (Petruccelli et al., 2023). Por su parte, los ácidos orgánicos mayoritarios que podemos encontrar son el málico y el cítrico (Colarič et al., 2004).

Estudios previos sobre la aplicación de tratamientos precosecha basados en sorbitol o en complejos de sorbitol con calcio, han dado lugar a mejoras en el contenido de SST e IM en frutas como el mango (Talang et al., 2016), tomate (Kim et al., 2014) y uva de vino (Ma et al., 2022), teorizándose que podría deberse a la capacidad de los polialcoholes como el sorbitol de facilitar el transporte de nutrientes a los tejidos de las plantas (Guirao et al., 2024), aunque todos estos estudios se realizaron en géneros habitualmente no productores de sorbitol. Sin embargo, prácticamente no se observaron diferencias entre los tratamientos y los controles en este aspecto, alcanzándose el máximo contenido en SST durante el M2 para las nectarinas control ($11,44 \pm 0,15 \text{ °Brix}$) y E3 ($11,07 \pm 0,1 \text{ °Brix}$), y observándose un mayor IM para las nectarinas control durante el M2 ($9,59 \pm 0,24$).

De manera similar, los niveles de AT no fueron prácticamente alterados por los tratamientos, observándose los mayores valores de acidez para los controles en el M1 ($1,42 \pm 0,01 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ equivalente de ácido málico), y el menor valor también para los frutos control, pero en este caso durante el M2 ($1,2 \pm 0,02 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$ equivalente de ácido málico).

Respecto a la tasa de respiración, un incremento de esta constituye un aumento en el metabolismo de la planta, traduciéndose en un descenso en la vida útil. El día de la recolección no se observaron diferencias significativas en la tasa de respiración de los frutos control y tratados, sin embargo, tras su conservación, se apreció un constante aumento de la tasa de respiración con el tiempo.

A los 7 días de conservación, en el M1, destacó la influencia de los tratamientos en E1 y E2 con valores más bajos de respiración, $38,69 \pm 0,79 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ y $39,1 \pm 0,75 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$, respectivamente, en comparación con los observados para los controles ($48,96 \pm 1,85 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Por su parte, fueron los frutos tratados hasta E3 los que dieron una menor tasa respiratoria durante el M2 ($48,8 \pm 1,45 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$) en comparación con el control ($54,63 \pm 1,5 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$).

Finalmente, se llevó a cabo el análisis del color externo de las nectarinas en diferentes puntos de la piel del fruto. Es un factor interesante debido a que las antocianinas son los principales compuestos de color en muchas frutas rojas, moradas y azules, incluidos melocotones y nectarinas, y desempeñan un papel importante en la determinación de la aceptación de los consumidores.

Analizando el ángulo Hue obtenido, menores grados indican colores más rojos. Los valores más bajos de ángulo Hue que se observaron fueron, en M1, para los frutos E2 ($47,56 \pm 3,34 \text{ °}$) y E3 ($49,72 \pm 3,87 \text{ °}$) en comparación con el control ($55,94 \pm 3,05 \text{ °}$), y de igual manera en M2 siendo E2 ($47,72 \pm 3,08 \text{ °}$) y E3 ($49,87 \pm 4,53 \text{ °}$) en comparación con el control ($53 \pm 3,63 \text{ °}$). Sin embargo, los resultados no fueron estadísticamente significativos, por lo que no podemos asegurar que el incremento en la coloración roja de los frutos se deba a un aumento en las antocianinas y carotenoides y no sea debido al azar.

Tabla 1. *Parámetros de calidad de las nectarinas analizados durante los muestreos programados. Los datos se expresaron como la media \pm ES de 5 muestras para cada réplica y tratamiento. Las letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos en el mismo día de muestreo, mientras que las letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre muestras del mismo tratamiento en diferentes días de almacenamiento.*

	Control			Sor 2%			Control			Sor 2%			
	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2	E3	
	D0						M1			M2			
Pérdida peso (%)						2.61 \pm 0.2 aB	2.03 \pm 0.11 aB	2.13 \pm 0.14 aB	3 \pm 0.2 aB	8.51 \pm 0.47 aA	7.12 \pm 0.36 bA	5.67 \pm 0.3 cA	6.19 \pm 0.2 bcA
Firmeza (N mm⁻¹)	22.15 \pm 0.78 bA	26.58 \pm 1.08 aA	24.59 \pm 1.19 abA	21.93 \pm 0.86 bA	10.81 \pm 0.81 aB	12.06 \pm 0.48 aB	12.54 \pm 0.39 aB	11.93 \pm 0.58 aB	6.40 \pm 0.39 aC	7.38 \pm 0.35 aC	7.68 \pm 0.29 aC	8.22 \pm 0.39 aC	
Acidez (g 100 g⁻¹)	1.26 \pm 0.00 aB	1.31 \pm 0.01 aB	1.26 \pm 0.01 aB	1.27 \pm 0.01 aAB	1.42 \pm 0.01 aA	1.37 \pm 0.01 abA	1.37 \pm 0.01 abA	1.32 \pm 0.01 bA	1.20 \pm 0.02 bC	1.27 \pm 0.03 aB	1.23 \pm 0.02 abB	1.24 \pm 0.02 abB	
SST (° Brix)	9.64 \pm 0.06 aC	9.83 \pm 0.11 aC	9.7 \pm 0.08 aC	9.97 \pm 0.1 aB	10.89 \pm 0.11 aB	10.37 \pm 0.12 bB	10.11 \pm 0.02 bB	10.97 \pm 0.07 aA	11.44 \pm 0.15 aA	11.2 \pm 0.2 abA	10.87 \pm 0.11 bA	11.07 \pm 0.1 abA	
IM	7.64 \pm 0.03 aB	7.52 \pm 0.08 aB	7.69 \pm 0.03 aB	7.84 \pm 0.07 aA	7.59 \pm 0.05 bB	7.55 \pm 0.12 bB	7.39 \pm 0.05 bB	8.28 \pm 0.04 aA	9.59 \pm 0.24 aA	8.67 \pm 0.11 bA	8.85 \pm 0.25 bA	9 \pm 0.24 bB	
Tasa respiración (mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹)	39.23 \pm 2.85 aC	40.51 \pm 2.73 aB	36.52 \pm 2.74 aB	38.05 \pm 2.16 aB	48.96 \pm 1.85 aB	38.69 \pm 0.79 bB	39.1 \pm 0.75 bB	43.32 \pm 1.31 abAB	54.63 \pm 1.5 aA	56.63 \pm 1.96 aA	52.89 \pm 1.38 abA	48.8 \pm 1.45 bA	
Color externo (° Hue)	53.49 \pm 2.93 aA	56.78 \pm 3.27 aA	57.39 \pm 3.42 aA	54.9 \pm 3.44 aA	55.94 \pm 3.05 aA	51.28 \pm 4.25 aA	47.56 \pm 3.34 aA	49.72 \pm 3.87 aA	53 \pm 3.63 aA	54.92 \pm 3.37 aA	47.72 \pm 3.08 aA	49.87 \pm 4.53 aA	

Conclusiones

Este trabajo muestra como los tratamientos en precosecha con sorbitol a una concentración del 2%, y aplicado en diferentes momentos clave de la maduración del fruto (tras el cuajado del fruto, en el momento del viraje, y 15 días antes de la recolección), redujeron las pérdidas de peso y la tasa de respiración, y aumentaron la firmeza de las nectarinas. Estos parámetros de calidad son determinantes ya que cumplen con las exigencias principales de los consumidores, un fruto de mayor calidad en el momento de la compra, y que sea capaz de prolongar esta calidad durante su conservación. El descenso observado en la tasa de respiración conlleva un descenso en la actividad metabólica de los frutos, lo que a su vez da lugar a un aumento en la vida útil de estos. Por su parte, el descenso observado en las pérdidas de peso, además de un aumento en la firmeza de los frutos, supone una mejora en la calidad de las nectarinas, especialmente al tratarse de frutos que tienden a reblandecerse con facilidad. Finalmente, se puede concluir que el momento de aplicación de los tratamientos es un factor importante, observándose los mejores resultados para los frutos tratados a partir de E2 y E3.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del trabajo de investigación PID2022-137282OB-I00 financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.

Los autores agradecen a la Generalitat Valenciana, Conselleria de Educación, Universidad y Empleo por las becas de doctorado de Alberto Guirao Carrascosa (CIACIF/2022/270) para realizar estudios de doctorado y al Fondo Social Europeo por la cofinanciación de dichas becas.

Bibliografía

- Colarič, M., ŠTAMPAR, F., & Hudina, M. (2004). Contents of sugars and organic acids in the cultivars of peach (*Prunus persica* L.) and nectarine (*Prunus persica* var. *nucipersica* Schneid.). *Acta agriculturae slovenica*, 83(1), 53-61.
- Gil, M. I., Tomás-Barberán, F. A., Hess-Pierce, B., & Kader, A. A. (2002). Antioxidant capacities, phenolic compounds, carotenoids, and vitamin C contents of nectarine, peach, and plum cultivars from California. *Journal of agricultural and food chemistry*, 50(17), 4976-4982.
- Guirao, A., Valverde, J. M., Díaz-Mula, H. M., Valero, D., Serrano, M., & Martínez-Romero, D. (2024). Role of Pre-Harvest Sorbitol–Calcium Treatments in Controlling Berry Drop in Bagged Table Grapes of the “Doña María” Variety. *Horticulturae*, 10(7), 698.
- Hou, D. X. (2003). Potential mechanisms of cancer chemoprevention by anthocyanins. *Current molecular medicine*, 3(2), 149-159.
- Kim, J. T., Kim, Y. H., Choi, J. S., & Lee, I. J. (2014). Effect of sorbitol and salicylic acid on quality and functional food contents of tomato fruit (*Solanum lycopersicum*). *Horticultural Science & Technology*, 32(6), 771-780.
- Konopacka, D., Jesionkowska, K., Kruczyńska, D., Stehr, R., Schoorl, F., Buehler, A., ... & Bonany, J. (2010). Apple and peach consumption habits across European countries. *Appetite*, 55(3), 478-483.
- Lan, Y., Liu, Y., Li, X., & Wu, S. (2024). Fucoïdan-based coatings extend the shelf-life of nectarines. *Food Chemistry: X*, 22, 101479.
- Ma, T., Hui, Y., Zhang, L., Su, B., & Wang, R. (2022). Foliar application of chelated sugar alcohol calcium fertilizer for regulating the growth and quality of wine grapes. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 15(3), 153-158.
- Mir, M. M., Iqbal, U., & Mir, S. A. (Eds.). (2021). *Production technology of stone fruits*. Springer Singapore.

Pande, K. K., Dimri, D. C., Rao, V. K., Lal, S., Uniyal, S. P., & Pal, R. S. (2017). Response of different nitrogen regimes through neem coated urea and calcium sprays on bio-chemical attributes and antioxidant activities of peach. *International Journal of Chemical Studies*, 5, 1528-1534.

Petrucelli, R., Bonetti, A., Ciaccheri, L., Ieri, F., Ganino, T., & Faraloni, C. (2023). Evaluation of the fruit quality and phytochemical compounds in peach and nectarine cultivars. *Plants*, 12(8), 1618.

Pleyerová, I., Hamet, J., Konrádová, H., & Lipavská, H. (2022). Versatile roles of sorbitol in higher plants: luxury resource, effective defender or something else?. *Planta*, 256(1), 13.

Talang, H. D., Dutta, P., Mukhim, C., & Patil, S. (2016). Effect of calcium, boron and sorbitol on fruit-set, yield and quality in mango cv. Himsagar. *Journal of Horticultural Sciences*, 11(2), 166-169.

Tomás-Barberán, F. A., Gil, M. I., Cremin, P., Waterhouse, A. L., Hess-Pierce, B., & Kader, A. A. (2001). HPLC– DAD– ESIMS analysis of phenolic compounds in nectarines, peaches, and plums. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(10), 4748-4760.

U.S. Department of Agriculture, 2023. Peaches and Nectarines: Global Growth in Production Slowing While Exports Plateau. <https://fas.usda.gov/data/peaches-and-nectarines-global-growth-production-slowing-while-exports-plateau> (accessed 4 September 2024).

Weisskopf, A., & Fuller, D. Q. (2020). Peach: Origins and development. In *Encyclopedia of global archaeology* (pp. 8459-8461). Cham: Springer International Publishing.

Efecto de los tratamientos pre-cosecha con ácido cítrico en la calidad postcosecha de los pomelos ‘Star ruby’

J. A. Espinosa¹, V. Serna-Escolano¹ y P. J. Zapata¹

¹ Dept. Tecnología Agroalimentaria. EPSO, Universidad Miguel Hernández. Ctra. Beniel km 3.2, 03312 Orihuela, Alicante.

Resumen

El pomelo es un fruto que presenta una vida útil prolongada, por lo tanto, las pérdidas de calidad durante esta etapa son frecuentes. El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de los tratamientos pre-cosecha con ácido cítrico (0.1, 0.5 y 1 %) en la calidad de pomelos ‘Star ruby’ almacenados durante 45 días a 10 °C. Para ello, se realizaron 3 aplicaciones con ácido cítrico (AC) previas a la recolección utilizando un sistema de pulverización foliar, dejando a su vez árboles control que fueron tratados solamente con agua. Durante la realización del experimento se determinaron las pérdidas de peso (PP), tasa de respiración (TR), firmeza, color, sólidos solubles totales (SST) y acidez titulable (AT). Los resultados no mostraron diferencias significativas en las pérdidas de peso ni en el color de los frutos tratados con AC con respecto a los frutos control durante el almacenamiento refrigerado. En cuanto a la firmeza y los SST, los frutos tratados con AC 1% mostraron unos valores superiores a los frutos control, y, además, los frutos tratados con AC 0.1, 0.5 y 1 % mostraron una mayor AT y una menor TR que los frutos sin tratamientos en el momento de la recolección y tras 45 días de almacenamiento refrigerado. Por lo tanto, los tratamientos con AC al 1% podrían ser una alternativa innovadora para mejorar la calidad postcosecha de los pomelos.

Palabras clave: pomelo, ácido cítrico, pre-cosecha, postcosecha, calidad.

Effect of pre-harvest treatments with citric acid on the post-harvest quality of ‘Star ruby’ grapefruit

Abstract

Grapefruit is a fruit with a long shelf life, therefore, quality losses during this stage are frequent. The objective of this work was to determine the effect of pre-harvest treatments with citric acid (0.1, 0.5 and 1%) on the quality of ‘Star ruby’ grapefruit stored for 45 days at 10 °C. For this purpose, 3 applications with citric acid (CA) were made prior to harvest using a foliar spray system and as control, trees were treated with water. During the experiment, weight loss (WL), respiration rate (RR), firmness, color, total soluble solids (TSS) and titratable acidity (TA) were measured. The results showed no significant differences in weight loss and color of fruits treated with CA compared to control fruits during refrigerated storage. Regarding firmness and TSS, fruits treated with 1% AC showed higher values than control fruits, and, in addition, fruits treated with 0.1, 0.5 and 1% AC showed higher AT and lower TR than untreated fruits at harvest and after 45 days of refrigerated storage. Therefore, treatments with 1% AC could be an innovative alternative to improve the quality of grapefruit in post-harvest.

Keywords: grapefruit, citric acid, pre-harvest, post-harvest, quality.

Introducción

El pomelo no es probablemente una verdadera especie sino un híbrido de pummelo y naranjo dulce. El pomelo es uno de los pocos cítricos que se originaron en el Nuevo Mundo (Soler-Aznar, 2019). De entre la familia de los cítricos, su producción e importancia se encuentra por debajo de la naranja, mandarina y limón. España es el octavo productor mundial, produciendo la décima parte que el mayor productor que es Estados Unidos. Sin embargo, España es el segundo proveedor en la Unión Europea en importancia, representado el 20% del pomelo consumido en este continente. Por ello, surge la

necesidad de tener un producto con las mejores características organolépticas que satisfaga las demandas de los consumidores (AILIMPO, 2018).

El Pomelo es consumido mayoritariamente como fruta fresca, aunque también tiene importancia a nivel industrial, sobre todo para la obtención de zumo. Entre los productores y consumidores, el pomelo es considerado como una fruta gourmet, por lo que debe ser comercializado con unas excelentes propiedades físico-químicas y funcionales, las cuales se obtienen en el momento de la recolección y deben mantenerse durante el periodo de comercialización. El uso de la refrigeración es una herramienta muy utilizada en la postcosecha de frutas y hortalizas; sin embargo, la susceptibilidad de los cítricos a sufrir daños por frío hace que la temperatura de conservación y transporte no deba ser inferior a 8°C.

Los componentes de calidad más apreciados por los consumidores son el tamaño y la turgencia del fruto. Su forma oval y tamaño tienen una gran importancia en las pérdidas de peso, ya que es un fruto con una relativa baja relación entre la superficie y el volumen, lo que hace que estas no sean un gran problema postcosecha. Estas pérdidas de peso están estrechamente relacionadas con la firmeza, ya que junto con el mantenimiento de las estructuras vegetales le aportan su firmeza característica, la cual está relacionada junto con el color, con la frescura del fruto. Otro de los factores claves que afectan a las pérdidas de peso es la tasa de respiración, ya que con el aumento de la intensidad es necesario llevar a cabo una apertura estomática mayor, lo que provoca una mayor deshidratación en los vegetales. Por otro lado, la tasa de respiración es un indicador del metabolismo del pomelo, el cual en postcosecha es necesario que sea lo más lento posible, de forma que se prolongue la vida útil del mismo. En este sentido, el contenido en sólidos solubles totales y acidez titulable es clave por dos motivos, porque condicionan el sabor de la fruta y el zumo, y porque son utilizados como sustratos del mantenimiento del metabolismo en postcosecha. El ácido que destaca en los pomelos es el ácido cítrico, aunque su perfil también presenta ácido málico, oxálico, tartárico y ascórbico, este último conocido como vitamina C, uno de los compuestos beneficiosos para la salud que se le atribuyen al pomelo. Por otro lado, los principales azúcares presentes en el pomelo, fructosa, glucosa y sacarosa, determinan de forma significativa el sabor final de la fruta, aportando dulzor. Del mismo modo, esta fruta destaca por un intenso perfil aromático que le confiere un sabor característico, el cual se va perdiendo a medida que avanza la senescencia.

El ácido cítrico es un compuesto importante que forma parte de los ácidos orgánicos que son metabolizados endógenamente por las plantas, y acumulados como sustancias de reserva en las plantas. En la actualidad, se estudia ampliamente por sus propiedades y es un compuesto bioactivo que se utiliza como suplemento dietético y conservante de alimentos. Este conservante se usa como aditivo alimentario para evitar la proliferación de microorganismos, principalmente aquellos sensibles a pH bajo, por lo que también es considerado un excelente regulador de este parámetro. Algunos trabajos han puesto de manifiesto su uso como herramienta postcosecha en frutas y hortalizas solo o en combinación con otras herramientas; sin embargo, no existen escasas publicaciones sobre su aplicación como herramienta precosecha, únicamente en pera donde mostró resultados positivos (Mosa et al., 2022). Por tanto, el objetivo de este trabajo, ha sido evaluar el efecto de la aplicación de ácido cítrico como herramienta precosecha para aumentar la calidad de Pomelo 'Star Ruby' en el momento de la recolección y durante la conservación postcosecha.

Materiales y Métodos

Material vegetal y diseño experimental

Los pomelos de la variedad 'Star Ruby' fueron cultivados en condiciones comerciales en una finca localizada en el sureste de España, término municipal de Alhama. El diseño experimental se realizó con 3 bloques al azar formados por 15 árboles para cada tratamiento y variedad. Se aplicaron cuatro tratamientos diferentes, Ácido Cítrico a tres concentraciones (0.1%, 0.5% y 1%) y un tratamiento control. Para preparar el tratamiento con ácido cítrico se diluyó directamente en agua y se añadió Tween 20 al 0.5 % como mojante. Los tratamientos control contenían únicamente Tween 20 al 0.5 % y agua. Se realizaron tres aplicaciones de cada tratamiento mediante pulverización foliar en intervalos

de un mes, aplicándose el último 5 días antes de la recolección. Los frutos se recolectaron en el estado de maduración comercial y posteriormente fueron transportados al laboratorio del Grupo de PostRecolección de Frutas y Hortalizas de la Universidad Miguel Hernández de Elche. La clasificación de los pomelos se llevó a cabo visualmente en base al tamaño, color y aspecto visual, con el fin de obtener una muestra homogénea que no presentase defectos visuales. Por otro lado, 15 frutos ($n = 3$) fueron analizados en el momento de la recolección (día 0). Posteriormente, los frutos fueron almacenados a una temperatura de 8 °C y una humedad relativa del 80 %. Para las determinaciones analíticas se dividieron tres lotes de conservación (15, 30 y 45 días) [15 frutos, $n = 3$] para cada uno de los tratamientos que fueron rotulados y pesados de forma individual.

Determinaciones analíticas

Pérdida de peso y firmeza

Las pérdidas de peso se determinaron pesando los pomelos el día 0 y tras el almacenamiento refrigerado, expresando los resultados como porcentaje (%). Por otro lado, la firmeza se determinó utilizando un texturómetro (TX.XT plus Texture Analyser, UK) acoplado a una placa de acero, aplicando una fuerza de deformación de 5% del diámetro del fruto (Serna-Escolano et al., 2021), la compresión se realizó una vez por unidad experimental y los resultados se expresaron en $N\ mm^{-1}$. Los resultados obtenidos en cada una de las determinaciones fueron la media \pm error estándar (ES).

Tasa de respiración

La tasa de respiración se determinó en cada repetición para cada tratamiento (15 pomelos en total) en recipientes con una capacidad 4,6 litros. Los recipientes se cerraron y tras 60 minutos se extrajo el aire de cabeza con 3 jeringuillas de 1 mL. Posteriormente, las jeringuillas fueron utilizadas para cuantificar el CO_2 en un cromatógrafo de gases Shimadzu 14B-GC acoplado a un detector de conductividad térmica, expresando los resultados como $mg\ de\ CO_2\ kg^{-1}\ h^{-1}$ (Martínez-Esplá et al., 2018). Los resultados fueron la media \pm ES.

Sólidos solubles y acidez titulable

Se recogieron muestras de zumo de los pomelos individualmente por tratamiento y réplica. Los sólidos solubles totales (SST) se midieron por duplicado utilizando un refractómetro digital (Hanna Instruments, Rhode Island, EE. UU.). Por otro lado, la acidez titulable (AT) se determinó añadiendo 1 mL de la muestra de zumo en 25 mL de agua destilada. Se utilizó un valorador automático (OMNIS, Metrohm AG, Herisau, Suiza), el cual dosificó NaOH 0,1 mM hasta alcanzar un pH de 8,1 en la muestra. Los resultados se expresaron como °Brix para los SST y % de ácido cítrico para la AT, respectivamente. Los resultados de ambos parámetros fueron la media \pm ES.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico, se utilizó el programa SPSS v.20 para Windows (IBM, Chicago, EE. UU.). Para ello, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y se empleó el test de rango múltiple (HSD de Tukey) para comprobar el nivel de significancia ($p < 0.05$) con el fin de determinar las diferencias significativas entre tratamientos.

Resultados y Discusión

Los resultados se presentan de forma similar para todos los parámetros analizados, en ellos los datos muestran la media \pm ES. Las diferentes letras muestran las diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$) de acuerdo con un Test de Tukey, cuando no se encontraron diferencias significativas se utilizó 'ns'.

No se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los frutos control y los tratados con ácido cítrico al 0,1, 0,5 y 1 % (Figura 1). Las pérdidas de peso se incrementaron de forma lineal en todos los frutos durante el almacenamiento, alcanzando resultados próximos al 4,5% a los 45 días del almacenamiento refrigerado. La deshidratación sufrida por los frutos se encontró en valores

aceptables para su comercialización, ya que, de forma general, se considera que un fruto es comercializable cuando sus pérdidas de peso son inferiores al 6-8%, dependiendo de la especie. Los datos han mostrado, que el pomelo, y en concreto la variedad ‘Star Ruby’ no es considerada una fruta sensible a esta alteración postcosecha. Por otro lado, se observó como la aplicación de los tratamientos no afectó al estado de la fruta, ya que la pérdida de agua está relacionada con el grado de madurez de la fruta y la temperatura a la que se almacena, aunque también por el gradiente de presión de agua entre el tejido de la fruta y el ambiente circundante (Xi et al., 2017).

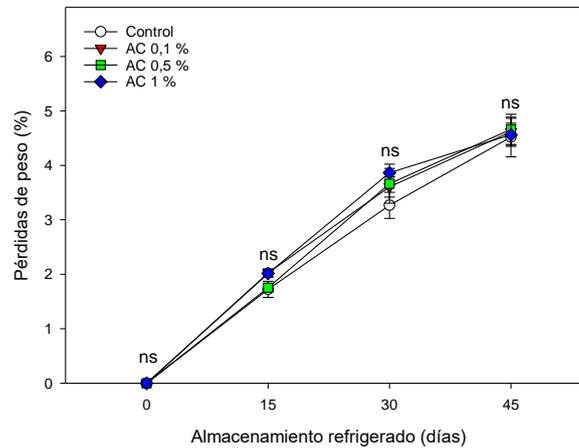


Figura 1. Efecto de los tratamientos precosecha con ácido cítrico (AC) en las pérdidas de peso de los pomelos durante el almacenamiento refrigerado.

La firmeza está directamente relacionada con la textura. El termino textura indica las propiedades que se perciben a través del sentido del tacto siendo un atributo de calidad importante que influye en los hábitos alimentarios y la preferencia del consumidor. En nuestro caso, observamos que en el momento de la recolección los frutos con mayor firmeza fueron los tratados con AC 1% y controles (8.64 ± 0.24 y 8.32 ± 0.21 N mm⁻¹, respectivamente) en comparación con las concentraciones más bajas de ácido cítrico (7.65 N mm⁻¹). Sin embargo, estas diferencias iniciales desaparecieron a partir del día 15 de almacenamiento refrigerado, disminuyendo en todos los frutos durante el almacenamiento refrigerado, con independencia del tratamiento recibido en precosecha. Al final de la conservación, 45 días en condiciones de refrigeración, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos obteniendo valores próximos a 5 N mm⁻¹ (Figura 2). La turgencia de un fruto, es decir, la firmeza que éste tiene como consecuencia del mantenimiento de su hidratación, está claramente influenciada por las pérdidas de agua, por tanto y dado los resultados obtenidos en el parámetro de las pérdidas de peso, tampoco se ha observado un efecto negativo de la aplicación de los tratamientos en la firmeza de los frutos de pomelo como consecuencia de la aplicación precosecha del ácido cítrico.

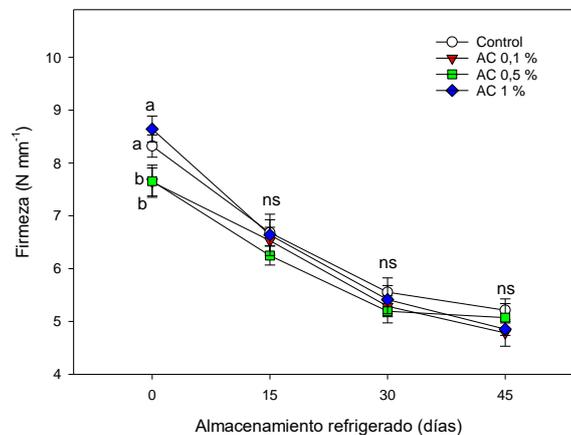


Figura 2. Efecto de los tratamientos precosecha con ácido cítrico (AC) en la firmeza de los pomelos en el momento de la recolección y durante el almacenamiento refrigerado.

La Tasa de Respiración es un indicador del metabolismo y senescencia de los frutos durante la conservación postcosecha. Los resultados mostraron en los frutos control los mayores valores en el momento de la recolección (16.11 ± 0.4 mg de CO_2 $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$), disminuyendo durante el almacenamiento refrigerado con valores de 13.38 ± 0.6 mg de CO_2 $\text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ a los 45 días de conservación (Figura 3). Respecto a los tratamientos, la tasa de respiración de los frutos tratados en el momento de la recolección fue menor que en los frutos controles, siendo los frutos con menor tasa de respiración los tratados con AC 0.1 y 0.5 %. Estas diferencias iniciales se mantuvieron durante todo el almacenamiento refrigerado hasta el final de ensayo (Figura 3). Los frutos cítricos son considerados como no climatéricos, caracterizados por una reducción progresiva en la tasa de respiración y una baja producción de etileno durante su proceso de maduración (Lado et al., 2018). Estas reducciones en la tasa de respiración muestran una reducción en el metabolismo postcosecha de los pomelos tratados con ácido cítrico durante la precosecha, lo que permitirá prolongar durante más tiempo los componentes de calidad que los frutos tienen en el momento de la recolección. Una alta tasa de respiración durante el período de almacenamiento daría como resultado un consumo excesivo de nutrientes orgánicos que llevaría al deterioro de la calidad y finalmente a la senescencia de la fruta (Ma et al., 2021).

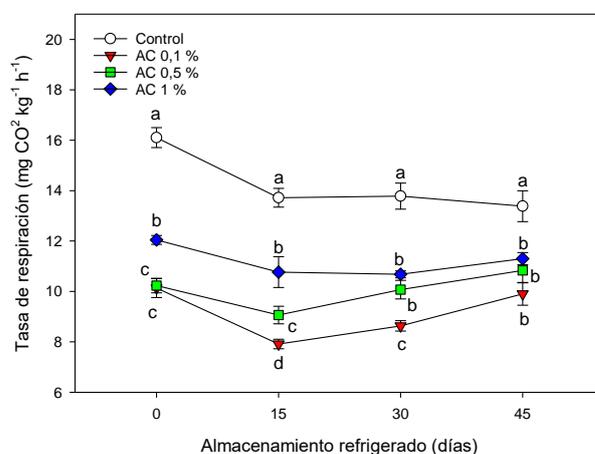


Figura 3. Efecto de los tratamientos precosecha con ácido cítrico (AC) en la tasa de respiración de los pomelos en el momento de la recolección y durante el almacenamiento refrigerado.

Durante el proceso de maduración ocurren muchos cambios en el fruto, entre otros, se producen cambios en las concentraciones de ácidos orgánicos y azúcares, así como la acumulación de compuestos volátiles. Por ello, las condiciones en las que se encuentran los vegetales previamente a la recolección van a repercutir en la calidad del fruto en la recolección y, por tanto, en el mantenimiento de la misma durante la conservación postcosecha. Los pomelos de la variedad 'Star Ruby' utilizados para este experimento presentaron una concentración de azúcares variable dependiendo del tratamiento y el tiempo de almacenamiento, desde los 12.16 ± 0.09 °Brix en los frutos tratados con AC 0.1% en el momento de la recolección, hasta 14.83 ± 0.06 °Brix en los frutos control al final del experimento. Los sólidos solubles totales (SST) incrementaron durante el almacenamiento refrigerado en todos los frutos con independencia del tratamiento. En el momento de la recolección, los frutos control y los tratados con AC 1 % mostraron los mayores SST con 14.13 ± 0.04 y 13.82 ± 0.11 °Brix, respectivamente. Por el contrario, los frutos tratados con AC 0.1 y 0.5 % mostraron los menores SST, sin diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ellos. Al final del ensayo los frutos tratados con AC 0.1 y 0.5 % mostraron un 12 y un 8 % menos sólidos solubles totales, respectivamente, que los frutos control (14.83 ± 0.05 °Brix) (Figura 4).

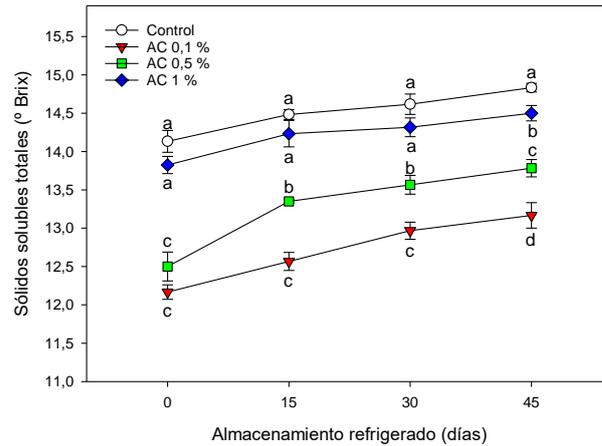


Figura 4. Efecto de los tratamientos precosecha con ácido cítrico (AC) en los sólidos solubles de los pomelos en el momento de la recolección y durante el almacenamiento refrigerado.

La acidez titulable (AT), o sumatorio de los ácidos orgánicos, es uno de los parámetros más importante en los frutos cítricos. La disponibilidad de estos compuestos en mayor concentración, permite a la fruta tener una mayor disponibilidad de sustratos para el mantenimiento del metabolismo durante el periodo de conservación, lo que permite retrasar la senescencia. Los resultados mostraron un descenso constante de la acidez titulable a lo largo del almacenamiento refrigerado en todos los tratamientos. En el momento de la recolección los valores más elevados de acidez se observaron en los frutos control ($2.59 \pm 0.02 \text{ g } 100 \text{ mL}^{-1}$), mientras que los valores más bajos se encontraron en los frutos tratados con AC 1 % ($2.34 \pm 0.03 \text{ g } 100 \text{ mL}^{-1}$), mostrando valores intermedios los frutos tratados con AC 0.1 y AC 0.5 %. Dichas diferencias se mantuvieron a lo largo del almacenamiento refrigerado hasta el final del ensayo (Figura 4). Sin embargo, fueron los frutos tratados con las concentraciones más bajas de ácido cítrico los que mostraron un menor descenso en los niveles de acidez, únicamente de $0.07 \text{ g } 100 \text{ mL}^{-1}$ para AC 0.1% y $0.11 \text{ g } 100 \text{ mL}^{-1}$ para AC 0.5%.

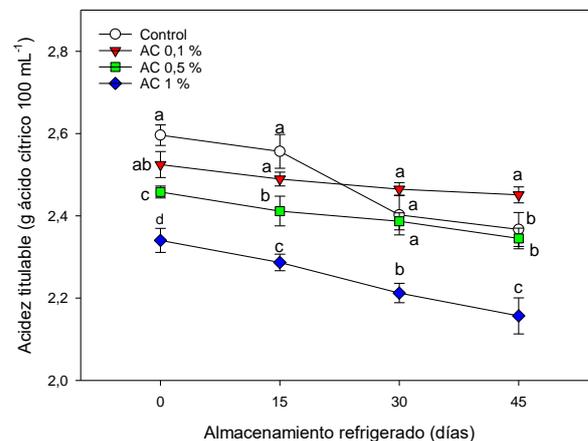


Figura 5. Efecto de los tratamientos precosecha con ácido cítrico (AC) en la acidez titulable de los pomelos en el momento de la recolección y durante el almacenamiento refrigerado.

El índice de madurez (IM) muestra la relación entre los SST y AT de los frutos, y éste fue aumentando en todos los frutos con independencia del tratamiento durante el almacenamiento refrigerado. En el momento de la recolección los frutos con el IM más elevado fueron los tratados con AC 1 % (5.9 ± 0.05) y los controles (5.44 ± 0.07), siendo los frutos con el IM más bajo los tratados en precosecha con AC 0.1% (4.81 ± 0.05) y 0.5% (5.08 ± 0.07) (Figura 5). Las diferencias se mantuvieron durante el almacenamiento refrigerado, siendo al final del ensayo los frutos con el IM mayor los tratados con AC 1 % y menor los tratados con AC 0.1 % con valores de 6.27 ± 0.14 y

5.37±0.06, respectivamente (Figura 6). Los resultados mostraron que la aplicación de AC, a bajas concentraciones, provocó un retraso de maduración en los pomelos, manteniéndose estas diferencias durante la conservación postcosecha, teniendo una mayor influencia en la disminución del IM la AT que la concentración de SST.

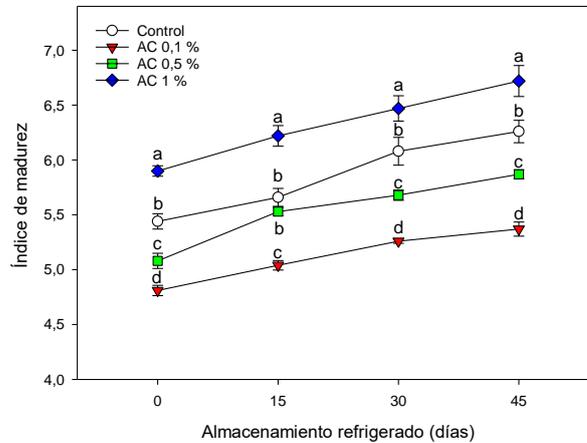


Figura 6. Efecto de los tratamientos pre cosecha con ácido cítrico (AC) en el índice de madurez de los pomelos en el momento de la recolección y durante el almacenamiento refrigerado.

Conclusiones

Los resultados presentados en este trabajo demuestran que la aplicación pre cosecha de ácido cítrico, a las concentraciones de 0.1% y 0.5%, han tenido un efecto retrasando la maduración de los pomelos ‘Star Ruby’, disminuyendo el metabolismo en la recolección y durante la conservación postcosecha. Estos resultados permiten a los frutos estar más preparados para afrontar el periodo de senescencia, aunque estas diferencias no se observaron en la firmeza y pérdidas de peso durante 45 días de almacenamiento refrigerado. Por tanto, futuras investigaciones son necesarias para determinar el efecto del ácido cítrico como una herramienta prometedora para aumentar la calidad y vida útil de los pomelos.

Bibliografía

AILIMPO. https://www.ailimpo.com/documentos/Datos_Clave/Pomelo_Espanol.pdf 2018

Lado, J., Gambetta, G., & Zacarias, L. (2018). Key determinants of citrus fruit quality: Metabolites and main changes during maturation. *Scientia Horticulturae*, 233, 238-248. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.055>

Ma, Q., Lin, X., Wei, Q., Yang, X., Zhang, Y., & Chen, J. (2021). Melatonin treatment delays postharvest senescence and maintains the organoleptic quality of ‘Newhall’ navel orange (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) by inhibiting respiration and enhancing antioxidant capacity. *Scientia Horticulturae*, 286, 110236. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110236>

Martínez-Esplá, A., Zapata, P. J., Valero, D., Martínez-Romero, D., Díaz-Mula, H. M., & Serrano, M. (2017). Preharvest treatments with salicylates enhance nutrient and antioxidant compounds in plum at harvest and after storage. *Journal Of The Science Of Food And Agriculture*, 98(7), 2742-2750. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8770>

Mosa W.F.A., El-Megeed N.A.A., Ali M.M., Abada H.S., Ali H.M., Siddiqui M.H., Sas-Paszt L. Preharvest Foliar Applications of Citric Acid, Gibberellic Acid and Humic Acid Improve Growth and Fruit Quality of ‘Le Conte’ Pear (*Pyrus communis* L.) (2022) *Horticulturae*, 8 (6), art. no. 507

Serna-Escolano, V., Martínez-Romero, D., Giménez, M. J., Serrano, M., García-Martínez, S., Valero, D., Valverde, J. M., & Zapata, P. J. (2021). Enhancing antioxidant systems by preharvest treatments with methyl



jasmonate and salicylic acid leads to maintain lemon quality during cold storage. *Food Chemistry*, 338, 128044. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128044>

Soler-Aznar, J. Reconocimiento de variedades de cítricos en campo. Valencia: Generalitat Valenciana, Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1999.

Xi, Y., Fan, X., Zhao, H., Li, X., Cao, J., & Jiang, W. (2017). Postharvest fruit quality and antioxidants of nectarine fruit as influenced by chlorogenic acid. *Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie/Food Science & Technology*, 75, 537-544. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.10.004>

Factores determinantes de la presencia de cadmio en aguacates (*Persea americano, L.*) en la provincia de Pedernales y en cacao (*Theobroma cacao, L.*)

C.A.G. Castillo Vicioso¹, E. Valero Cases², L.V. Peña Amador¹,
C.A. Cruz Feliz¹, D.A. Montes de Oca¹, M. J. Frutos²

¹Av. Caonabo 61-B, Residencial Victoria IV, Los Restauradores, DP-11085 Santo Domingo de Guzmán, Distrito Nacional, República Dominicana. e-mail: ccastillovicioso66@gmail.com

²Departamento de Tecnología Agroalimentaria, CIAGRO-UMH, Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental, Universidad Miguel Hernández, 03312 Orihuela, Alicante, España; e-mail: e.valero@umh.es; mj.frutos@umh.es.

Resumen

El cadmio es un metal pesado que se encuentra de forma natural formando parte de compuestos químicos, en rocas volcánicas, suelos y agua contaminada, y como consecuencia del uso excesivo de fertilizantes, residuos de industrias de galvanizado, etc. El Cd se acumula en los granos secos del cacao y en el fruto de aguacate, debido a la contaminación aérea, del suelo y del agua de riego. Para determinar los factores responsables de la presencia de cadmio en estas fuentes, se realizó un muestreo dirigido en centros de acopios y exportadoras ubicadas en las provincias Duarte, Monte Plata y Pedernales, para los granos de cacao, así como en las fincas donde se cosecharon; en ambos casos los contenidos en Cd superaron los límites máximos según Codex Alimentarius (0.85 mg/kg). La metodología para la determinación de cadmio en el aguacate y los granos de cacao a utilizar será la espectrometría de absorción atómica, mientras que para la determinación en suelo se utilizará la espectrometría de fluorescencia de rayos X. El objetivo es identificar los factores ambientales, como el pH y la materia orgánica, actividades agrícolas, industriales, etc. que influyen en la movilidad y disponibilidad del cadmio para las plantas y que se acumulan en el grano de cacao o en el fruto del aguacate. Se utilizará análisis de varianza (ANOVA), para comparar las concentraciones de cadmio entre las diferentes provincias y tipos de muestras. Se aplicará la distribución estadística Chi-cuadrado para evaluar la asociación entre la presencia de cadmio y las variables categóricas, con el tipo de cultivo. Para explorar las relaciones entre las concentraciones de cadmio en suelo, cacao y los aguacates se realizará análisis de correlación y regresión. Se determinará el riesgo asociado al consumo de estos alimentos según ingesta diaria (IDA), de cadmio, en la República Dominicana. utilizando el software @risk.8.6.1.

Palabras clave: cadmio, cacao, aguacates, residuos, evaluación del riesgo.

Determinants of the presence of cadmium in avocados (*Persea americana, L.*) and in cocoa (*Theobroma cacao, L.*)

Abstract

Cadmium is a heavy metal that is found naturally as part of chemical compounds, in volcanic rocks, soils and contaminated water, and as a consequence of the excessive use of fertilizers, waste from galvanizing industries, etc. Cd accumulates in dry cocoa beans and avocado fruit, due to air, soil and irrigation water pollution. To determine the factors responsible for the presence of cadmium in these sources, a targeted sampling was carried out in collection centers and exporters located in the provinces of Duarte, Monte Plata and Pedernales, for cocoa beans, as well as in the farms where they were harvested. In both cases the Cd contents exceeded the maximum limits according to Codex Alimentarius (0.85 mg/kg). The methodology for determining cadmium in avocado and cocoa beans to be used will be atomic absorption spectrometry, while for determination in soil, X-ray fluorescence spectrometry will be used. The objective is to identify environmental factors, such as pH and organic matter, agricultural and industrial activities, etc. that influence the mobility and availability of cadmium for plants and that accumulate in the cocoa bean or the avocado fruit. Analysis of variance (ANOVA) will be used to compare cadmium concentrations between different provinces and types of samples. The Chi-square statistical distribution will be applied to evaluate the association between the presence of cadmium and the categorical variables, with the type of crop. To explore the relationships between cadmium concentrations in soil, cocoa and avocados, correlation

and regression analyzes will be carried out. The risk associated with the consumption of these foods will be determined according to daily intake (ADI) of cadmium in the Dominican Republic. using @risk.8.6.1 software.

Keywords: cadmium, cocoa, avocados, residues, risk assessment.

Introducción

El cadmio es un metal que se encuentra en la corteza terrestre, asociado con minerales tales como: zinc, plomo y cobre. El cadmio puro es un metal blando de color plateado. El cloruro de cadmio y el sulfato de cadmio son solubles en agua. (www.cdc.com. 2024).

El cadmio es uno de los metales tóxicos emitidos al medio ambiente que más tiende a acumularse en los alimentos, por lo que la principal fuente de contaminación de Cd en el ser humano es la ingesta de productos contaminados con este metal. De hecho, una de las características principales del cadmio es su fácil traspaso del suelo a los vegetales, es decir, es uno de los metales que mejor se absorben por las plantas. (Norvell et al. 2000, Rodríguez-Serrano, et. al. 2008).

El cadmio se acumula principalmente en los riñones y el hígado, y su tiempo de vida media biológico en humanos es de 10-35 años. La acumulación de Cd puede llevar a una disfunción renal tubular, lo cual resulta en un incremento de la excreción de proteínas de bajo peso molecular en la orina. Cuando esta proteinuria de bajo peso molecular supera un valor específico (mayor de 1000 ug/g de creatinina), el daño renal es considerado generalmente irreversible. Una ingesta elevada de Cd también puede conducir a distorsiones en el metabolismo del calcio y a la formación de cálculos renales, además afecta al sistema óseo y respiratorio (WHO, 2010)

Las hortalizas y los cereales son las principales fuentes de concentración de Cd en la alimentación, aunque se encuentra Cd en la carne y el pescado, en menor medida. Siendo esto así, surge la preocupación por la presencia recurrente y con valores por encima del nivel máximo permitido en cacao y aguacate, según las estadísticas del Departamento de Inocuidad Agroalimentaria, DIA, de rechazos en fronteras de la Unión Europea y de los monitores nacionales, pretendemos establecer los factores que favorecen la presencia de cadmio en estos productos.

El cadmio es tóxico para la salud humana ya que es bioacumulable, es decir que la presencia de este metal en ciertos tejidos tanto de plantas como de animales, puede aumentar hasta alcanzar concentraciones más elevadas que las concentraciones en su medio de origen o fuente de procedencia. Sin duda alguna, el contenido de cadmio constituye un gran inconveniente a la hora de comercializar el grano de cacao, se les exige a los diferentes países productores como normativas estrictas en las regulaciones vigentes, que su concentración no debe pasar en el fruto (grano) de 0,85 mg/kg y para el aguacate de 0.05 a 0.1 mg/kg, (Codex Alimentarius), por lo cual la búsqueda de estrategias de biorremediación en los suelos son prioritarias.

Debemos considerar que otras fuentes de Cadmio en el suelo son: plaguicidas, fertilizantes, vertido de residuos de la producción de cocaína, industria de galvanoplastia, fábricas de baterías, cemento, incendios forestales e industriales, estabilización de productos plásticos, actividades mineras, entre otros. Ya desde el año 2011 se estudiaba que otra principal fuente de contaminación de cadmio son los fertilizantes provenientes de roca fosfórica. Por estas razones se hace necesario determinar cuál es la condición actual de los suelos y de algunos productos agrícolas que por su alto consumo podrían representar un peligro para la salud humana. (Huamaní, 2011).

El cadmio es liberado al suelo, al agua y al aire durante la extracción y refinación de metales no ferrosos, la manufactura y aplicación de abonos de fosfato, la combustión de combustibles fósiles, y la disposición e incineración de basura. El cadmio puede acumularse en organismos acuáticos y en cosechas agrícolas. (<https://www.cdc.gov/spanish/>)

Para mitigar los niveles de Cd en los granos de cacao es crucial identificar las zonas de cultivo de cacao con alto contenido de Cd y desarrollar estrategias para abordar este problema, incluidas medidas de atenuación que se puedan aplicar a corto plazo (por ejemplo, test del suelo junto a enmiendas del suelo),

mientras que otras medidas requerirán más tiempo para implementarse (por ejemplo, injertos de plantas en portainjertos con baja asimilación de Cd). (Codex A, CXC 81-2022)

Igualmente sería pertinente caracterizar estos suelos analizados donde se han detectados concentraciones altas de cadmio, tanto en aguacates como en cacao en grano, de las provincias objeto de este estudio.

El Cd es tóxico y persistente en el suelo (la vida media calculada del Cd en el suelo oscila entre 15 y 1100 años). El Cd es absorbido y bioacumulado por los árboles del cacao (*Theobroma cacao* L.) y esto en algunos casos se traduce en niveles inaceptablemente altos en los granos de cacao; en consecuencia, puede ser necesario adoptar medidas para reducir tanto la presencia de Cd en el suelo como la absorción de Cd por parte de los árboles de cacao. (Codex A, 2022)

El método más eficaz desarrollado hasta ahora para disminuir la biodisponibilidad del Cd es el encalado de suelos por debajo de pH 6. El encalado es una práctica de gestión del suelo que reduce la asimilación de Cd por parte los árboles de cacao cultivados en suelos altamente ácidos, y su adición también puede mejorar la nutrición y la producción de los árboles de cacao. No obstante, es importante verificar que la cal añadida no contenga Cd

En el año 2009, el Panel de contaminantes de European Food Safety Authority (EFSA) estableció una ingesta semanal de 2,5 mg/kg de peso corporal para el cadmio. Luego de hacer una revisión la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), a través de Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA), en el año 2011, ratificó la misma ingesta, a través del documento Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain (European Food Safety Authority, 2011, 109).

La Asociación Europea del Cacao, al igual que la asociación de industriales de alimentos de Asia, están de acuerdo con el nivel máximo propuesto para el cadmio en chocolates que contienen o declaran <30 % del total de sólidos de cacao sobre la base de materia seca en 0,3 mg/kg y no tiene más observaciones en esta fase. (CX/CF 21/14/5, 2021)

El pH del suelo se debe gestionar con un objetivo de pH >6 pero, si los niveles de Cd en el suelo son altos, es posible que se necesite un pH más alto para reducir la acumulación de Cd por parte de los árboles de cacao. Sin embargo, el pH no debe ser tan alto que reduzca la absorción de minerales y micronutrientes deseables. La adición de sulfato de Zn a través de la fertilización también puede resultar necesaria para garantizar el mantenimiento de los niveles de Zn. (Codex A, CXC 81-2022)

En la República Dominicana no se tienen evidencias científicas sobre la verdadera causa de la presencia de cadmio en los vegetales, específicamente en cacao y aguacates que es el objeto de esta investigación. Y mucho menos la correlación de reporte de la presencia de enfermedades daño a la salud relacionados con este metal, las cuales podrían poner en riesgos la economía del subsector cacao talero y aguacates, y peor aún la salud de las personas.

Desde 1991, el gobierno de China desarrolló y se han reportado pautas, para monitorear y evaluar los niveles de metales pesados en lugares contaminados (Chen et al., 1996; Wang et al., 1994). Estas pautas están basadas principalmente en las propiedades del suelo y el efecto de los metales pesados sobre la calidad de agua, en la actividad de los microorganismos en los suelos, en la salud humana y en los rendimientos y calidad de las cosechas. Han sido formulados tres valores para evaluar la calidad de los suelos. Los Valores A (definidos como el límite superior de concentración frecuente de metales pesados encontrados en suelos), Valores de B (definidos como el nivel aceptable de metales pesados en suelos), y Valores de C (niveles excesivos en muy altas concentraciones de metales que indican la necesaria intervención para soluciones, es decir, se hace necesario y obligatorio el control de la contaminación). (Prieto Méndez. 2009)

La capacidad de las plantas para bioacumular metales y otros posibles contaminantes varía según la especie vegetal y la naturaleza de los contaminantes. Estas diferencias en la absorción de metales, pueden ser atribuidas precisamente a la capacidad de retención del metal en cuestión, por el suelo de cultivo y a la interacción planta-raíz-metal y al metabolismo vegetal propio (Vig et al., 2003, Prieto Méndez, J, 2009)

El Cd presente en los alimentos es la principal fuente de exposición para la mayoría de las personas. En la mayoría de las zonas no contaminadas con Cd la ingesta diaria media con los alimentos se encuentra entre 10-40 μg . En zonas contaminadas se ha observado que alcanza varios cientos de μg al día. En zonas no contaminadas, la absorción debida al consumo de tabaco puede igualar la ingestión de Cd a partir de los alimentos.

La actividad volcánica es considerada la principal fuente de liberación de cadmio en el ambiente, por lo que se encuentra ampliamente distribuido en la superficie terrestre a bajas concentraciones, su dispersión en el ambiente está asociado al desgaste y erosión de las rocas, cuyo transporte principal se da en el mar (Sánchez-Barrón, 2016).

La Unión Europea en su reglamento Número 488/2014, da un límite para la concentración máxima de Cadmio de 0,8 mg/kg para un producto cuyo contenido de materia seca de cacao supere la mitad de su peso. Cualquier valor por encima de este índice impedirá a estos productos su ingreso al mercado europeo (Unión Europea, 2014).

La absorción del cadmio por los vegetales es fácil. El metal es uno de los pocos elementos capaces de acumularse en las porciones comestibles de las plantas, pudiendo alcanzar niveles tóxicos para los humanos. Efectivamente, la absorción del cadmio por parte de las plantas representa uno de los primeros estadios de bioacumulación en las cadenas alimentarias. En la sustancia seca, las hojas generalmente presentan un contenido en cadmio más elevado respecto a las raíces, a los frutos y a las semillas.

En 1972 la FAO/OMS fijan como valor de cadmio que puede ingerirse semanalmente por un adulto 400-500 μg y considera una dosis mortal la de 100 $\mu\text{g}/\text{dl}$. La cantidad en agua potable debe ser, según la OMS inferior a 5 $\mu\text{g}/\text{l}$.

En agua existe en forma de ión hidratado o como complejo iónico asociado a otras sustancias inorgánicas u orgánicas. Las formas de cadmio solubles se movilizan en el agua. Las formas insolubles son inmóviles y se depositarán en el sedimento donde serán adsorbidas. En las siguientes imágenes se muestran las principales fuentes que permiten la entrada del cadmio en las plantas.

La prevención y la reducción del Cd en el cacao debe empezar con el análisis fisicoquímico del suelo y formar parte de las prácticas previas al establecimiento de una nueva plantación. El análisis del suelo no está limitado a la medición del Cd, sino que también debe considerar el porcentaje de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, el zinc soluble y la clorinidad. Los parámetros físicos de análisis son: % de arena, % de arcilla, % de limo, clase de textura. El análisis químico debe tener en cuenta si procede: pH, % de materia orgánica, porcentaje de N total; ppm disponible de P, K, Pb, óxidos e hidróxidos de Fe, carbonatos de Mn, Cd y Zn; cambiante (cmol (+) /kg) de Ca, Mg, K, Na, Al y H; CEC, camb. bas. %, ac. Camb. %, y Sat. Al. Se recomienda consultar a un profesional cualificado en busca de información sobre parámetros relevantes para la asimilación de Cd por parte de las plantas, así como para interpretar los resultados de estos análisis del suelo. (Codex A, CXC 81-2022)



Figura 1. Principales fuentes de entrada de cadmio a las plantas.

Fuente: Batista, L. 2009.

El Cacao (*Theobroma cacao* L.)

El cacao es un **árbol americano de origen amazónico**, conocido también como *cacaotero*, ya que por cacao se refiere normalmente al fruto que da dicho árbol, o incluso al producto del secado y la fermentación de los granos o semillas de dicho fruto. Se estima que es originario de Ecuador, pero las evidencias son poco exactas.

El cacao pertenece a la Clase Angiosperma, Sub-clase Dicotiledónea, Orden Malvales, Sub-orden Malvales, Familia Esterculiáceas, Tribu Bitneria, Género *Theobroma*, de la Especie Cacao.

Según estudios de Pound y Cheesman (1934), el cacao es originario de América del Sur, del área del alto Amazonas, que comprende países como Colombia, Ecuador, Perú, y Brasil, donde se ha encontrado una alta variabilidad. Desde este lugar de origen, las especies se fueron difundiendo y evolucionando en dos grupos de cacao con características fenotípicas y genotípicas bien definidas, las cuales corresponden a los cacaos Criollo y Forastero. La calidad del material originalmente encontrado por los españoles en México y luego en Mesoamérica fue una de las razones por la que luego se popularizó tanto. En esta zona se encuentran los materiales criollos que más influencia tuvieron en el desarrollo del cultivo, pues ha sido en el pasado la principal fuente de material de mejoramiento para la mayoría de las áreas donde hoy día se produce cacao de calidad. Se cree que el cacao Criollo se originó luego de la dispersión a través de las tierras bajas de Venezuela, cruzando a Colombia, continuando hacia Ecuador y al norte hacia América Central y México. El cacao Forastero resultaría de la distribución hacia la parte baja del Amazonas, dispersándose hacia la parte norte de Brasil y las Guayanas. Existe un tercer tipo genético de cacao resultante de cruzamientos espontáneos del cacao Criollo con el Forastero, al cual se le ha denominado Cacao Trinitario. Algunos otros autores consideran que el cacao del Ecuador es un cuarto tipo genético, tomando en consideración sus características de aroma y sabor, las cuales son diferenciadas de los tres grupos mencionados y se denomina Cacao Nacional del Ecuador. (Batista. 009)

La República Dominicana cuenta en la actualidad con aproximadamente 25,364,800 tareas (1,585,300 ha.) bajo cubierta forestal, de las cuales el área sembrada de cacao ocupa alrededor de 2,436,185 tareas (152,261.56 hectáreas), un 9.6%, el área de cubierta forestal se calcula en un 33% del total. Hoy la distribución de este cultivo está concentrada en 28 municipios, de las regiones: Nordeste, Este, Central, Norte y Norcentral. La región Nordeste constituye un 60.82% del total, o sea 1,481,681 tareas (92,605 ha.) en San Francisco de Macorís, Pimentel, Castillo, Hostos, Cotuí, Fantino, Villa Rivas, Nagua, El Factor, Río San Juan, Sánchez, Las Terrenas, y Samaná. Ver imagen. (Batista. 2009)



Figura 2. Mapa, ubicación de las principales provincias productoras de cacao, RD.

Fuente: Confederación Nacional de Cacaocultores dominicano (CONACADO).

El cacao, cuyo nombre científico se denomina (*Theobroma cacao* L.), es uno de los rubros agrícolas más importantes de la República Dominicana; fue introducido al país y demás territorios del Caribe por los españoles como cultivo, a principios de 1600, pero no con mucha dedicación. Sin embargo, son los franceses quienes a partir del año 1165 lo fomentan con éxito. A través del tiempo, su consumo,

principalmente en forma de bebida, fue adquiriendo popularidad en diversos países de Europa, por lo que la alta demanda de ese rubro en los mercados europeos produjo un incremento del cultivo. (Batista. 2009)

El Aguacate (Persea americana L.)

Familia Botánica: Lauráceas Nombre Científico: (*Persea americana*). Descripción: El aguacate es nativo de Centro América. Es un árbol de tamaño variable dependiendo de la variedad, origen y condiciones ambientales. El fruto constituye una baya voluminosa con una semilla grande. Presenta cuatro formas: alargada, aplanada, redondeada y ovalada. El fruto consta de tres partes: corteza, pulpa y semilla. La pulpa o porción comestible contiene muy poco azúcar, menos de 1.5 a 3.5 por ciento antes de su maduración y de 0.25 a 1.8 por ciento en los maduros; contiene un gran porcentaje de proteínas y grasas; el azúcar tiende a bajar mientras aumenta el contenido de grasas, que a veces llega hasta el 20 por ciento el aceite es altamente digestivo y similar al aceite de oliva, aunque cambia según la variedad; es menor en la antillana; intermedio en la guatemalteca y mayor en la mexicana. Posee cantidades moderadas de vitaminas A y B. posibilidades de industrialización: Pasta, aceite, pulpa, guacamole, preservación en trozos: para preparar comidas, dulces, pasteles, ensaladas de frutas, etc. (SAG.2023)

La producción nacional de aguacates entre 2014 hasta 2017, según informaciones de FAOSTAT mostró un crecimiento considerable, para el año 2014 la producción dominicana del producto fue de 513,961 toneladas, para el 2015 aumenta a 526,438 toneladas llegando a 601,349 toneladas en el 2016. Para el último año de la serie la producción fue de 637,688 toneladas. La tasa de crecimiento en el período fue de 24.07%. Para el año 2023 había un total de 127,320 tareas (8005.8816 ha). (MARD.2024)

Las primeras plantaciones comerciales de aguacate se establecieron en Altam a, Guanatico y Moca, con plantas de cultivares criollos reproducidas por semilla. El aguacate se diseminó de esta forma por todo el país constituyendo uno de los árboles de sombra de la mayoría de los patios. Plantaciones más amplias desarrolladas con plantas injertadas de variedades seleccionadas principalmente en Florida y Puerto Rico, fueron establecidas en Baní, San Cristóbal, Ocoa, Mao, La Romana, Moca, Montecristi, Duvergé y Elías Piña lo que marca el inicio de las explotaciones organizadas. El tamaño de los huertos es muy variable y abarcan de 750 a 500,000 árboles, desarrollados a partir de semillas de clones criollos o bien sobre patrones criollos e injertos de las variedades Semil, Choquette o Marcus, Hall, Lula, Booth, Wilson Popenoe, Doctor Dupuis, Simmonds y otras en las zonas medias y bajas, y Hass en las nuevas plantaciones establecidas en las alturas de Calimete, Elías Piña y San José de Ocoa. (Bisonó Pérez. 2008)

El mejor suelo para el cultivo del aguacate es el de textura media por su buen drenaje y profundidad con ausencia de capas duras. Los suelos con mucha arcilla retienen mucha agua y producen condiciones de anaerobiosis (Putrefacción del sistema radicular). Los suelos muy livianos (con exceso de arena) no tienen capacidad adecuada de retención de agua, los nutrientes se pierden por percolación y la aireación es excesiva. Los suelos medios y profundos garantizan el desarrollo del sistema radicular. Los suelos rocosos deben evitarse, más si ellos se eligen debe tomarse un paquete de medidas para mejorar la nutrición y lograr rendimientos económicos. El contenido de materia orgánica debe ser de 2.5 a 5%, dentro de terrazas o cajuelas. El rango óptimo del pH para el aguacate es de 6,5 a 7,5. Los suelos con pH altos (8 a 9) producen severas clorosis porque no absorben el hierro. En suelos muy ácidos, con pH menor de 5,5, se presentan efectos tóxicos del exceso de aluminio que la planta absorbe con facilidad. (Bisonó Pérez. 2008)

El agua de riego debe reunir las siguientes características para su uso en aguacates: a) Que el total de sólidos disueltos sea menor de 850 ppm. b) Que el contenido de sodio sea menor de 3 meq./lt. c) Que los cloruros estén en proporciones menores de 107 ppm. d) Que la cantidad de boro sea menor de 0.7 ppm. El pH es importante por cuatro razones: a) Por causar deficiencias de algunos elementos en la planta. b) Por inducir exceso nocivo de ciertos elementos en la planta. c) Por interaccionar ciertos patógenos en la planta. d) Por su efecto directo en el desarrollo del vegetal. Un pH alcalino deja el hierro, el manganeso, el boro, el cobre y el zinc en forma inasimilable, el calcio (Ca) y el sodio (Na.) producen altas presiones osmóticas. Un pH de 6 ó menos convierte el fósforo en poco asimilable, el calcio (Ca) y el Magnesio (Mg) se lavan en exceso de hierro y aluminio. Estos elementos en exceso descargan las micelas del coloide protoplásmico e inducen la floculación. El antagonismo se presenta cuando algunos iones inhiben la absorción de otros. El sinergismo ocurre cuando la unión refuerza la acción

metabólica de otro. Ejemplo: Sodio y potasio, la presencia de boro capacita a la planta para absorber más calcio. Todos los elementos se pueden dar en forma foliar a la planta, excepto cuando las deficiencias de nitrógeno y fósforo son altas, pues una solución foliar con excesiva presión osmótica producirá efectos nocivos en los frutales. (Bisonó Pérez. 2008)

La luminosidad garantiza la calidad del fruto. El viento frío o caliente puede afectar la floración y fructificación, además de presentar problemas de rotura de ramas y de plantas jóvenes. Es importante colocar cercas vivas para reducir la acción dañina del viento. El agua es el principal componente del fruto. En la mayoría de las especies vegetales va de 50 a 90% y en el aguacate es del 70 % a la madurez. La falta de agua provoca reducción del tamaño de los frutos hasta la caída y pérdida de la cosecha. Un exceso de agua en el suelo conduce a la asfixia radicular, razón que hace evitar suelos con poco drenaje o muy arenosos. (Bisonó Pérez. 2008)

La temperatura es un factor determinante para la fructificación. El aguacate es, susceptible a las bajas temperaturas en el proceso de fructificación. Altas temperaturas producen caídas en las bayas. Temperaturas menores de 13° C y mayores de 40° C, afectan los rendimientos. Las plantas comerciales requieren de un programa de fertilización que incluya, no solo fertilizantes químicos, sino también las enmiendas orgánicas, los abonos foliares y los tratamientos hormonales. La planta de aguacate requiere de fertilización con abonos químicos completo (N.P.K.). En el caso de aplicaciones mensuales de fertilizantes, se aplican abonos al suelo en los meses impares y abonos foliares en los meses pares vel de fructificación. (Bisonó Pérez. 2008)

La lucha agronómica y física incluyen el empleo de variedades resistentes, corrección de defectos del terreno (drenaje, encalados, corrección de carencia), destrucción por medios mecánicos (quema de órganos vegetales, corte de ramas, trampas). La lucha química incluye el uso de insecticidas, fungicidas, acaricidas, nematicidas, rodenticidas, herbicidas y otros de preferencia específica, a título preventivo o curativo. La lucha química requiere que quien la practique posea conocimientos de zoología, botánica, patología, fisiología vegetal, bioclimatología y agronomía. Para controlar estas plagas se recomiendan el control biológico y/o químico. El control biológico no se aplica a un grado económicamente rentable. El control químico exige el conocimiento del ciclo de las plagas y las dosis correctas para evitar en un futuro la resistencia de las plagas a los insecticidas comerciales de hoy día. (Bisonó Pérez. 2008)

Relevancia. La relevancia de este estudio comprende dos aspectos fundamentales: primero, en el impacto nocivo que el Cadmio causa en la salud de los consumidores, destacándose fundamentalmente los daños a los riñones y al hígado, que en muchos casos degenera en enfermedades cancerígenas. En ese sentido, estudios recientes han demostrado que la acumulación de ese metal puede llevar a una disfunción renal tubular, lo cual resulta en un incremento de la excreción de proteínas de bajo peso molecular en la orina. (www.oms.com. 2024)

En segundo lugar, el estudio es relevante porque a partir de los datos recabados se presentará un minucioso informe con sistemas estadísticos de distribución de probabilidad, estimación del riesgo, así como Análisis de Regresión y Correlación, que permitan dar respuesta y soluciones al problema objeto de estudio. Es relevante, además, porque procuramos reflexionar sobre los senderos iniciales que marcan la vía principal para adentrarse al estudio preliminar de esta temática en el país, además de ser compleja, aportara informaciones para el sector agropecuario, ambiental y la salud pública. Y el comercio nacional e internacional en cuanto a la inocuidad de estos rubros: cacao y aguacates.

Materiales y Métodos

Se realizó una revisión sistemática de la literatura científica publica entre 2020 y 2023, en 8 base de datos utilizando ecuaciones de búsqueda con términos MSEH. Se filtraron las referencias en base a los objetivos excluyéndose artículos no originales y solo relativos al tema en cuestión. La presencia de metales pesados (cadmio), será evaluada en suelos, y frutas del aguacate, y en almendras secas o grano de cacao según corresponda el caso y luego de las evaluaciones realizadas por los monitoreo del departamento de inocuidad agroalimentaria, específicamente en tres provincias objeto de este estudio (San Francisco de Macorís, Monte Plata y Pedernales), y por ser estas donde más se han reportado

presencia de cadmio en cacao y aguacates, respectivamente, durante los monitores realizados en contaminantes en alimentos que realiza el Ministerio de Agricultura, Departamento de Inocuidad, DIA. Se realizará un muestreo dirigido en el caso de las tomas de muestras y los lugares o fincas a muestrear reportados por el DIA, por los rechazos en fronteras en los mercados de destino y los encontrados con el monitoreo nacional. Se analizarán los resultados de los análisis reportados por el DIA, con los parámetros establecidos por el Codex Alimentarius y los establecidos por los mercados de destino. Las muestras que necesiten ser analizadas serán enviadas al laboratorio AGQulat, en los Estados Unidos, cumpliendo con el protocolo de bioseguridad establecido para envío de muestras para análisis de residuos de metales pesados, evitando contaminación cruzada o deterioro de las mismas. La metodología para la determinación de cadmio en el aguacate y los granos de cacao a utilizar es la espectrometría de absorción atómica, mientras que para la determinación en suelo será la espectrometría de fluorescencia de rayos X. Se utilizará el análisis de varianza (ANOVA), para comparar las concentraciones de cadmio entre las diferentes provincias y tipos de muestras. Se aplicará la distribución estadística Chi-cuadrado para evaluar la asociación entre la presencia de cadmio y las variables categóricas, como el tipo de cultivo. Para explorar las relaciones entre las concentraciones de cadmio en suelo, cacao y los aguacates se realizará análisis de correlación y regresión. Se realizará el riesgo asociado al consumo de estos alimentos según ingesta diaria (IDA), de cadmio, en la República Dominicana. utilizando el software @risk.8.6.1.

Resultado del Monitoreo de Cadmio. 2019.

Tabla 1. Ubicación de los lugares muestreados con cacao con presencia de cadmio, resultado del monitoreo y sus concentraciones, del Departamento de Inocuidad Agroalimentaria, DIA, Ministerio de Agricultura, República Dominicana, del año 2019.

Provincias	Resultados de la concentración de cadmio mg/kg en las muestras de Cacao según monitoreo del DIA, 2019.							Total
	0.119-0.21	0.219-0.319	0.319-0.419	0.419-0.519	0.519-0.619	0.619-0.719	0.719-0.819	
Distrito Nacional	0	0	0	1	0	0	0	1
Hato Mayor	5	3	1	0	0	0	0	9
Monte Plata	5	0	2	0	1	0	0	8
Puerto Plata	1	3	0	0	0	0	0	4
San Francisco de Macorís	6	16	8	1	1	1	1	34
Santo Domingo	0	1	0	0	0	0	0	1
Seibo	0	1	0	0	0	0	0	1
Total general	17	24	11	2	2	1	1	58

Fuente: Departamento de Inocuidad, 2019. Ministerio de Agricultura, RD.

Resultados y Discusión

Los resultados del monitoreo en el caso de San Francisco de Macorís, dos (2) de las seis (6) muestras superan los límites recomendados por el Codex que es de 0.6 mg/kg:

- En San Francisco de Macorís, 2 muestras exceden el límite de 0.6 mg/kg (una entre 0.619-0.719 mg/kg y otra entre 0.719-0.819 mg/kg), lo que implica que estas muestras no cumplirían con los límites establecidos para cacao en grano.

- En el caso del Distrito Nacional (0.419-0.519 mg/kg) está por debajo del límite de 0.6 mg/kg, por lo que cumple con los requisitos para el cacao en grano.
- Lo que corresponde a la mayoría de las muestras de Hato Mayor, Monte Plata, Puerto Plata, Santo Domingo y El Seibo están muy por debajo del límite de 0.6 mg/kg, lo que indica un buen cumplimiento con lo establecido por el Codex y otros organismos relacionados.

Conclusiones

- La provincia de San Francisco de Macorís es la que presenta más preocupación, con 2 muestras que exceden el límite de cadmio permitido para cacao en grano. Esto sugiere investigar la fuente o procedencia del cadmio y considerar medidas para reducir la absorción de este por las plantas.
- Las demás provincias muestran niveles aceptables de cadmio en el cacao en grano, por lo que cumplen con los límites internacionales establecidos por el Codex.
- Se recomienda seguir con el monitoreo regular en todas las provincias para asegurar que los niveles de cadmio se mantengan dentro de los límites seguros y evitar que la contaminación impacte negativamente la producción nacional, exportaciones y el consumo local de cacao.
- Con estas informaciones y el análisis a estos resultados, pretendo establecer las causas, fuente o procedencia del cadmio encontrado en el cacao e incluir e un estudio más completo el aguacate, que ha sido objeto de devolución en los mercados de destinos por la presencia de cadmio por encima de los niveles permitidos por el Codex Alimentariu. Establecer medidas para su remediación, programas de implementación de buenas prácticas agrícolas, para minimizar la presencia de este en los cultivos objeto de estudio.

Agradecimientos

Al Ministerio de Agricultura, Departamento de Inocuidad Agroalimentaria, en la persona del Sr. Director Francis Herreras Sánchez, por permitir como lo establece la Ley General de Libre Acceso a la Información Pública, No. 200-04, el uso de la base de datos del monitoreo de residuos y contaminantes en alimentos y a los inspectores.

Bibliografías

Organización mundial de la Salud. www.oms.com (acceso 14 de junio, 2024)

Batista, Lepido. 2019. Cultivo de Cacao. Serie Cultivos Guía Técnica.

<https://intranet.cedaf.org.do/publicaciones/guias/download/cacao.pdf>

Los metales pesados como contaminantes en los alimentos

<https://www.efsa.europa.eu/es/topics/topic/metals-contaminants-food> (acceso, abril 4, 2024)

La Agencia de Protección Ambiental (EPA).

[Resumen de Salud Pública: Cadmio \(Cadmium\) | PHS | ATSDR \(cdc.gov\)](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs5.html)
https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs5.html (acceso, abril 14, 2024)

Fundación Hondureña de Investigación Agrícola, (FHIA).2011. (acceso, abril 24, 2024)

Florida Rofner N, Shilthon Lineker C M, Gómez B R 2018. El ph y la absorción de cadmio en almendras de cacao orgánico (*Theobroma cacao L.*) en leoncio prado, huánuco, Perú.
https://www.iiap.gob.pe/Archivos/Publicaciones/Publicacion_3387.pdf

Rosales-Huamaní Jimmy, Centeno-Rojas Luis, Cajacuri Perez Jhomara, Breña Jorge Luis, Chávez Chapana Carlos. 2021. Identificación de cadmio y plomo en los cultivos de cacao ubicados en la zona de satipo –Junín. <https://revistas.uni.edu.pe//index.php/tecnia/article/view/1062/1747>

Lanza, J G; Churión, P C; et. al. 2016. Evaluación del contenido de metales pesados en cacao (teobroma cacao l.) de Santa Bárbara del zulía, Venezuela. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-01622016000100011

Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades. www.atsdr.cdc.gov

Huamaní Yupanqui H A, Huauya Rojas M Á. 2018. Efecto de materia orgánica en el contenido de cadmio en almendras de cacao orgánico en Perú. <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/202/185>

Resumen de salud publica del Cadmio. Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades. <https://www.cdc.gov/spanish/> (acceso junio 22 del 2024)

Velásquez-Vélez, M I; Galvis-Lora, C; Mejía-Córdoba, C A; Zapata-Guzmán, E. 2022. Implicaciones de la acumulación de Cadmio en la cadena productiva del cacao. <http://www.scielo.org.pe/pdf/mang/v19n4/2414-1046-manglar-19-04-391.pdf>

Sánchez Barrón G. .2016. Ecotoxicología del cadmio. Universidad Complutense, Madrid, España. <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/GARA%20SANCHEZ%20BARRON.pdf>

Ministerio de Agricultura, Departamento de Inocuidad Agroalimentaria, base de datos de resultados de análisis de residuos de contaminantes químicos en los vegetales y suelos agrícola. Programa MOVIREHA. 2019 al 2024.

Codex Alimentarius. 2022. Código de prácticas para prevenir y reducir la contaminación por cadmio en los granos de cacao CXC 81-2022

Rodríguez-Serrano, M., Martínez-de la C, N., Romero-Puertas, M.C., del Río, L.A., Sandalio, L.M. (2008). Toxicidad del Cadmio en Plantas. Ecosistemas 17(3):139-146. <https://www.redalyc.org/pdf/540/54017106014.pdf>

Comide conjunto del Codex Alimentarius, sobre contaminantes en alimentos. CX/CF 21/14/, marzo de 2021. Nivel máximo de cadmio para los chocolates que contienen o declaran.

Bonomelli Claudia, Bonilla Carlos y Valenzuela Adriana. 2003. Efecto de la fertilización fosforada sobre el contenido de cadmio en cuatro suelos de Chile. <https://www.scielo.br/j/pab/a/dBv7FZxQWJBM4MnpwtfSt8M/?format=pdf>

Prieto Méndez, J.; G. R., César A., et al. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua Tropical and Subtropical Agroecosystems, vol. 10, núm. 1, 2009, pp. 29-44 Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, Yucatán, México. <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>

https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/seguridad_alimentaria/evaluacion_riesgos/informes_comite/CADMIO_ALIMENTOS.pdf

Bisonó Pérez, S MI. Y Hernández B, JR. 2008. Guía tecnológica sobre el cultivo del aguacate.

<https://unaltreblogdehorts.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/04/guiatecaguacate.pdf>

Matos, K. 2023. Dirección General de Riesgos Agropecuarios. RD. [Guía de Cultivo Aguacate.pdf \(digera.gob.do\)](https://digera.gob.do/wp-content/uploads/2023/07/Guia-de-Cultivo-Aguacate-1.pdf) <https://digera.gob.do/wp-content/uploads/2023/07/Guia-de-Cultivo-Aguacate-1.pdf>

Secretaría de Agricultura y Ganadería, Honduras. 2001. Ficha Técnica sobre el aguacate. <https://dicta.gob.hn/files/2001,-Aguacate,-FT.pdf>

Factores que afectan la calidad postcosecha de la cebolla en la República Dominicana: posibles herramientas para mejorar la calidad

A. Avilés-Quezada^{1,3}, H. M. Díaz-Mula², J. Pastor², L. Matos-Casado^{1,3}, M. E. García-Pastor² y D. Martínez-Romero²

¹ Facultad de Ciencias Agronómicas y Veterinarias, Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), Ciudad Universitaria, Avenida Alma Máter., 1355 Santo Domingo, República Dominicana, e-mail: aaviles96@uasd.edu.do

² Instituto de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO) - Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), Ctra. Beniel km. 3.2, 03312 Orihuela, Alicante, España.

³ Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuaria y Forestales (IDIAF), Calle Rafael Augusto Sánchez #89, Ensanche Evaristo Morales, 10147 Santo Domingo, República Dominicana.

Resumen

La cebolla (*Allium cepa* L.) ocupa el segundo lugar entre las hortalizas en términos de superficie cosechada tanto a nivel mundial como en la República Dominicana. Con una producción nacional de 105.375 toneladas en 2023, esta hortaliza consumida diariamente por el 92 % de la población dominicana, genera empleos y minimiza la pobreza en zonas de amortiguamiento fronterizo. El objetivo principal de la presente revisión bibliográfica es obtener información nacional sobre el cultivo de cebolla en la República Dominicana, así como identificar los factores que afectan su calidad postcosecha y posibles herramientas para mejorarla, retrasando las pérdidas de calidad y extendiendo su vida útil. Para ello, se consultaron un total de 107 artículos de la base de datos 'Scopus', estadísticas en bases de datos internacionales y nacionales, 'FAOSTAT' y 'Ministerio de Agricultura del país', respectivamente, entre otras fuentes bibliográficas correspondientes al período 2019-2024. Sin embargo, debido a la gran escasez de información a nivel nacional, la búsqueda de información se amplió entre el año 2004 y 2024. Hasta un 40 % de las pérdidas postcosecha de la cebolla son resultado de un manejo inadecuado, brotación, podredumbre, almacenamiento inadecuado por falta de conocimiento científico e infraestructuras, y del deterioro microbiano que contribuye en un 15-20 %. Los principales factores en precosecha que afectan la calidad de la cebolla son: el manejo del cultivo, el riego, la fertilización, la incidencia de plagas (*Spodoptera exigua* Hubner., *Thrips tabaci* Lindeman., *Liriomyza sativae* Blanchard., *Rhizoglyphus echinopus* Fumouze y Robin, y *Ditylenchus dipsaci* Kühn) y de enfermedades [mancha purpúrea (*Alternaria porri* Ellis), podredumbre de la cebolla (*Erwinia carotovora* Jones), el cocoteo de la cebolla (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz y Sacc), la podredumbre del cuello (*Botritis allii* Munn) y la pudrición basal (*Fusarium oxysporum* Schltdl.)], así como el establecimiento del cultivo en zonas no adecuadas para adquirir la óptima madurez fisiológica. Por otro lado, los factores principales que afectan la calidad en postcosecha son: la recolección del cultivo sin una madurez fisiológica adecuada, la incidencia de enfermedades postcosecha y problemas asociados al secado, el almacenamiento y la distribución. Por todo ello, se requiere de la inclusión de nuevas variedades más resistentes, la reubicación del cultivo en zonas climáticas más adecuadas que las existentes, la incentivación en el uso de maquinarias de secado, el almacenamiento en frío y el uso de elicitores. Con dichas acciones se contribuiría en el aporte de herramientas para incrementar la calidad de la cebolla en la República Dominicana, la cual está actualmente regulada por la ley NORDOM 584.

Palabras clave: *Allium cepa* L., almacenamiento prolongado, estrategias postcosecha, pérdidas de calidad, República Dominicana.

Factors affecting postharvest quality of onions in the Dominican Republic: possible tools to improve quality

Abstract

Onion (*Allium cepa* L.) ranks second among vegetables in terms of harvested area both worldwide and in the Dominican Republic. With a national production of 105,375 tons in 2023, this vegetable consumed daily by 92 % of the Dominican population, generates jobs and minimizes poverty in border buffer zones. The main objective of this

bibliographic review is to obtain national information on onion cultivation in the Dominican Republic, as well as to identify the factors that affect its postharvest quality and possible tools to improve it, delaying quality losses and extending its shelf-life. To this end, a total of 107 articles from the 'Scopus' database, statistics in international and national databases, 'FAOSTAT' and 'Ministry of Agriculture of the country', respectively, among other bibliographic sources corresponding to the period 2019-2024 were consulted. However, due to the great scarcity of information at the national level, the search for information was extended between 2004 and 2024. Up to 40 % of postharvest losses of onions are the result of inadequate handling, sprouting, rot, inadequate storage due to lack of scientific knowledge and infrastructure, and microbial deterioration which contributes 15-20 %. The main preharvest factors that affect onion quality are: crop management, irrigation, fertilization, incidence of pests (*Spodoptera exigua* Hubner., *Thrips tabaci* Lindeman., *Liriomyza sativae* Blanchard., *Rhizoglyphus echinopus* Fumouze and Robin, and *Ditylenchus dipsaci* Kühn) and diseases [purple spot (*Alternaria porri* Ellis), onion rot (*Erwinia carotovora* Jones), onion leaf spot (*Colletotrichum gloeosporioides* Penz and Sacc), collar rot (*Botrytis allii* Munn) and basal rot (*Fusarium oxysporum* Schltdl.)], as well as establishing the crop in areas not suitable for acquiring optimal physiological maturity. On the other hand, the main factors affecting postharvest quality are: harvesting the crop without adequate physiological maturity, the incidence of postharvest diseases and problems associated with drying, storage and distribution. For all these reasons, the inclusion of new and more resistant varieties, the relocation of the crop to more suitable climatic zones than the existing ones, the incentive for the use of drying machinery, cold storage and the use of elicitors are required. These actions would contribute to the provision of tools to increase the quality of onions in the Dominican Republic, which is currently regulated by NORDOM Law 584.

Keywords: *Allium cepa* L., long-term storage, postharvest strategies, quality losses, Dominican Republic.

Introducción

En 2024, según los datos de FAOSTAT, la producción mundial de cebolla fue de 135.221.371 toneladas, en una superficie cosechada de 7.090.360 hectáreas. El principal productor de cebolla del mundo fue la India, con 31.687.000 toneladas (23,43 %), seguido de China con 24.605.100,8 toneladas (18,19 %). A nivel europeo, destacan Países Bajos con 1.496.310 toneladas y España con 1.235.700 toneladas. En cambio, la República Dominicana está ubicada en el Caribe y, según el último censo de población y vivienda realizado en el año 2020, cuenta con una población de 10.773.983 habitantes (ONE, 2024), lo que la sitúa en el puesto número 75 a nivel mundial y en el segundo puesto entre las islas del Caribe (FAOSTAT, 2024). Esta importante hortaliza, cuya producción y comercialización tienen un impacto global al ser producida en más de 140 países y consumida en más de 180, es muy importante para la República Dominicana por ser la segunda hortaliza más producida y consumida a nivel mundial (FAOSTAT, 2024). Supone una fuente de ingresos para pequeños productores y crea puestos de trabajo, al igual que en Paraguay según Enciso et al. (2019), y contribuye al dinamismo de la economía de las zonas de producción (Méndez, 2016). Además, es una alternativa para minimizar los niveles de pobreza y marginalidad en las regiones productoras, especialmente en la parte sur del país (Medina, 2008).

De acuerdo con los informes de la FAOSTAT (2024), durante el año 2022, los países continentales con islas caribeñas que cultivan cebollas son: Venezuela, Colombia, Panamá, Costa Rica, Nicaragua, Honduras, Belice y México. Dentro de los países insulares del Caribe, el que más cebollas cultiva es Cuba, seguido de la República Dominicana y Haití, con 8.923, 4.314 y 1.753 hectáreas, respectivamente. Después de estos, está Puerto Rico. En la **Tabla 1**, se observa un incremento en la producción nacional, especialmente en el año 2023, con una producción total de 105.375 toneladas (MA,2024).

Tabla 1. Producción de cebollas en la República Dominicana durante el período 2013-2023.

Año	Producción (toneladas)
2013	49.537
2014	60.698
2015	57.570
2016	57.132
2017	58.060
2018	59.102
2019	68.425
2020	68.033
2021	71.616
2022	74.294
2023	105.375

Fuente: Ministerio de Agricultura de la República Dominicana, 2024.

En la **Tabla 2** se muestra el área sembrada de cebollas por regiones en el país durante el año 2022, destacando las regiones Suroeste, Central y Norcentral como las regiones con mayor área sembrada, con 2.079, 780 y 537 hectáreas, respectivamente. Alvarado (2023) confirma que, durante ese año, las regiones Suroeste, Central y Norcentral continúan liderando la producción de cebollas.

Tabla 2. Superficie sembrada (ha) de las principales regiones productoras de cebolla en la República Dominicana durante el año 2022.

Regiones	Superficie sembrada (hectáreas)
Sur	152
Noroeste	174
Norte	315
Norcentral	537
Central	780
Suroeste	2.079

Fuente: Ministerio de Agricultura de la República Dominicana, 2024.

Dentro de estas regiones, que se destacan en la **Figura 1A**, se encuentran nueve provincias productoras de cebollas. De acuerdo con Medina (2008), estas son: San Juan, San José de Ocoa, La Vega, Peravia (Baní), Santiago, Montecristi, Azua, Bahoruco (Neiba) y San Cristóbal. En cada provincia productora de esta hortaliza se incentiva el seguimiento de un diagrama de flujo reflejado en la **Figura 1B**, donde se observa el proceso que sigue la cebolla desde que está sembrada en el campo hasta que llega al cliente, y se puntualizan los momentos en que se aplican las normas que regulan la producción y calidad de las cebollas en el país.

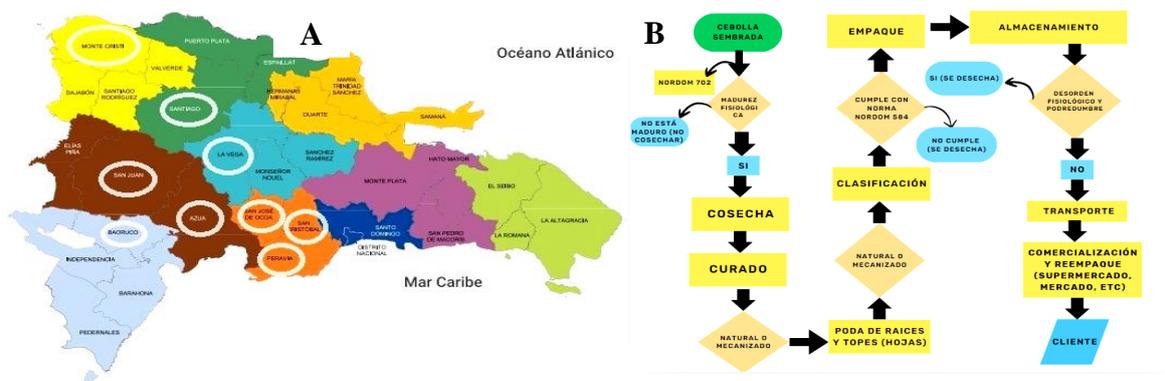


Figura 1. (A) Mapa de las provincias productoras de cebolla en la República Dominicana. Fuente: Mapa de adaptado de la Oficina Nacional de Estadística, 2024. (B) Diagrama de flujo del procesado de la cebolla desde el campo hasta el consumidor final.

Las leyes que rigen la producción, la calidad y la comercialización de las cebollas en el país son dos. Las Normas Dominicanas (NORDOM) 702, denominada «Límite máximo de residuos de plaguicidas permitidos para el cultivo y manejo de la cebolla cultivadas en el campo en República Dominicana» (INDOCAL, 2012), y la norma NORDOM 584, designada como «Hortalizas, tubérculos y raíces. Cebollas rojas, amarillas y blancas». Esta última establece las características de calidad, envasado y presentación que deben reunir las cebollas después de su acondicionamiento y manipulación para su adecuada comercialización (INDOCAL, 2003). Cuando se habla de cebollas, la calidad es el factor más valorado por los consumidores del país, con un 61,1 % de preferencia (Méndez, 2016). Por tanto, la calidad está regulada por el Instituto Dominicano de la Calidad (INDOCAL), que la define mediante la norma NORDOM 584 como: «Bulbos enteros, limpios, sin bulbos múltiples ni rozaduras o magulladuras generadas en la manipulación, sanos (sin podredumbre, ataques de insectos o enfermedades que alteren su apariencia, comestibilidad o conservación), sin puerro endurecido, con túnica externa bien seca, sin humedad exterior anormal, sin sabores u olores extraños, con el puerro limpiamente cortado a 3,0 – 4,0 centímetros, salvo el caso de presentación en ristras» (INDOCAL, 2003).

En cuanto al consumo, destacan los siguientes datos: El país demanda 4.989,52 toneladas de cebollas al mes (MA, 2021) y anualmente 90.718 toneladas, con un consumo per cápita de 8,29 kg/persona/año (MEPYD, 2021). La producción de esta hortaliza se centra en el mercado local, donde la oferta es menor que la demanda, y se destina a los hogares dominicanos, restaurantes, negocios de comida informal y hoteles (Méndez, 2016). Otro aspecto del consumo señalado es que el 92,24 % de la población dominicana consume cebollas diariamente, siendo las cebollas rojas el tipo de cebolla más consumido, seguido de las cebollas amarillas. La mayor parte de la cebolla producida se consume fresca (IICA, 2004), aunque también se consume seca y procesada en condimentos. Se utiliza de diversas maneras: en platos nacionales como el mangú, los víveres, las ensaladas y como ingrediente en medicamentos gripales. En cuanto a las preferencias en cuanto al sabor, los dominicanos prefieren el sabor ligero (Méndez, 2016). Las variedades más cultivadas son: Sivan H 202, Primavera H 222, Pantera Rosa, Perla Alvara, Neptuno, Orlando y Grano F1 (Batista, 2020). La distribución del consumo de cebolla a nivel nacional se concentra principalmente en las grandes ciudades: el Gran Santo Domingo (el Distrito Nacional y la provincia Santo Domingo), Santiago y la zona turística de Bávaro-Punta Cana, Romana, Puerto Plata y Bayahíbe (Alvarado, 2023). Cabe señalar que el número de turistas que visitan la República Dominicana aumenta constantemente y que, en 2023, 10.306.517 turistas visitaron el país, por lo que se prevé que esta cifra aumente aún más en 2024 (MITUR, 2024). La época de producción más significativa del año es el otoño y el invierno, con un 80-90 % del área cultivada. La época de primavera a verano ofrece la oportunidad de colocar en el mercado bulbos a mejores precios (Batista, 2020).

En la **Figura 2**, se presenta un análisis FODA en el que se destacan las fortalezas, las oportunidades, las debilidades y las amenazas del cultivo de cebollas en el país. Las debilidades que implican la necesidad de realizar trabajos en la postcosecha son las siguientes: la necesidad de mejorar el acopio, el secado y el almacenamiento de la cebolla, la falta de estructuras de secado y almacenamiento adecuado, la cosecha sin madurez fisiológica adecuada y los bajos niveles de capacitación de los productores en este aspecto. Como amenazas, en especial para los pequeños productores, se señalan: la acumulación de excedentes (4.535,9 toneladas al año) producto de la competencia con cebollas importadas como resultado del acuerdo RD CAFTA, que provocan un almacenamiento prolongado de la cosecha nacional y pérdidas de calidad del producto (podredumbre y brotaciones). Otras son los problemas fitosanitarios en el cultivo y la desmotivación de los productores, junto con el posible abandono de este cultivo y la falta de industrialización del producto (Méndez, 2016).



Figura 2. Análisis FODA del cultivo de cebollas en la República Dominicana. Fuente: Adaptado de Méndez (2016).

Materiales y Métodos

Esta investigación consistió en una revisión bibliográfica sobre el cultivo de cebollas en la República Dominicana para conocer los factores que inciden en sus pérdidas postcosecha. Para llevar a cabo la búsqueda, se utilizaron los conectores «and» y las palabras clave «pérdidas de calidad, cebollas y postcosecha». Se buscó esta información en «Scopus» desde el período 2019-2024. También se consultaron las estadísticas de bases de datos internacionales y nacionales (FAOSTAT y el Ministerio de Agricultura del país), fuentes de otros países y fuentes nacionales, cuyo período tuvo que ampliarse desde el 2000 hasta el 2024.

Resultados y Discusión

En la búsqueda se encontraron un total de 107 artículos en «Scopus» y, debido a la escasez de información, nacional, aunque se amplió el rango de búsqueda desde el 2000 hasta el 2024, solo se obtuvieron 6 documentos referentes al cultivo de cebollas en el país. Estos están más enfocados a la comercialización y al manejo del cultivo y hacen una ligera mención a la postcosecha, por lo que no existe un documento que trate el manejo de la postcosecha ni las pérdidas en el cultivo de cebollas en el país. Además, se consultaron fuentes de otros países relacionadas con el cultivo o la postcosecha. Los resultados evidencian la escasez nacional de información sobre la cebolla, sus pérdidas y el manejo posterior a la cosecha, algo que también se observa en Kenia, donde Islam et al. (2019) mencionan que la información sobre las pérdidas posteriores a la cosecha de las cebollas bulbosas y sus causas en ese país también es escasa. Estos documentos de la República Dominicana se centran en la comercialización y el manejo del cultivo, pero no en la parte posterior a la cosecha. Sin embargo, en cada documento se destaca la importancia de mejorar el acopio, el secado y el almacenamiento de las cebollas, y se afirma que la precosecha está relacionada con la postcosecha.

La pérdida de alimentos, tal como indica la FAO (2022), es aquella que se produce desde las actividades posteriores a la cosecha hasta la fase de venta al por menor, pero sin incluirla. Benítez y la FAO (2016) también señalan que las pérdidas de alimentos y desperdicios fueron alrededor de un 40 % del suministro total de alimentos en el año 2010, en los procesos propios de la postcosecha y el procesado. En ese mismo documento, también se indica que Latinoamérica y el Caribe son responsables del 6 % de las pérdidas mundiales de alimentos y que estas son más elevadas en el caso de las frutas y hortalizas (FAO, 2019). Según el Desarrollo Agropecuario Integral Camino Real

(DAIRC, 2022) de México, la postcosecha es una actividad clave para reducir las pérdidas y el desperdicio de alimentos, ya que un manejo deficiente en esta etapa pone en riesgo la producción y la calidad de la cosecha que el agricultor ha cuidado durante meses en el campo, invirtiendo tiempo y recursos. Dentro de los tipos de pérdidas, se aborda la pérdida de la producción agrícola de vegetales, que según la FAO (2012) se define como la pérdida correspondiente a derrames y/o daños mecánicos durante la cosecha y la separación de cultivos en la postcosecha. En especial, las que ocurren en las etapas de manejo, postcosecha y almacenamiento, que tienen lugar entre las fincas y la distribución, y durante el procesamiento. Estudios realizados en otros países, como la India, estiman que el 40 % de las cebollas se pierde en procesos como el manejo y la postcosecha (Anbukkarasi et al., 2013). Estas pérdidas se deben a múltiples causas (**Figura 3**), entre las que se encuentran el manejo inadecuado, la brotación, la podredumbre, el almacenamiento inadecuado por falta de conocimiento científico, las cosechas tardías, las infraestructuras y el deterioro microbiano, que genera un 15-20 % de pérdidas (Carballo, 2005; Batista, 2020).

En India, el principal productor de cebollas a nivel mundial, se estima que el 40 % de ellas se pierde en procesos como el manejo y la postcosecha (Anbukkarasi et al., 2013). En una investigación realizada a nivel de finca, se cuantificó la pérdida máxima postcosecha de cebollas (1,21 ton/ha). En esta investigación, se observó un 27,9 % de pérdidas en el almacenamiento y un 23,48 % a nivel de cosecha. De las pérdidas de almacenamiento, se perdió más a nivel mayorista que a nivel de minorista (Sahu et al., 2021). La pérdida y el desperdicio de alimentos suponen un desafío para el mundo y para la República Dominicana, donde no existen datos oficiales que cuantifiquen estas pérdidas y desperdicios de alimentos (Shapiro et al., 2021). En Cuba, según el informe publicado por Mundubat, alrededor del 57 % de los alimentos producidos antes de llegar al consumidor se desperdicia. Las pérdidas de cosecha y postcosecha se sitúan alrededor del 30 % de la producción total de alimentos y los problemas están relacionados con un procesamiento deficiente en la cosecha, un transporte en muy mal estado y un sistema de almacenamientos deteriorados (Redacción OnCuba, 2017). En México, las pérdidas postcosecha promediaron el 25 % (DAIRC, 2022), y las pérdidas de alimentos fueron de 16,5 millones de toneladas en 2009. En cuanto a la cebolla, las pérdidas alcanzaron las 250.352,61 toneladas (Castañeda, 2018). En Haití no se destacan cifras relacionadas con la pérdida de alimentos, solo se señala que las pérdidas posteriores a la cosecha se deben a la falta de instalaciones (tanto de almacenamiento como de procesamiento) y a las pésimas condiciones de su infraestructura vial (FIDA, 2022). Los alimentos que se pierden a este nivel en Bahamas, Jamaica, Trinidad y Tobago, Belice y Colombia son equivalentes a los que se necesitarían para alimentar a todas las personas que pasan hambre en dichos países (Benítez y FAO, 2016). En la literatura consultada se destaca la incidencia de factores antes y después de la cosecha en el almacenamiento de las cebollas (Gathambiri et al., 2021), recalcando la importancia de la selección del cultivar, las adecuadas condiciones antes y después de la cosecha que afectan a su comerciabilidad (como la pérdida de peso, la textura y la intensidad del color del bulbo) y la calidad valorada según su composición química, valor nutricional y actividad antioxidante (Petropoulos et al., 2016).



Figura 3. Problemas o desórdenes que afectan la calidad de las cebollas.

En el caso de República Dominicana, los factores precosecha que están afectando la calidad son: el manejo del cultivo, el riego (Feliciano, 2029), la fertilización (Petropoulos et al., 2016., Batista, 2020), la falta de control de plagas (*Spodoptera exigua* Hubner., *Thrips tabaci* Lindeman., *Liriomyza sativae* Blanchard., *Rhizoglyphus echinopus* Fumouze y Robin, y *Ditylenchus dipsaci* Kühn; Batista, 2020) y de enfermedades [mancha purpúrea producida por *Alternaria porri* Ellis, podredumbre de la cebolla producida por *Erwinia carotovora* Jones, el cocoteo de la cebolla producido por *Colletotrichum gloeosporioides* Penz y Sacc, la podredumbre del cuello (*Botritis allii* Munn) y la pudrición basal (*Fusarium oxysporum* Schltdl.)] (Medina, 2008). Tanto en Uruguay como en Puerto Rico, al igual que en la República Dominicana, hay incidencias de *Alternaria porri* Ellis, *Colletotrichum gloeosporioides* Penz y Sacc y *Fusarium oxysporum* Schltdl (Vélez-Rodríguez y Vargas, 2007). En Uruguay, Carballo (2005) reporta que las principales causas de pérdidas de calidad son por pudriciones por bacterias y *Botritis allii* Munn durante el almacenamiento. Otros factores precosecha que inciden son el establecimiento del cultivo en zonas no adecuadas para adquirir el óptimo desarrollo fisiológico (Batista, 2020). En Paraguay se coincide con estos factores que inciden en la merma del cultivo e incluso se añade la época inadecuada de siembra y trasplante, así como el uso de variedades no adaptadas a las condiciones de fotoperiodo y temperatura (Enciso et al., 2019). En la República Dominicana, la cosecha de cebollas se lleva a cabo de manera manual o mecanizada cuando más del 50 % de las plantas han doblado su follaje desde la base del cuello. En Puerto Rico, las variedades se cosechan cuando entre el 50 % y el 80 % de las plantas han doblado sus hojas a nivel del cuello (Fornaris, 2012). En Costa Rica, Araya (2022) señala que la cosecha se realiza cuando alrededor del 80 % de los cuellos se han doblado, con su cuello estrecho debido al colapso de sus tejidos.

Los factores que inciden en la postcosecha de las cebollas, según Petropoulos et al. (2016), son el método de curado, la temperatura de almacenamiento (atmósfera modificada, temperatura y humedad relativa) y los tratamientos de procesamiento. Además de estos, se incluyen la recolección del cultivo en un estado fenológico inadecuado (lo que provoca que no exista latencia normal y que el bulbo brote con facilidad) (Medina, 2008; Petropoulos et al., 2016), la incidencia de enfermedades postcosecha (podredumbres) y problemas asociados al secado, el almacenamiento y la distribución (Batista, 2020). En la República Dominicana, los factores principales que afectan a la calidad en postcosecha son: la recolección del cultivo sin alcanzar un estado fenológico adecuado, la incidencia de enfermedades postcosecha y problemas asociados al secado, el almacenamiento y la distribución. En Uruguay, las principales causas de pérdidas se deben a la emisión de raíces, brotación y, en menor medida, a pudriciones, moho negro o carbonilla (*Aspergillus niger* Tiegh) y deshidratación (Carballo, 2005). En las regiones productoras de cebolla del oeste de EE. UU., el método de riego, el momento y la frecuencia de este afectan a las cebollas y provocan enfermedades bacterianas (LaHue et al., 2023).

Es muy importante tener en cuenta que la planta haya alcanzado el desarrollo fisiológico adecuado, ya que esto es un parámetro de cosecha muy importante. En Puerto Rico, Fornaris (2012) coincide con este planteamiento e incluso añade que esto reduce las enfermedades y mejora el potencial de almacenamiento de la cebolla. Pues bien, las cebollas incorrectamente desarrolladas tardan más en secarse y afectan al rendimiento y a la calidad, produciendo pérdidas de un 8-18 %, y si se cosechan en un estado fenológico muy desarrollado, se propensa el crecimiento de raíces secundarias durante el almacenamiento y pueden ser atacadas por patógenos como bacterias y hongos. En cuanto a los hongos, Vélez-Rodríguez y Rivera (2007) informaron de que, en Puerto Rico, al identificar hongos presentes en los bulbos de las cebollas, destacaron la identificación por primera vez de *Phoma sorghina*, *Penicillium purpurogenum* y *Sclerotium rolfsii*, que causan daños en las cebollas producidas en ese país. En Uruguay informan de que las principales causas de pérdida durante el almacenamiento de cebollas son la pudrición bacteriana y *Botrytis allii* Munn (Carballo, 2005). En la República Dominicana, la técnica de postcosecha empleada para alargar la vida del producto es el curado de la cebolla. Los métodos utilizados para secarlas son el secado en máquinas (usado por una minoría) y el secado en el campo al sol con las cebollas en el suelo o en cajones de madera o en sacos (Batista, 2020). En Puerto Rico, se ha informado de que el secado se realiza en máquinas, con estructuras y en el campo. Este último dura de 3 a 7 días (Fornaris, 2012). En la República Dominicana, dura entre 3 y 5 días y, si el

secado es artificial y se realiza a 46 °C, puede durar 16 horas (Medina, 2008). Después, los bulbos se clasifican según la norma NORDOM 584 y se almacenan (Medina, 2008).

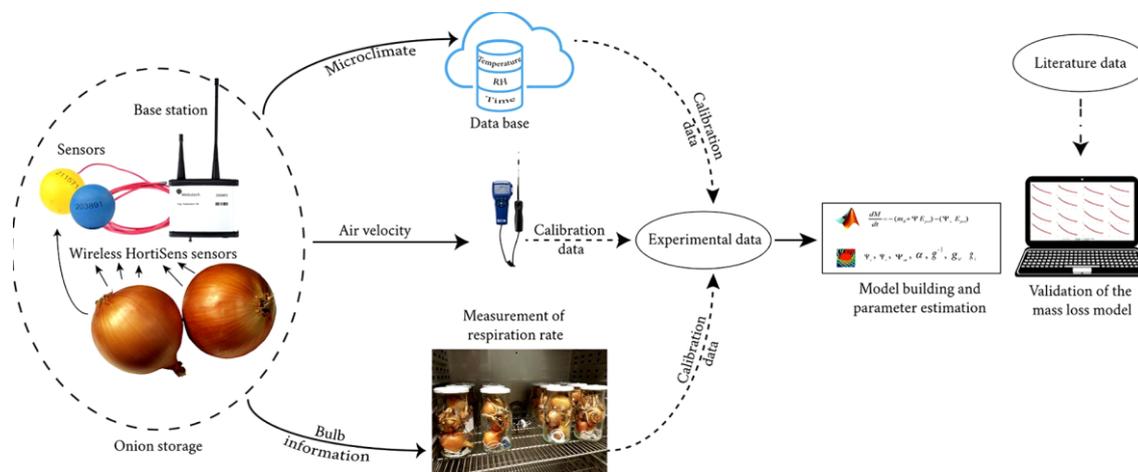


Figura 4. Resumen gráfico del modelo mecanicista dinámico en cebolla. Fuente: Islam et al. (2019).

Algunas herramientas identificadas que pueden contribuir a mejorar la calidad en la República Dominicana son: la inclusión de nuevas variedades más resistentes, la reubicación del cultivo en zonas climáticas más adecuadas a las actuales, la incentivación del uso de maquinarias de secado, el almacenamiento en frío y el uso de elicitors. En otros países se han realizado investigaciones que contribuyen a mejorar la calidad. Así, en muchos países se ha demostrado que la atmósfera modificada y la atmósfera controlada son excelentes opciones para retrasar la maduración y el deterioro de los productos, así como para controlar o disminuir los desórdenes fisiológicos y las enfermedades y plagas (INTAGRI, 2017). En Paraguay, el tratamiento térmico (riego del almácigo con agua caliente), químico (pulverización de almácigos con fungicidas como el Carbendazim, el Mancozeb y el metalaxil) y la regulación del pH a través de la aplicación de cal agrícola constituyen estrategias que deben implementarse para garantizar la obtención de mudas sanas en cebollas (Enciso et al., 2019). En Estados Unidos, recomiendan usar estrategias para limitar el desarrollo de poblaciones de patógenos bacterianos (prácticas de riego y manejo de la fertilidad con nitrógeno) y condiciones efectivas de curado antes y después de la cosecha para reducir las pérdidas causadas por la podredumbre bacteriana de los bulbos (LaHue et al., 2023). En Uruguay, de acuerdo con Carballo (2005), estas pérdidas disminuyen significativamente con el uso de Hidrazida Maleica (15-30 %) o con su uso durante el almacenamiento en cámara frigorífica (5 %).

Para prolongar la vida útil de las cebollas, Anbukkarasi et al. (2013) propone utilizar técnicas de curado, cortar el cuello de los bulbos de cebolla y aplicar rayos gamma para el almacenamiento. También destacan el uso de reguladores de crecimiento, etileno, compuestos de cycocel y fungicidas, que permiten prolongar la vida útil de los bulbos. De acuerdo con Islam et al. (2019), se realizó un modelo mecanicista dinámico con un R^2 de 99,0 % para el secado y un R^2 de 99,0 % para el almacenamiento.

Este modelo es ideal para describir el comportamiento dinámico de la pérdida de masa de los bulbos de cebolla, ya que tiene en cuenta la pérdida de masa durante la transpiración y la pérdida de masa durante la respiración (**Figura 4**). Durante el curado, los bulbos secados sin follaje verde experimentan una tasa de brotación más alta (35,91 %) que los secados con su follaje (Nabi et al., 2013; Kiran et al., 2024).

Otra técnica implementada, según Petropoulos et al. (2016), para el manejo postcosecha es el almacenamiento a largo plazo para observar cómo influye la incidencia de brotes y raíces, el crecimiento, las pérdidas de agua y los cambios en la composición química (composición mineral, contenido de azúcar, valor nutricional) y la actividad antioxidante (contenido de fenólicos y flavonoides, eliminación de la actividad DPPH). En Corea, se utilizó timol para aumentar la vida útil de las cebollas y es necesario identificar el hongo patógeno. En este caso, la gravedad de la enfermedad producida por *Botritis allii* Munn se redujo hasta un 96 % al fumigar con la solución de timol, en comparación con el control. La eficacia de la fumigación con esta solución se validó en

almacenes a baja temperatura. Por ello, se recomienda para controlar las enfermedades postcosecha en cultivos de almacenamiento a largo plazo a escala comercial (Ji et al., 2018). Sin embargo, de los métodos mencionados, los llamados métodos de curado, secado y refrigeración parecen ser ineficientes en comparación con las tecnologías no térmicas (el tratamiento con ozono, la irradiación y los tratamientos químicos, entre otros), que fomentan la conservación de la calidad del bulbo durante el almacenamiento prolongado. Sería interesante promover el uso de estructuras cuyo monitoreo se realice a través de sensores, según los tiempos (Kiura et al., 2021).

Conclusiones

La cebolla es una hortaliza muy importante para el pueblo dominicano y, en la actualidad, su calidad está influenciada por factores pre cosecha y post cosecha. Existen muchas herramientas que se pueden implementar para estos fines. Esta revisión es un documento base que refleja la escasez de información sobre este cultivo en la República Dominicana, la cuantificación de sus pérdidas, los retos que ha de enfrentar para mantener su calidad y las herramientas con las que puede mejorar. En concreto, para la cebolla que se cultiva en República Dominicana, se plantea la necesidad de abordar los factores que inciden negativamente en el cultivo, así como de incentivar la recolección del cultivo sin una madurez fisiológica adecuada, la incidencia de enfermedades postcosecha y problemas asociados al secado, el almacenamiento y la distribución. De esta forma, se podría producir cebollas de calidad que cumplan la norma NORDOM 584. En el futuro, sería interesante promover el uso de estructuras de almacenamiento modernas e incorporar tecnologías. Estos avances reducirían las pérdidas durante el almacenamiento, proporcionarían cebollas de calidad, mejorarían el suministro e incidirían en el bienestar de los pequeños agricultores de las zonas productoras de cebollas.

Bibliografía

- Alvarado, R. (2023). Producción de ajo y cebolla: el dilema de los altos costos. Periódico el dinero. Extraído de: <https://eldinero.com.do/230857/produccion-de-ajo-y-cebolla-el-dilema-de-los-altos-costos/>
- Anbukkarasi, V., Paramaguru, P., Pugalendhi, L., Ragupathi, N. y Jeyakumar, P. (2013). Estudios sobre tratamientos pre y poscosecha para prolongar la vida útil de la cebolla: una revisión. *Agri. Reviews*. Extraído de: <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ar&volume=34&issue=4&article=002>
- Araya, G. (2022). Guía Técnica de producción de cebollas. Inta ed. San José Costa Rica. Extraído de: https://platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/2021/Cebolla_Edit.pdf
- Batista, J. (2020). Manejo tecnológico del cultivo de cebolla, con énfasis en el manejo integrado de plaga. Centro para el Desarrollo Agropecuario y Ministerio de Agricultura 20 p.
- Benítez Raúl y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. (2016). Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Extraído de: <https://www.fao.org/americas/news/news-detail/pda-benitez/es>
- Castañeda, E. (2018). valorización de desechos de cebolla (*Allium cepa* L.) mediante secado en lecho vibro-fluidizado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 17. DOI:10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2018v17n1/CastanedaE.
- Carballo, S. (2005). Postcosecha de cebolla en Uruguay -INIA. Extraído de: <https://inia.uy/en/Publicaciones/Documentos%20compartidos/18429280509144538.pdf>
- Desarrollo Agropecuario Integral Camino Real -DAIRC. (2022). La postcosecha y la pérdida de alimento, Extraído de: <https://www.cimmyt.org/es/noticias/la-poscosecha-y-la-perdida-de-alimentos/>

Enciso, C., Vera, P., Santacruz, A. y González, J. (2019). Guía técnica del cultivo de cebolla. Universidad Nacional de Asunción y Agencia Internacional de Cooperación del Japón. Disponible en: https://www.jica.go.jp/Resource/paraguay/espanol/office/others/c8h0vm0000ad5gke-att/gt_02.pdf

FAO. (2012). Pérdidas y desperdicio de alimentos en el mundo – Alcance, causas y prevención. Roma. Extraído de: <https://www.fao.org/4/i2697s/i2697s.pdf>

FAO. (2016). Food, losses and wastes in Latin America and the Caribbean, the regional commitment to halve percapita food losses and wastes by 2025. Extraído de: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/5569e764-205c-4165-9251-1cbc78f7e0fb/content>

FAO. (2019). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos. Roma. Extraído de: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/2120f787-5a49-41f5-9fbf4cea98b2c/content#page=35>

FAO. (2022). Hacer frente a la pérdida y el desperdicio de alimentos: una oportunidad de ganar por partida triple. Extraído de: <https://www.fao.org/newsroom/detail/FAO-UNEP-agriculture-environment-food-loss-waste-day-2022/es>

FAOSTAT. (2024). Estadística de hortalizas a nivel mundial y en la República Dominicana. Extraído de: <https://www.fao.org/FAOSTAT/es/#data/QCL>

Feliciano Frías, M. (2019). Desarrollo de tecnologías para la gestión sostenible de la fertirrigación y diagnóstico de enfermedades en los cultivos de hortalizas de exportación: resultados de investigación en fertirriego. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF). Santo Domingo, República Dominicana, DO. 104 p.

Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola – FIDA. (2022). Invertir en la población rural en Haití. Extraído de: https://www.ifad.org/documents/38714170/39972349/haiti_s.pdf/016bcb52-5445-54a9-3c3e4fc73693ec89?t=1667830861836

Fornaris, G. (2012). Cosecha y curado. Conjunto tecnológico para la producción de cebolla. Universidad de Puerto Rico. Extraído de: <https://www.upr.edu/eea/wp-content/uploads/sites/17/2016/03/12.-CEBOLLA-COSECHA-Y-CURADO-G.-Fornaris-v2012.pdf>

Gathambiri, C. W. Owino, W. O., Imathiu., S. and Mbaka, J. N. (2021). Postharvest Losses of Bulb Onion (*Allium Cepa* L.) in Selected Sub-Counties of Kenya. African Journal of Food, Agriculture, Nutrition & Development, 21(2), 17529–17544. DOI:10.18697/ajfand.97.20145.

Instituto de Cooperación para la Agricultura – IICA. (2004). Estudio sobre el mercado de la cebolla en República Dominicana. Extraído de: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/21341>

Instituto Dominicano para la Calidad – INDOCAL. (2003). Nordom 584. Norma para hortalizas, tubérculos y raíces. Cebollas rojas, amarillas y blancas. Extraído de: <https://indocal.gob.do/publicaciones/catalogo-de-normas/>

Instituto Dominicano para la Calidad – INDOCAL. (2012). Nordom 702. Norma sobre el límite máximo de residuos de plaguicidas permitidos para el cultivo y manejo de la cebolla. República Dominicana. Disponible en: <https://indocal.gob.do/publicaciones/catalogo-de-normas/>

INTAGRI. (2017). Atmósferas Controladas y Modificadas en Postcosecha. Serie Postcosecha y Comercialización. Núm. 13. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 5 p. Extraído de: <https://www.intagri.com/articulos/poscosecha-comercializacion/atmosferas-controladas-y-modificadas-en-postcosecha> – Esta información es propiedad intelectual de INTAGRI S.C., Intagri se reserva el derecho de su publicación y reproducción total o parcial.

Islam, M. N., Körner, O., Pedersen, J. S., Sørensen, J. N., and Edelenbos, M. (2019). Analyzing quality and modelling mass loss of onions during drying and storage. *Computers and Electronics in Agriculture*, 164. [DOI:10.1016/j.compag.2019.104865](https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104865).

Ji, S. H., Kim, T. K., Keum, Y. S., and Chun, S. C. (2018). The Major Postharvest Disease of Onion and Its Control with Thymol Fumigation During Low-Temperature Storage. *Mycobiology* 46(3): 242-253. [DOI:10.1080/12298093.2018.1505245](https://doi.org/10.1080/12298093.2018.1505245).

Kiran, P. R., Aradwad, P., T. V., A. K., Nayana N, P., C. S, R., Sahoo, M., Urhe, S. B., Yadav, R., Kar, A., and Mani, I. (2024). A comprehensive review on recent advances in postharvest treatment, storage, and quality evaluation of onion (*Allium cepa*): Current status, and challenges. *Future Postharvest and Food* 1(1), 124–157. [DOI:10.1002/fpf2.12009](https://doi.org/10.1002/fpf2.12009).

Kiura, I. N., Gichimu, B. M., and Rotich, F. (2021). Proximate and nutritional composition of stored bulb onions as affected by harvest and post-harvest treatments. *International Journal of Agronomy*, 1–9. [DOI:10.1155/2021/5532349](https://doi.org/10.1155/2021/5532349).

LaHue, G., Belo, T., and du Toit, L. (2023). Cultural Management Strategies to Reduce the Risk of Onion Bacterial Diseases, *Crops & Soils*, 56, 5, 22-28. [DOI:10.1002/crso.20305](https://doi.org/10.1002/crso.20305).

Medina, J. (2008). Cebolla: guía técnica. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF). Santo Domingo, DO. 64 p.

Méndez, W. (2016). Reporte final de la consultoría Estudio de mercado de la cebolla (*Allium cepa* L.) y sus variedades en la provincia de San Juan. Santo Domingo República Dominicana. Ministerio de Agricultura y BID. Extraído de: <https://agricultura.gob.do/wp-content/uploads/2018/10/Reporte-Final-Cebollas-Revisado5-9-16.pdf>

Ministerio de Economía Planificación y Desarrollo – MEPYD. (2021). Seguimiento de precios agropecuarios en agosto de 2021. Extraído de: <https://mepyd.gob.do/wpcontent/uploads/drive/UAAES/Informes%20%26%20Boletines/Seguimiento%20de%20precios%20agropecuarios/Informe%20de%20precios%20agropecuarios%20AGOSTO%202021.pdf>

Ministerio de Agricultura – MA. (2024). Estadística de producción de cebolla. Extraído de: Reporte-Final-Cebollas-Revisado5-9-16.pdf (agricultura.gob.do)

Ministerio de Turismo de República Dominicana – MITUR. (2024). Estadísticas de llegada de turistas a República Dominicana. Extraído de: <https://mitur.gob.do/>

Nabi, G., Rab, A., Sajid, M., Ullah, F., Abbas, S. J., and Ali, I. (2013). Influence of curing methods and storage conditions on the post-harvest quality of onion bulbs. *Pakistan Journal of Botany* 45(2), 455–460.

Oficina Nacional de Estadística – ONE. (2024). X censo nacional de población y vivienda 2022. Extraído de: <https://www.one.gob.do/publicaciones/2024/informe-general-del-x-censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda-2022/?altTemplate=publicacionOnline>.

Petropoulos, S. A., Ntatsi, G., and Ferreira, I. C. F. R. (2016). Long-term storage of onion and the factors that affect its quality: A critical review. *Food Reviews International*, DOI:10.1080/87559129.2015.1137312.

Redacción OnCuba (2017). Cuba pierde 57 por ciento de los alimentos que produce. Extraído de 23 de mayo en: <https://oncubanews.com/cuba/economia/rendimiento-de-agricultura-cubana-entre-los-mas-bajos-del-continente/#:~:text=Las%20p%C3%A9rdidas%20de%20cosecha%20y,alcanzan%20el%2027%20por%20ciento>

Sahu, S., Sharma, J. P., Burman, R. R., Gills, R., Sinha, S. K., and Pramod Kumar. (2021). Estimation of post-harvest losses of Onion in Maharashtra and Potato in Uttar Pradesh. *Journal of Community Mobilization and Sustainable Development* 16 (3 pp. 1011–1016), 1016–1011.



Shapiro, M., Beckmann, J., Akwii, E., and Broad-Leib E. M. (2021). República Dominicana Recomendaciones-leyes y políticas para la donación de alimentos. Extraído de: https://atlas.foodbanking.org/wp-content/uploads/2023/11/Dominican-Republic-Recommendations_Spn-1.pdf

Vélez-Rodríguez, L., and Vargas, L. (2007). Recent studies of fungal pathogens of onion in Puerto Rico. Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico of 91, 31-45. [DOI:10.46429/jaupr.v91i1-2.2651](https://doi.org/10.46429/jaupr.v91i1-2.2651).

Alimentación Funcional, Calidad Sensorial y Salud

Estudio del efecto de la masticación sobre las propiedades del bolo y la digestibilidad *in vitro* del almidón de pasta a base de legumbres

S. Ribes ^{1*}, M. Arnal ¹, L. Salcedo ¹, y P. Talens ¹

¹ Departamento de Tecnología de Alimentos, Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos – Food UPV, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España

*surillo@upv.es

Resumen

La pasta a base de legumbres es un alimento básico y fácil de preparar con un perfil nutricional y sensorial mejorado en comparación con la pasta convencional, lo que la convierte en un producto excelente para personas mayores. Sin embargo, el envejecimiento va acompañado de cambios en distintas funciones orales y gastrointestinales. Por ello, determinar cómo las alteraciones ora-gastrointestinales modifican la bioaccesibilidad de los nutrientes es crucial para diseñar alimentos para poblaciones específicas. El objetivo de este estudio fue analizar el impacto de la masticación en las propiedades del bolo alimenticio y la digestibilidad *in vitro* del almidón de pasta de lentejas rojas. Cuatro voluntarios con buena salud bucodental prepararon los bolos de pasta, imitando una masticación normal (18 ciclos) y deficiente (9 ciclos). La distribución del tamaño de partícula y las propiedades texturales de los bolos se analizaron mediante tamizado manual en seco y análisis del perfil de textura (TPA), respectivamente. Seguidamente, los bolos se sometieron a una digestión estática *in vitro* simulando las condiciones observadas en adultos y mayores, tal como se describe en los protocolos INFOGEST. La cantidad de azúcares reductores totales liberados por el almidón durante la digestión se determinó mediante el método del ácido dinitrosalicílico (DNS). Los resultados mostraron que los bolos masticados de forma deficiente presentaron mayores proporciones de partículas grandes y eran más duros y cohesivos que los bolos masticados de forma normal. Sin embargo, la masticación no tuvo efectos significativos sobre el contenido de azúcares reductores de la pasta tras la fase oral, mientras que al reproducir los trastornos digestivos gástricos observados en personas senior se obtuvieron mayores cantidades de azúcares reductores. Por último, las cantidades más elevadas de azúcares reductores se obtuvieron al final de la fase intestinal. El presente estudio demuestra que la masticación deficiente influyó en la distribución del tamaño de partícula y en las propiedades texturales de los bolos, mientras que un mayor contenido de azúcares reductores fue observado tras simular la fase gástrica en personas senior. Así pues, el efecto de la masticación y la digestión en la bioaccesibilidad de los nutrientes de los alimentos es esencial para desarrollar productos con funcionalidades mejoradas para las personas senior.

Palabras clave: alimentos de origen vegetal; masticación; digestión *in vitro*; digestibilidad del almidón; personas senior

Studying the effect of mastication on bolus properties and *in vitro* starch digestibility of pulse-based pasta

Abstract

Pulse-based pasta is an easy-to-prepare staple with an enhanced nutritional and sensory profile compared to conventional pasta, making it an excellent product for seniors. However, it is well-known that ageing is accompanied by changes in different oral and gastrointestinal functions. Elucidating how oral and gastrointestinal impairments modify nutrient bioaccessibility is crucial to design foods for specific populations. This study aimed to analyse the impact of mastication on bolus properties and *in vitro* starch digestibility of commercial red lentil pasta. Pasta boluses were prepared by four volunteers with good oral health, imitating a normal (18 cycles) and a deficient (9 cycles) mastication. The particle size distribution and textural properties of pasta boluses were analysed by manual dry sieving and Texture Profile Analysis (TPA), respectively. Boluses were then subjected to static *in vitro* digestion of both adults and older adults as described in the INFOGEST protocols. The amount of total reducing sugars released from starch during digestion was determined by dinitrosalicylic acid (DNS) method. Results showed that deficient masticated pasta boluses exhibited greater proportions of large particles and were harder and more cohesive than normal chewed boluses. Nonetheless,

chewing had no significant effect on the reducing sugars content of pasta after the oral phase, whereas higher amounts of reducing sugars were reported when reproducing the gastric digestive disorders commonly found in seniors. Finally, the highest amounts of reducing sugars were found at the end of the intestinal phase. The current study demonstrates that impaired mastication influenced the particle size distribution and texture properties of pasta boluses, while impaired gastric digestion increased the reducing sugars content of red lentil pasta. Such understanding of the effect of mastication and digestion on the nutrient bioaccessibility of foods is essential to develop products with enhanced functionalities for seniors.

Keywords: plant-based foods; mastication; *in vitro* digestion; starch digestibility; senior

Introducción

Actualmente, la población mundial es tres veces mayor que en el siglo XX y podría pasar de 8.500 millones en 2030 a 9.700 millones en 2050. Sin embargo, en la última década se ha observado una marcada evolución demográfica debido al aumento de la esperanza de vida y la disminución de la mortalidad. En este sentido, se estima que el número de personas mayores de 65 años pase de 727 millones en 2020 a 1.500 millones en 2050 (Naciones Unidas, 2020).

La nutrición se considera un factor clave para promover un envejecimiento saludable, ya que durante la vejez se producen muchos cambios fisiológicos, como el deterioro bucal, la pérdida de masa muscular y alteraciones gastrointestinales (Arazo-Rusindo *et al.*, 2023; Hernández-Olivas *et al.*, 2023). En este sentido, las legumbres son una buena fuente de almidón digerible, proteínas, fibra, minerales y compuestos bioactivos (Diujsens *et al.*, 2023), lo que las convierte en un producto excelente para las personas mayores. A pesar de ello, su consumo sigue siendo bajo debido a los excesivos problemas intestinales que provocan (Conti *et al.*, 2021; Diujsens *et al.*, 2023). Una alternativa a las legumbres convencionales puede ser la pasta a base de legumbres, un alimento básico y fácil de preparar con un perfil nutricional y sensorial mejorado comparado con la pasta convencional (García-Valle *et al.*, 2021). Sin embargo, estos beneficios nutricionales podrían verse especialmente limitados en las personas mayores debido a los cambios en el proceso de masticación, así como en determinados parámetros gastrointestinales (Blanquet-Diot *et al.*, 2021; Hernández-Olivas *et al.*, 2021).

En los últimos años, se ha observado una creciente demanda de productos con textura modificada que cubren las capacidades oro-gastrointestinales de poblaciones específicas (Assad-Bustillos *et al.*, 2020, Gallego *et al.*, 2023; Lorieau *et al.*, 2018; Ribes *et al.*, 2022). Determinar cómo las alteraciones orales y gastrointestinales modifican la bioaccesibilidad de los nutrientes es crucial para diseñar estos nuevos alimentos. Por ello, el objetivo de este estudio fue analizar el impacto de la masticación en las propiedades mecánicas del bolo alimenticio y en la digestibilidad de los carbohidratos de pasta de lentejas rojas.

Materiales y Métodos

Materiales y reactivos

La pasta comercial utilizada en este estudio se elaboró con un 100% de harina de lenteja roja (Andriani Spa, Bari, Italia). La composición nutricional de la pasta utilizada es: 1,7% de grasa, 50,0% de carbohidratos, 7,6% de fibra dietética, 26,0% de proteínas y <0,01% de sal.

Las enzimas digestivas usadas en el estudio (α -amilasa salival (A1031) de saliva humana, pepsina (P7012) de mucosa gástrica porcina, pancreatina (P7545) de páncreas porcino y extracto biliar porcino (B8631)) y el ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) fueron suministrados por Sigma-Aldrich Co. (St. Louis, MO, EE. UU.). El resto de los reactivos fueron adquiridos en Scharlab, S. L. (Barcelona, España).

Cocción de la pasta

La pasta fue cocida en agua destilada (proporción 1:20, p/v) siguiendo las indicaciones del proveedor. Tras la cocción, la pasta se escurrió con un colador y se dejó enfriar durante 5 min para su posterior análisis. Se prepararon dos lotes diferentes de pasta.

Preparación y caracterización de los bolos

Los bolos empleados en este estudio fueron elaborados por cuatro voluntarios (tres mujeres y un varón) con edades comprendidas entre los 20 y los 50 años, buena salud oral y dentición natural. Para preparar los bolos, los voluntarios masticaron $6,0 \pm 0,1$ g de pasta y escupieron el bolo cuando sintieron la necesidad de tragar. Este tipo de masticación fue denominada masticación normal (MN) y el número medio de ciclos fue de 18. Después, para obtener los bolos masticados de manera deficiente (MD) se redujo el número medio de masticaciones registrado al obtener los bolos mediante MN un 50%.

Los bolos de pasta se caracterizaron en base a la distribución del tamaño de partícula y textura. Así pues, la evaluación granulométrica de los bolos se realizó mediante tamizado manual en seco siguiendo el protocolo descrito por Blanquet-Diot *et al.* (2021), con pequeñas modificaciones. Los bolos se colocaron en una malla de nylon de 0,1 mm y se enjuagaron con agua con la finalidad de eliminar restos de saliva. A continuación, se secaron en estufa a 37 °C durante 30 min y las partículas secas se vertieron sobre una columna de 11 tamices ordenados de mayor a menor tamaño de poro (10-0,125 mm). Los resultados se expresaron tal como indica Blanquet-Diot *et al.* (2021). Se realizaron 8 repeticiones por cada tipo de masticación.

La textura de los distintos bolos se determinó con un ensayo de doble compresión (TPA) empleando un texturómetro TA-TX2 (Stable Micro Systems, Surrey, UK), equipado con una célula de carga de 25 kg (Ribes *et al.*, 2023). Se utilizó una sonda cilíndrica de 20 mm y cada bolo se comprimió hasta el 70% a una velocidad de 3 mm/s. Finalmente, se calcularon los parámetros del TPA (dureza, adhesividad y cohesividad) utilizando el software Exponent (Stable Micro Systems Ltd.). Se utilizaron 24 bolos por cada tipo de masticación.

Digestión in vitro

En este trabajo, se usaron cuatro modelos de digestión oro-gastrointestinal: i) Masticación Normal-Digestión Normal (MN-DN); ii) Masticación Deficiente-Digestión Normal (MD-DN); iii) Masticación Normal-Digestión Senior (MN-DS); y iv) Masticación Deficiente-Digestión Senior (MD-DS). Para simular la digestión gastrointestinal de adultos sanos y seniors, se utilizó el protocolo estandarizado INFOGEST (Brodkorb *et al.*, 2019; Menard *et al.*, 2023), con ligeras modificaciones. En este caso, se emplearon bolos *in vivo* preparados según lo descrito en la sección 3 de materiales y métodos. Los bolos se enjuagaron ligeramente con agua para descartar la saliva humana, se escurrieron y secaron durante 5 min a 37 °C y se transfirieron a tubos falcon hasta su posterior uso.

Los ensayos de digestión se realizaron por duplicado, a 37 °C y en agitación continua (40 rpm), utilizando una estufa (JP Selecta, S.A., Barcelona, España) y un agitador rotativo (Intell-Mixer™ RM-2, ELMi Ltd., Riga, Letonia). Una vez finalizada la fase gástrica, se extrajo una alícuota de 1 mL de cada tubo previamente ajustada a pH 7 con NaOH (1 M) para frenar la actividad enzimática. Tras la fase intestinal, las muestras se sometieron a shock térmico (98 °C durante 5 min) para parar las reacciones enzimáticas y se enfriaron inmediatamente con hielo. También se prepararon blancos de la digestión que contenían fluidos simulados, enzimas y sales biliares, sin pasta. Por último, todas las muestras se centrifugaron ($8000 \times g$, 4 °C, 10 min) y los sobrenadantes se almacenaron a -20 °C para las siguientes determinaciones.

Digestibilidad de carbohidratos

Con el objetivo de conocer la digestibilidad de los carbohidratos de las muestras, se determinó la concentración de azúcares reductores basándose en el método propuesto por Miller (1959). Brevemente, se mezclaron 50 µL de cada muestra digerida con 500 µL de solución DNS, se calentaron a 98 °C durante 5 min, y se enfriaron inmediatamente en un baño de hielo antes de añadir 4,5 mL de

agua destilada. A continuación, se agitaron las muestras en un vórtex y se midió la absorbancia a 540 nm en un espectrofotómetro UV-Visible (Cary 60 UV-Vis, Agilent, Estados Unidos). Los datos se expresaron como mg de D-glucosa/g de muestra (base seca, b.s.).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron estadísticamente con el programa Statgraphics Centurion XVIII (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, VA, EE. UU) y se presentaron como media \pm desviación estándar. Para estudiar las diferencias entre la distribución del tamaño de partícula de los bolos se utilizó la prueba ANOVA de medidas repetidas de una vía, seguida del test *post-hoc* de Tukey-Kramer para las comparaciones de medias. Además, se realizó un ANOVA simple, seguido del test *post-hoc* de Tukey-Kramer para las comparaciones de medias, con el objetivo de determinar las diferencias entre el d_{50} de los bolos (MN y MD), la textura de los bolos y la digestibilidad de las muestras bajo diferentes modelos de digestión. El nivel de significación estadística se estableció en $p < 0,05$.

Resultados y Discusión

Propiedades granulométricas de los bolos

Durante el procesado oral de los alimentos, se produce la fragmentación de estos, siendo uno de los principales factores que permiten reducir su tamaño. La **Figura 1** presenta la distribución del tamaño de partícula y los valores d_{50} de los diferentes bolos de pasta con MN y MD.

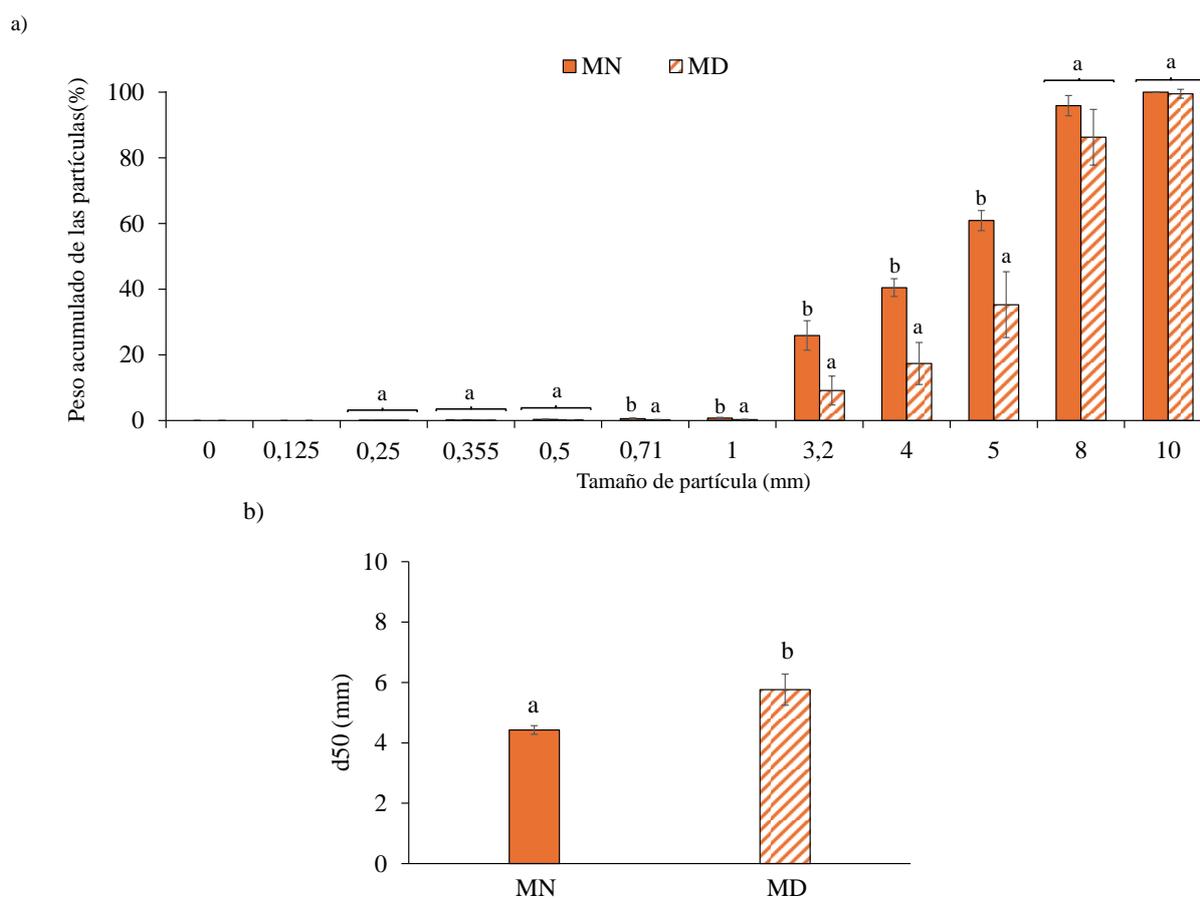


Figura 1. Distribución del tamaño de partícula de todos los bolos tras la masticación normal (MN) y deficiente (MD) (a). d_{50} (en mm) de todos los bolos tras la masticación normal y deficiente (b). Los valores se presentan como media ($n = 8$) \pm desviación estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los bolos de pasta.

Tal y como se observa en la **Figura 1a**, los bolos de pasta obtenidos mediante MN presentaron un menor contenido de partículas grandes en comparación con los bolos con MD. En cuanto al d_{50} , los valores de bolos de pasta obtenidos mediante MN fueron significativamente inferiores a los presentados por los bolos con MD (**Figura 1b**). Esto último sugiere la formación de bolos poco fragmentados en los productos masticados de forma deficiente. Así pues, los bolos producidos por personas senior suelen contener una mayor proporción de partículas grandes y una menor fragmentación estructural, siendo más marcado en personas que utilizan dentaduras postizas (Peyron *et al.*, 2018).

Textura de los bolos

La masticación y la insalivación son cruciales en la textura de los bolos durante el procesado oral (Pu *et al.*, 2021). En la **Tabla 1** se presentan los parámetros de textura de bolos con MN y MD. Los resultados obtenidos muestran que la dureza de los bolos difirió significativamente en función del tipo de masticación realizada. En este sentido, los bolos con MD fueron más duros y cohesivos que los bolos obtenidos tras una MN, lo que podría atribuirse al menor número de ciclos realizados durante el proceso de masticación y a la menor saliva incorporada. Diferentes estudios han reportado la formación de bolos más duros en poblaciones con deficiencias orales, lo que podría dificultar el proceso de deglución y empeorar con la ausencia de saliva (Peyron *et al.*, 2018).

En cuanto a la adhesividad, los bolos obtenidos tras una MN presentaron menores valores de adhesividad que los bolos con MD. Esta diferencia podría atribuirse al impacto mecánico de la masticación y a la incorporación de saliva (Muñoz-Núñez *et al.*, 2023; Pu *et al.*, 2021).

Finalmente, en cuanto a la cohesividad, los bolos de pasta obtenidos tras una MD mostraron una mayor cohesividad que los bolos con MN, lo que concuerda con los resultados reportados por Peyron *et al.* (2021) en su estudio sobre la textura de los bolos de salchichas de cerdo masticadas de forma normal y deficiente.

Tabla 1. Textura de bolos de pasta obtenidos mediante MN y MD. Los valores se indican como media ($n = 24$) \pm desviación estándar.

Muestra	Dureza (N)	Adhesividad (N·s)	Cohesividad (%)
MN	11 \pm 2 ^a	- 0.015 \pm 0.095 ^b	43 \pm 3 ^b
MD	15 \pm 3 ^b	- 0.001 \pm 0.000 ^c	49 \pm 3 ^c

Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los bolos de pasta. MN: Masticación normal; MD: Masticación deficiente.

Digestibilidad de carbohidratos

La hidrólisis del almidón empieza con el procesado oral de los alimentos gracias a la actividad de la α -amilasa salival, y se mantiene hasta el inicio de la fase gástrica (Blanquet-Diot *et al.*, 2021; Freitas *et al.*, 2018).

La **Figura 2** presenta los resultados del contenido de azúcares reductores de las muestras de pasta tras simular la digestión oro-gastrointestinal de adultos y personas senior. Los datos obtenidos mostraron un aumento del contenido de azúcares reductores a medida que avanzaba la digestión. Sin embargo, la masticación no tuvo un efecto significativo en el contenido de azúcares reductores de la pasta tras la fase oral. Cabe destacar que, durante la cocción, el almidón se gelatiniza, permitiendo la acción de la amilasa salival debido al hinchamiento, la pérdida de estructura cristalina y el engrosamiento de la matriz (Giuberti *et al.*, 2015). Tras la fase gástrica, se observaron mayores cantidades de azúcares reductores al simular los trastornos digestivos reportados en personas mayores. Estos resultados podrían atribuirse a la duración de esta fase (3 h en lugar de 2 h) y al pH ligeramente superior empleado (pH 3,7 en lugar de 3,0). Además, cabe señalar que la actividad de la α -amilasa se pierde por debajo de pH 3,5, pero su actividad óptima es cercana al 50% a pH 4. Por último, el mayor contenido de azúcares reductores observado al final de la fase intestinal podría explicarse por la actividad de la α -amilasa pancreática (Freitas *et al.*, 2018). Estos resultados concuerdan con lo observado por otros

autores al estudiar la digestibilidad *in vitro* de pasta elaborada con harina de lentejas (Duijsens *et al.*, 2023).

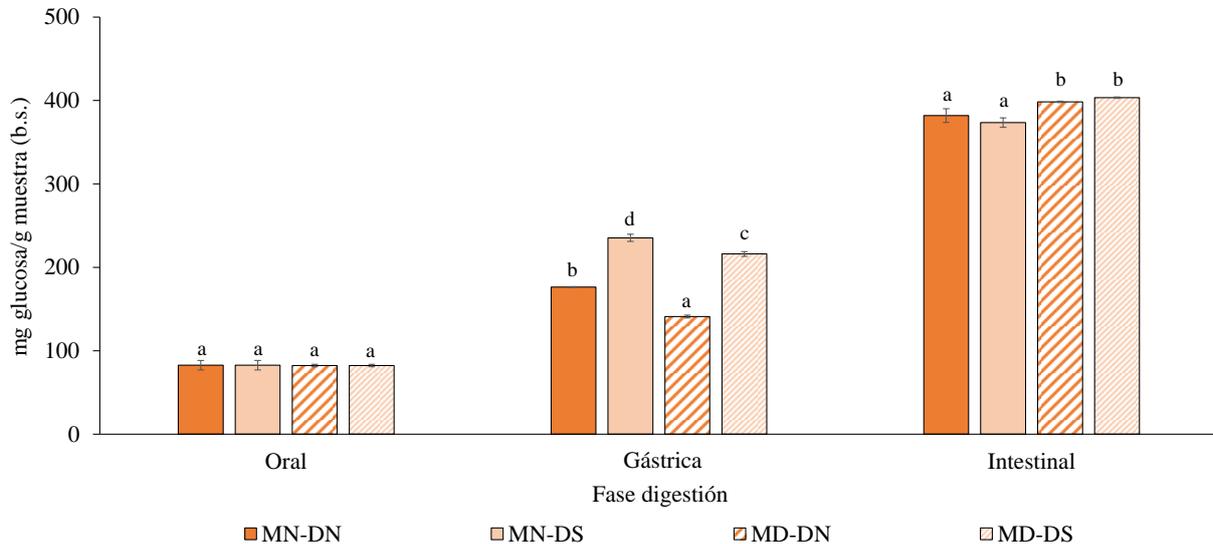


Figura 2. Contenido de azúcares reductores de las muestras de pasta tras simular la digestión oro-gastrointestinal de adultos y personas senior. Los valores se presentan como media ($n = 3$) \pm desviación estándar. Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los bolos de pasta. Masticación Normal-Digestión Normal (MN-DN); Masticación Deficiente-Digestión Normal (MD-DN); Masticación Normal-Digestión Senior (MN-DS); y Masticación Deficiente-Digestión Senior (MD-DS).

Conclusiones

El presente estudio demuestra que el deterioro de la masticación impactó de forma negativa en la distribución del tamaño de partícula y en las propiedades texturales de los bolos de pasta, mientras que la simulación de las condiciones digestivas comúnmente observadas en las personas senior aumentaron el contenido de azúcares reductores al final de la fase gástrica.

Estos resultados proporcionan información útil sobre el efecto del procesado oral de los alimentos en las propiedades mecánicas de los bolos y la bioaccesibilidad de los nutrientes en adultos y personas senior con diferentes capacidades orales, abriendo nuevas vías para diseñar alimentos a base de legumbres.

Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda a “Primeros Proyectos de Investigación (PAID-06-23)” del Vicerrectorado de Investigación de la Universitat Politècnica de València.

Bibliografía

Arazo-Rusindo, M., Reaño, G., Pérez-Bravo, F., Castillo-Valenzuela, O., Benavides-Valenzuela, S., Zúñiga, R.N., Mariotti-Celis, M.S., 2023. Redesign of an Instant Legume Soup for Older Adults with Increased Micronutrients Bioaccessibility and Adequate Sensory Attributes by Using Encapsulation. *LWT*. 180, e114676. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114676>

Assad-Bustillos, M., Tournier, C., Palier, J., Septier, C., Feron, G., Della Valle, G., 2020. Oral Processing and Comfort Perception of Soft Cereal Foods Fortified with Pulse Proteins in the Elderly with Different Oral Health Status. *Food Funct*. 11, 4535–4547. <https://doi.org/10.1039/C9FO02993A>

- Blanquet-Diot, S., François, O., Denis, S., Hennequin, M., Peyron, M.A., 2021. Importance of Oral Phase in *In Vitro* Starch Digestibility Related to Wholegrain versus Refined Pastas and Mastication Impairment. *Food Hydrocoll.* 112, e106277. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106277>
- Brodkorb, A., Egger, L., Alminger, M., Alvito, P., Assunção, R., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu-Lacanal, C., Boutrou, R., Carrière, F., et al., 2019. INFOGEST Static *In Vitro* Simulation of Gastrointestinal Food Digestion. *Nat. Protoc.* 14, 991–1014. <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0119-1>
- Conti, M.V., Guzzetti, L., Panzeri, D., de Giuseppe, R., Coccetti, P., Labra, M., Cena, H., 2021. Bioactive Compounds in Legumes: Implications for Sustainable Nutrition and Health in the Elderly Population. *Trends Food Sci. Technol.* 117, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.072>
- Duijsens, D., Alfie Castillo, A.I., Verkempinck, S.H.E., Pälchen, K., Hendrickx, M.E., Grauwet, T., 2023. *In Vitro* Macronutrient Digestibility and Mineral Bioaccessibility of Lentil-Based Pasta: The Influence of Cellular Intactness. *Food Chem.* 423, e136303. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136303>
- Freitas, D., Le Feunteun, S., Panouillé, M., Souchon, I., 2018. The Important Role of Salivary α -Amylase in the Gastric Digestion of Wheat Bread Starch. *Food Funct.* 9, 200–208. <https://doi.org/10.1039/C7FO01484H>
- Gallego, M., Ribes, S., Grau, R., Talens, P., 2023. Food matrix impact on rheological and digestive properties of protein-enriched and texture-modified mushroom creams. *Food Hydrocoll.*, 135, e108143. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108143>
- García-Valle, D.E., Bello-Pérez, L.A., Agama-Acevedo, E., Alvarez-Ramírez, J., 2021. Structural Characteristics and *In Vitro* Starch Digestibility of Pasta Made with Durum Wheat Semolina and Chickpea Flour. *LWT.* 145, e111347. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111347>
- Giuberti, G., Gallo, A., Cerioli, C., Fortunati, P., Masoero, F., 2015. Cooking Quality and Starch Digestibility of Gluten Free Pasta Using New Bean Flour. *Food Chem.* 175, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.11.127>
- Hernández-Olivas, E., Muñoz-Pina, S., Andrés, A., Heredia, A., 2021. Age-Related Gastrointestinal Alterations of Legumes and Cereal Grains Digestibility. *Food Biosci.* 41, e101027. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101027>
- Hernández-Olivas, E., Muñoz-Pina, S., Andrés, A., Heredia, A., 2023. The Impact of Age-Related Digestive Disorders on *In Vitro* Digestibility of Macronutrients and Bioaccessibility of Minor Components of Chia Seeds. *Food Res. Int.* 169, e112874. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112874>
- Lorieau, L., Septier, C., Laguerre, A., Le Roux, L., Hazart, E., Legneul, A., et al., 2018. Bolus quality and food comfortability of model cheeses for the elderly as influenced by their texture. *Food Res. Int.* 11, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.013>
- Menard, O., Lesmes, U., Shani-Levi, C.S., Araiza Calahorra, A., Lavoisier, A., Morzel, M., Rieder, A., Feron, G., Nebbia, S., Mashiah, L., et al., 2023. Static *In Vitro* Digestion Model Adapted to the General Older Adult Population: An INFOGEST International Consensus. *Food Funct.* 14, 4569–4582. <https://doi.org/10.1039/D3FO00535F>
- Miller, G.L., 1959. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. *Anal. Chem.* 31, 426–428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
- Muñoz-Núñez, M., Laguna, L., Tárrega, A., 2023. What Is the Food like That People Choke on? A Study on Food Bolus Physical Properties under Different *In Vitro* Oral Capacities. *Food Res. Int.* 165, 112474. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112474>

Peyron, M.A., Santé-Lhoutellier, V., François, O., Hennequin, M., 2018. Oral Declines and Mastication Deficiencies Cause Alteration of Food Bolus Properties. *Food Funct.* 9, 1112–1122. <https://doi.org/10.1039/C7FO01628J>

Peyron, M.A., Sayd, T., Sicard, J., Mirade, P.S., Pinguet, J., Chambon, C., Santé-Lhoutellier, V., 2021. Deciphering the Protein Digestion of Meat Products for the Elderly by *In Vitro* Food Oral Processing and Gastric Dynamic Digestion, Peptidome Analysis and Modeling. *Food Funct.* 12, 7283–7297. <https://doi.org/10.1039/D1FO00969A>

Pu, D., Duan, W., Huang, Y., Zhang, L., Zhang, Y., Sun, B., Ren, F., Zhang, H., Tang, Y., 2021. Characterization of the Dynamic Texture Perception and the Impact Factors on the Bolus Texture Changes during Oral Processing. *Food Chem.* 339, e128078. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128078>

Ribes, S., Grau, R., Talens, P., 2022. Use of chia seed mucilage as a texturing agent: Effect on instrumental and sensory properties of texture-modified soups. *Food Hydrocoll.* 123, e107171. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107171>

Ribes, S., Arnal, M., Talens, P., 2023. Influence of Food Oral Processing, Bolus Characteristics, and Digestive Conditions on the Protein Digestibility of Turkey Cold Meat and Fresh Cheese. *Food Res. Int.* 173, e113297. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113297>

United Nations World Population Prospects. 2022. Available online: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf (accessed on 22 July 2024).

Digestibilidad proteica y bioaccessibilidad del hierro de harinas de frijol negro hidrolizadas con un extracto de subproductos de la piña

M. Arnal¹, L.P. Flores-Prado¹, A.S. Hernández-Cázares², L. Mora³ y P. Talens¹

¹ Instituto Universitario de Ingeniería de los Alimentos - FoodUPV, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España. Email: miarsa@upv.es

² Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, Carretera Federal Córdoba-Veracruz km. 348, Amatlán de los Reyes, 94946 Veracruz, México.

³ Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos (CSIC), Avenida Agustín Escardino 7, 46980, Paterna (Valencia), España.

Resumen

La hidrólisis enzimática de las proteínas de las legumbres puede ser una alternativa para mejorar sus propiedades nutricionales. Para ello, se suelen utilizar enzimas como la bromelina, extraída de la piña. Sin embargo, se ha visto que extractos procedentes de sus subproductos también tienen una actividad proteolítica significativa pudiendo ser una alternativa más sostenible. El objetivo del estudio fue determinar la digestibilidad proteica y la bioaccessibilidad del hierro de una harina de frijol negro hidrolizada con un extracto de la corona de la piña y comparar los resultados con harina hidrolizada utilizando una disolución de bromelina comercial. En primer lugar, se hidrolizaron las harinas con el extracto y la disolución de bromelina durante 6 h a 37 °C, obteniendo un grado de hidrólisis del 10 y 15 %, respectivamente. Paralelamente, se preparó una harina control con agua. Para determinar la digestibilidad proteica y la bioaccessibilidad del hierro, las harinas se sometieron a una digestión gastrointestinal *in vitro* (DGI) siguiendo el protocolo INFOGEST, y se midió el grado de hidrólisis de las proteínas y el hierro total del sobrenadante obtenido tras la DGI. Además, se determinó el contenido en inhibidores de tripsina (IT) y el contenido en taninos de las harinas por su posible relación con el objetivo del estudio. Los resultados obtenidos mostraron que tanto la digestibilidad proteica como la bioaccessibilidad del hierro no cambiaron con la hidrólisis previa de las harinas. Sin embargo, se observó un aumento del contenido en IT y taninos. Además, no se observaron diferencias entre los resultados obtenidos con el extracto y con la bromelina comercial, lo que es muy interesante por la aplicación que se le puede dar al extracto, contribuyendo a la reducción de residuos y a su mejor aprovechamiento.

Palabras clave: subproductos, piña, bromelina, hidrólisis, legumbres.

Protein digestibility and iron bioaccessibility of black bean flour hydrolysed with a pineapple by-product extract

Abstract

Enzymatic hydrolysis of legume proteins can be an alternative to improve their nutritional properties. Enzymes such as bromelain, extracted from pineapple, are often used for this purpose. However, extracts from by-products have also been shown to have significant proteolytic activity and maybe a more sustainable alternative. The aim of the study was to determine the protein digestibility and iron bioaccessibility of black bean flour hydrolysed with a pineapple crown extract and to compare the results with the flour hydrolysed using a commercial bromelain solution. First, the flours were hydrolysed with the extract and the bromelain solution for 6 h at 37 °C, obtaining a degree of hydrolysis of 10 and 15 %, respectively. In parallel, a control flour was prepared with water. To determine protein digestibility and iron bioaccessibility, the meals were subjected to *in vitro* gastrointestinal digestion (GID) following the INFOGEST protocol, and the degree of protein hydrolysis and total iron in the supernatant obtained after GID were measured. In addition, the trypsin inhibitor (TI) and tannin content of the flours were determined for their possible relationship with the objective of the study. The results obtained showed that both protein digestibility and iron bioaccessibility did not change with prior hydrolysis of the flours. However, an increase in TI and tannin content was observed. Furthermore, no differences were

observed between the results obtained with the extract and with commercial bromelain, which is very interesting for the potential application of the extract, contributing to the reduction of waste and its better utilization.

Keywords: by-products, pineapple, bromelain, hydrolysis, legumes.

Introducción

El frijol negro (*Phaseolus vulgaris*) es una legumbre que pertenece a la familia *Fabaceae*, también conocida como *Leguminosae* (FAO, 2016). Cabe destacar su gran valor nutricional por su bajo contenido en grasas (Amoah *et al.*, 2023) y su contenido en hidratos de carbono complejos, fibra, micronutrientes, y proteínas, las cuales son nutricionalmente completas cuando se complementan con cereales (Staniak *et al.*, 2014). Sin embargo, son menos digestibles que las proteínas de origen animal debido a su estructura y a la presencia de antinutrientes como los inhibidores de tripsina, los taninos o el ácido fítico (Bessada *et al.*, 2019). Estos compuestos pueden reducirse mediante tratamientos sencillos como el remojo, la cocción y el descascarillado, o mediante técnicas como la germinación o la fermentación (Rahate *et al.*, 2021). Sin embargo, una alternativa menos habitual es la hidrólisis enzimática de sus proteínas que, tal como muestra la bibliografía, puede mejorar sus propiedades nutricionales y funcionales (Gouseti *et al.*, 2023; Mookerjee and Tanaka, 2023). Para dicho fin, a nivel comercial hay disponibles un gran número de proteasas que pueden ser de origen animal, vegetal o microbiano. Entre las de origen vegetal, una de las más utilizadas es la bromelaina que se extrae del tallo o del fruto de la piña (Gouseti *et al.*, 2023). Sin embargo, se ha visto que extractos procedentes de subproductos del fruto también tienen una actividad proteolítica significativa pudiendo ser una alternativa más sostenible (Ketnawa *et al.*, 2012). Por todo ello, el objetivo del estudio fue determinar la digestibilidad proteica y la bioaccesibilidad del hierro de una harina de frijol negro hidrolizada utilizando un extracto enzimático de la corona de la piña y comparar los resultados con la harina hidrolizada con una disolución de bromelina comercial con la misma actividad enzimática.

Materiales y Métodos

Materias primas y reactivos

Para la obtención de harina se emplearon frijoles negros (*Phaseolus vulgaris*) de origen mexicano adquiridos en una tienda online. Para la hidrólisis de éstas, se empleó por una parte un extracto rico en bromelina procedente de coronas de piñas (*Ananas comosus*) y por otra, una disolución de bromelina 2000 de Cygyc Biocon, S.L. (Les Franqueses del Vallès, Barcelona, España). Las piñas de la variedad Extra Sweet con un pH promedio de 3,4 y unos °Brix de 13.3 fueron adquiridas en el supermercado Alcampo (Alboraya, Valencia, España).

Los reactivos empleados para la digestión gastrointestinal *in vitro* fueron: α -amilasa pancreática porcina, extracto de bilis bovino, pancreatina de páncreas bovino y pepsina de mucosa gástrica porcina de Sigma Aldrich, Co. (St Louis, MO, USA); y, por otro lado, cloruro de calcio dihidratado, cloruro de sodio, cloruro de potasio, cloruro de magnesio hexahidratado, bicarbonato de sodio, carbonato de amonio y fosfato monopotásico de Scharlau Chemie, S.A. (Sentmenat, Barcelona, España).

Por otra parte, para las distintas determinaciones, se utilizaron los siguientes reactivos: ácido tánico, ácido trinitrobenzenosulfónico (TNBS), carbonato de sodio, dodecilsulfato sódico (SDS), N-benzoil-arginina-p-nitroanilida (BAPNA), L-leucina y tripsina de páncreas bovino de Sigma-Aldrich, Co. (St Louis, MO, USA); dimetilsulfóxido (DMSO), fosfato de sodio y tris(hidroximetil)aminometano de Scharlau Chemie, S.A. (Sentmenat, Barcelona, España); y el reactivo de Folin-Ciocalteu de PanReac AppliChem (Castellar del Vallès, Barcelona, España). Todos los reactivos utilizados fueron de grado analítico.

Obtención del extracto rico en bromelina

Para la obtención del extracto acuoso rico en bromelina, se cortó la corona de la piña en trozos pequeños y se mezclaron con agua fría en proporción 1:1 (g/mL). Dicha mezcla se homogenizó durante 10 min en un Stomacher (BagMixer 400, Interscience, France). Seguidamente, la fracción

líquida de la mezcla se centrifugó durante 20 min a 8000 g, 4 °C. Finalmente, se tomó el sobrenadante recogido y se midió su actividad enzimática, siendo de 9,8 U/mL.

Obtención de las harinas hidrolizadas de frijol negro

Las harinas hidrolizadas de frijol negro se obtuvieron mezclando la harina de frijol negro en una proporción 1:3 (g:mL) con el extracto acuoso de la corona de piña o, paralelamente para comparar los resultados, con una disolución de bromelina comercial con la misma actividad enzimática. A continuación, se incubaron las muestras con agitación durante 6 h a 37 °C. A su vez, se realizó el mismo proceso con agua como control. Una vez finalizado el periodo de incubación, para inactivar las enzimas y cocer las harinas, se introdujeron en un baño con agua a 95°C durante 1 h. Finalmente, las harinas se liofilizaron y molieron hasta un tamaño de partícula menor a 0.4 mm.

Determinación del grado de hidrólisis proteica de las harinas hidrolizadas de frijol negro

El grado de hidrólisis proteica (GH) se define como la proporción de enlaces peptídicos que se han roto durante la hidrólisis (Rutherford, 2010). Para su determinación, se midieron el número total de enlaces peptídicos y el número de enlaces peptídicos hidrolizados a través de la determinación de los grupos amino libres. Los resultados se expresaron en porcentaje siguiendo la Ecuación 1.

$$GH (\%) = [(h-h_0)/(h_{tot}-h_0)] \times 100 \quad (1)$$

Siendo h_0 , h y h_{tot} la concentración de grupos amino libres, antes y después de la hidrólisis, y tras la hidrólisis completa de la muestra, respectivamente.

Para determinar el número total de enlaces peptídicos se realizó una hidrólisis total con ácido HCl 6 M, y para la determinación del número de enlaces peptídicos hidrolizados, se prepararon suspensiones de harina de frijol negro en agua bidestilada al 1% (p/p). A continuación, se determinaron los grupos amino libres con el método del TNBS descrito por Adler-Nissen (1979). Para ello, a 40 μ L de muestra se le añadieron 320 μ L de tampón fosfato de sodio 0,2 M con un pH de 8,2 y 320 μ L de TNBS al 0,1 % (v/v). A continuación, se agitaron las muestras y se incubaron a 50 °C durante 1 h. Tras el período de incubación, se adicionaron 640 μ L de HCl 0,1 N y se dejó reposar durante 30 min a temperatura ambiente. Tras dicho reposo, se leyó la absorbancia con un espectrofotómetro (VANTASTAR, BMG Labtech, Ortenberg, Alemania) a 340 nm. Finalmente, se utilizó una recta patrón de L-leucina (1-5 mM) para expresar los resultados en mg de L-leucina/g muestra seca.

Determinación del contenido en inhibidores de tripsina y taninos en las harinas hidrolizadas de frijol negro

Para la determinación del contenido en inhibidores de tripsina (IT) se siguió el método definido por Ma *et al.* (2011) con algunas modificaciones. Para la extracción, se añadieron 0,2 g de harina de frijol negro y 10 mL de NaOH 0,008 N en tubos de 15 mL y se agitaron durante 3 h controlando el pH para que estuviera entre 8,4 y 10. A continuación, los tubos se centrifugaron durante 10 min a 8000 g y, seguidamente, se tomó el sobrenadante. Para determinar el contenido en IT se empleó como sustrato el BAPNA, el cual se preparó disolviendo 40 mg de BAPNA en 1 mL de DMSO y se diluyó con tampón Tris 0,05 M, pH 8,2 precalentado a 37 °C hasta 100 mL. Por otra parte, se disolvieron 10 mg de tripsina en 0,5 L de HCl 1 mM para obtener la solución estándar de tripsina. Asimismo, se prepararon las diferentes muestras necesarias para la determinación: un blanco (B) con 0,4 mL de agua bidestilada; un estándar (E) con 0,4 mL de agua bidestilada y 0,4 mL de disolución estándar de tripsina; un blanco de muestra (BM) con 0,2 mL de agua bidestilada y 0,2 mL de muestra; y la muestra (M) con 0,2 mL de agua bidestilada, 0,2 mL de muestra y 0,4 mL solución estándar de tripsina. Posteriormente, se precalentaron durante 10 min en un baño a 37 °C. Tras dicha incubación, se les añadió 1 mL de sustrato BAPNA, calentado previamente a 37 °C, y se volvieron a introducir durante otros 10 min en el baño a 37 °C. Por último, se les añadió 0,2 mL de ácido acético al 30 % (v/v) a todas las muestras, y, adicionalmente, al blanco y al blanco de la muestra 0,4 mL de solución estándar de tripsina. Los tubos se centrifugaron durante 10 min a 8000 g, se recogieron los sobrenadantes y se llevó a cabo la lectura de la absorbancia a 410 nm (VANTASTAR, BMG Labtech, Ortenberg,

Alemania). Finalmente, se calcularon los resultados siguiendo la Ecuación 2 y los resultados fueron expresados en mg IT/g muestra.

$$mg\ IT/g\ muestra = [(A_E - A_B) - (A_M - A_{BM})] \times D \times V_E / (0,019 \times g \times 1000 \times V_M) \quad (2)$$

Donde A_E , A_B , A_M , y A_{BM} representan la absorbancia del E, del B, de la M, y del BM, respectivamente; V_E y V_M son el volumen de extracción y el de muestra utilizado en el ensayo, respectivamente; D es el factor de la dilución, y g son los gramos de la muestra.

Para la determinación del contenido en taninos se siguió el método estandarizado por la AOAC (Embaby, 2010). De esta forma, para realizar la extracción, en tubos de 15 mL con 0,2 g de harina de frijol negro, se añadieron 10 mL de acetona al 70 %. Posteriormente, se agitaron las muestras durante 24 h a temperatura ambiente y en oscuridad. Tras dicha agitación, se centrifugaron a 3000 g durante 20 min. Del sobrenadante se tomó una alícuota de 0,1 mL a la que se le añadieron para la determinación 0,1 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu, 0,2 mL de carbonato de sodio al 20 % y 1,6 mL de agua bidestilada, y a continuación se llevó a cabo una incubación de 30 min a temperatura ambiente. Transcurrido dicho periodo, se procedió a la lectura de la absorbancia a 760 nm (VANTASTAR, BMG Labtech, Ortenberg, Alemania). Finalmente, los resultados se expresaron como mg ácido tánico/g muestra.

En ambos casos, la extracción se realizó por duplicado y la determinación por triplicado.

Determinación de la digestibilidad proteica de las harinas hidrolizadas de frijol negro

Para determinar la digestibilidad proteica *in vitro* se utilizó el método descrito por Purwandari *et al.* (2023), el cual mide el GH durante la digestión gastrointestinal (DGI). En primer lugar, se simuló la DGI siguiendo el protocolo estandarizado INFOGEST (Brodkorb *et al.*, 2019; Minekus *et al.*, 2014) y seguidamente, se calculó el grado de hidrólisis durante la DGI mediante la determinación de los grupos amino libres con el método del TNBS descrito en el punto 4. El GH se calculó tal y como se muestra en la Ecuación 1 pero en este caso h era la concentración de grupos amino libres tras la DGI y h_0 la concentración de grupos amino libres antes de la DGI.

Para la simulación de la digestión gastrointestinal *in vitro* (DGI), en primer lugar, se prepararon los fluidos simulados (Minekus *et al.*, 2014): fluido salival simulado (FSS), fluido gástrico simulado (FGS) y fluido intestinal simulado (FIS). A continuación, se llevó a cabo la DGI utilizando un agitador Intell-Mixer™ RM-2 (ELMI Ltd., Riga, Letonia) y una cámara de incubación (Selecta, S.A., Barcelona, España) a 37 °C. Tras la digestión, las enzimas se inactivaron por shock térmico. Por último, las muestras se centrifugaron a 8000 g, durante 10 min a 4 °C y se recuperaron los sobrenadantes a los que se les determinaron los grupos amino libres. Además de las harinas, se digirió una muestra a la que se le había sustituido la harina por agua, la cual fue el control de la digestión.

Determinación de la bioaccesibilidad del hierro de las harinas hidrolizadas de frijol negro

Se define la bioaccesibilidad como la fracción de un compuesto que se libera en el tracto gastrointestinal de su matriz alimentaria y queda de esta forma disponible para su absorción (Cilla *et al.*, 2018; Mattar *et al.*, 2022). Por este motivo, para determinar la bioaccesibilidad del hierro de las harinas de frijol negro, se simuló la DGI, tal y como se detalla en el punto 6, y posteriormente se realizó la determinación del contenido en hierro total del sobrenadante de la DGI y de las muestras antes de la digestión por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) (Agilent Technologies, Inc. Headquarters, Santa Clara, California, EEUU). Finalmente, los resultados se expresaron siendo la proporción de hierro total disponible para ser absorbida frente al hierro total presente en la muestra.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el análisis simple de la varianza (ANOVA) utilizando el programa Statgraphics Centurion XVIII (Statgraphics Technologies, Inc., The Plains, VA, EE.UU.). El método empleado para discernir entre las medias fue la prueba de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey con un nivel de confianza del 95 %.

Resultados y Discusión

Grado de hidrólisis de las harinas hidrolizadas de frijol negro

En la Figura 1, se observa que la muestra hidrolizada con extracto obtuvo un $10,4 \pm 0,2$ % de grado de hidrólisis, mientras que la hidrolizada con bromelina comercial fue significativamente ($p < 0,05$) superior con un $14,8 \pm 0,5$ %. El aumento observado podría estar relacionado con las condiciones de hidrólisis. La bromelina tiene un rango de acción óptimo de pH de 5 a 8, en el que la actividad enzimática es máxima (Clavijo *et al.*, 2012). En este caso, el extracto de la corona tenía un pH de 4,4, ligeramente inferior a la disolución de la bromelina comercial que estaba entorno al 5,5, lo que podría estar provocando las diferencias que se observan. Otra de las razones podría ser la presencia de impurezas en el extracto. A pesar de tener la misma actividad enzimática el extracto y la disolución de bromelina, la presencia de impurezas podría afectar negativamente a la actividad enzimática debido a interferencias (Gautam *et al.*, 2010). No obstante, aunque utilizando el extracto se haya alcanzado un grado de hidrólisis proteica inferior en comparación con la bromelina comercial, éste podría ser una alternativa interesante, más sostenible y económica (Tacias-Pascacio *et al.*, 2023).

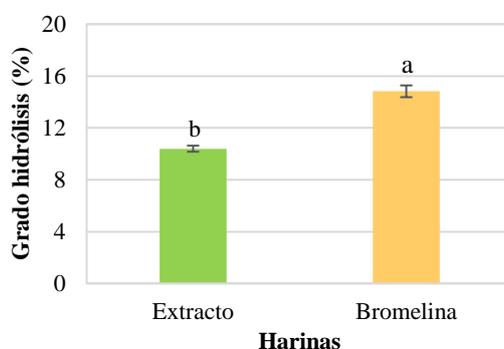


Figura 1. Grado de hidrólisis de las harinas de frijol negro hidrolizadas con extracto de la corona de la piña y con bromelina comercial. Diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas entre las muestras ($p < 0,05$).

Contenido en inhibidores de tripsina y taninos de las harinas hidrolizadas de frijol negro

Se determinó el contenido en IT y taninos. Los primeros son antinutrientes de naturaleza proteica y los segundos pueden formar complejos con las proteínas y el hierro. Los resultados se muestran en la Figura 2, donde se observa que el contenido en IT de las harinas hidrolizadas con extracto (Figura 2A) fue significativamente superior ($3,15 \pm 0,03$ mg IT/g), que los de las harinas control ($2,39 \pm 0,03$ mg IT/g) y las harinas hidrolizadas con bromelina ($2,52 \pm 0,03$ mg IT/g). Esta tendencia se puede deber a que el extracto acuoso de la piña esté aportando IT de manera adicional que provienen de la piña. Emmanuel y Deborah (2018) reportaron que la piña contenía un nivel de IT de 1,06 TIU/mg.

En cuanto al contenido en taninos (Figura 2B), se puede observar que las harinas hidrolizadas tenían un contenido significativamente mayor que las harinas control, ya que estas contenían 5,4 mg/g, mientras que las hidrolizadas con extracto tenían 8,6 mg/g y las hidrolizadas con bromelina 9,7 mg/g. Los taninos son un tipo de compuestos fenólicos (Singh *et al.*, 2017). Que se observe un mayor contenido en las harinas hidrolizadas podría deberse a que dicha hidrólisis produciría la ruptura de los enlaces covalentes formados por los compuestos fenólicos y las proteínas, quedando libres pero retenidos en la harina y, por tanto, siendo detectables (Ribéreau *et al.*, 2018).

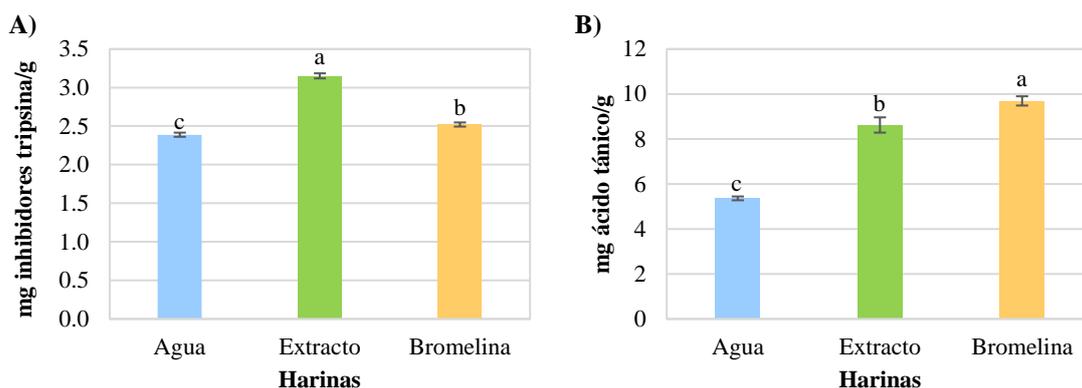


Figura 2. Contenido de antinutrientes de las harinas de frijol negro control (agua) e hidrolizadas con extracto de la corona de la piña y con bromelina comercial. Contenido de A) inhibidores de tripsina y B) taninos. Diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas entre las muestras ($p < 0,05$).

Digestibilidad proteica de las harinas hidrolizadas de frijol negro

La digestibilidad proteica de las distintas harinas osciló entre el 66 % y el 71 %. Concretamente, la harina control tuvo un grado de hidrólisis del 67 ± 3 %, la harina hidrolizada con extracto un 68 ± 4 % y la harina hidrolizada con bromelina comercial un 71 ± 3 % (Figura 3). Sin embargo, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre ellas. La ausencia de un aumento significativo de la digestibilidad con la hidrólisis previa de las harinas coincide con los resultados obtenidos por Goertzen *et al.* (2021), ya que no observaron diferencias significativas entre el aislado de proteína de garbanzos control y los hidrolizados con pepsina, tripsina o papaína. Además, que el porcentaje de hidrólisis de las muestras hidrolizadas con extracto sea inferior al de las muestras hidrolizadas con bromelina, podría deberse al mayor contenido en IT, que interaccionarían con las enzimas digestivas impidiendo su acción sobre las proteínas (Ohanenye *et al.*, 2020).

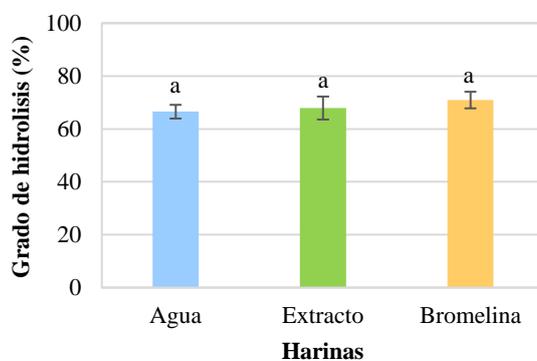


Figura 3. Grado de hidrólisis proteica de las harinas de frijol negro control (agua) e hidrolizadas con extracto de la corona de la piña y con bromelina comercial tras la digestión gastrointestinal *in vitro*. Diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas entre las muestras ($p < 0,05$).

Bioaccesibilidad del hierro de las harinas hidrolizadas de frijol negro

En general, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tipos de muestra (Figura 4). Es decir, parece que el grado de hidrólisis no afectó a la bioaccesibilidad del hierro. Los valores obtenidos fueron muy bajos, oscilando entre el 5 % y el 7 %, lo que podría deberse a su contenido en taninos, ya que estos compuestos pueden inhibir la absorción del hierro (Shubham *et al.*, 2020; Rousseau *et al.*, 2020). Además, que no se observe un aumento de la bioaccesibilidad del hierro significará que no se han formado péptidos con actividad quelante del hierro durante la DGI, ya que estos se unen al hierro y facilitan su absorción (Guo *et al.*, 2014).

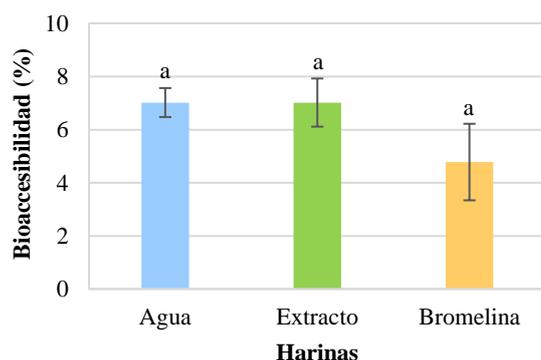


Figura 4. Bioaccesibilidad del hierro de las harinas de frijol negro control (agua) e hidrolizadas con extracto de la corona de la piña y con bromelina comercial. Diferentes letras indican diferencias estadísticamente significativas entre las muestras ($p < 0,05$).

Conclusiones

Los resultados del estudio mostraron que la utilización de harinas obtenidas con el extracto acuoso de la corona de la piña podrían ser una alternativa interesante más sostenible y económica frente al uso de bromelina comercial. En este sentido, a pesar de que con las harinas hidrolizadas con bromelina comercial se alcanzó un grado de hidrólisis superior a las hidrolizadas con el extracto acuoso de la corona de la piña, en ambas se observó un aumento en el contenido de inhibidores de tripsina y taninos. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en la digestibilidad proteica ni la bioaccesibilidad del hierro, obteniendo valores del 67-71 % y del 5-7 %, respectivamente.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Cooperación al Desarrollo de la Universitat Politècnica de València la financiación recibida a través del programa ADSIDEO.

Bibliografía

- Adler-Nissen, J. (1979). Determination of the Degree of Hydrolysis of Food Protein Hydrolysates by Trinitrobenzenesulfonic Acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 27(6), 1256–1262. https://doi.org/10.1021/JF60226A042/ASSET/JF60226A042.FP.PNG_V03
- Amoah, I., Ascione, A., Muthanna, F. M. S., Feraco, A., Camajani, E., Gorini, S., Armani, A., Caprio, M., & Lombardo, M. (2023). Sustainable Strategies for Increasing Legume Consumption: Culinary and Educational Approaches. *Foods*, 12(11), 2265. <https://doi.org/10.3390/FOODS12112265>
- Bessada, S. M. F., Barreira, J. C. M., & Oliveira, M. B. P. P. (2019). Pulses and food security: Dietary protein, digestibility, bioactive and functional properties. *Trends in Food Science & Technology*, 93, 53–68. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2019.08.022>
- Brodkorb, A., Egger, L., Alminger, M., Alvito, P., Assunção, R., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu-Lacanal, C., Boutrou, R., Carrière, F., Clemente, A., Corredig, M., Dupont, D., Dufour, C., Edwards, C., Golding, M., Karakaya, S., Kirkhus, B., Le Feunteun, S., ... Recio, I. (2019). INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion. *Nature Protocols* 2019 14:4, 14(4), 991–1014. <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0119-1>
- Cilla, A., López-García, G., & Barberá, R. (2018). In vitro bioavailability of iron and calcium in cereals and derivatives: A review. *Food Reviews International*, 34(1), 1–33. <https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1210631>

Clavijo, D., Portilla Martínez, M. C., & Quijano Parra, A. (2012). Cinética de la bromelina obtenida a partir de la piña perolera (*Ananas Comosus*) de Lebrija-Santander. *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas de La Universidad de Pamplona*, 10(2), 41–49. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90326388008>

Embaby, H. E. S. (2010). Effect of soaking, dehulling, and cooking methods on certain antinutrients and in vitro protein digestibility of bitter and sweet lupin seeds. *Food Science and Biotechnology*, 19(4), 1055–1062. <https://doi.org/10.1007/S10068-010-0148-1/METRICS>

Emmanuel, E., & Deborah, S. (2018). Phytochemical and anti-nutritional studies on some commonly consumed fruits in Ilokoja, Kogi state of Nigeria. *Research Article General Medicine Open Gen Med Open*, 2(3), 1–5. <https://doi.org/10.15761/GMO.1000135>

FAO. (2016). *Legumbres: Semillas nutritivas para un futuro sostenible* (1st ed.). FAO. <https://doi.org/10.4060/i5528s>

Gautam, S. S., K., S., Dash, V., Goyal, A. K., & Rath, G. (2010). Comparative study of extraction, purification and estimation of bromelain from stem and fruit of pineapple plant. *The Thai Journal of Pharmaceutical Sciences*, 34(2), 67–76. <https://doi.org/10.56808/3027-7922.2170>

Goertzen, A. D., House, J. D., Nickerson, M. T., & Tanaka, T. (2021). The impact of enzymatic hydrolysis using three enzymes on the nutritional properties of a chickpea protein isolate. *Cereal Chemistry*, 98(2), 275–284. <https://doi.org/10.1002/CCHE.10361>

Gouseti, O., Larsen, M. E., Amin, A., Bakalis, S., Petersen, I. L., Lametsch, R., & Jensen, P. E. (2023). Applications of Enzyme Technology to Enhance Transition to Plant Proteins: A Review. *Foods (Basel, Switzerland)*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/FOODS12132518>

Guo, L., Harnedy, P. A., Li, B., Hou, H., Zhang, Z., Zhao, X., & FitzGerald, R. J. (2014). Food protein-derived chelating peptides: Biofunctional ingredients for dietary mineral bioavailability enhancement. *Trends in Food Science & Technology*, 37(2), 92–105. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2014.02.007>

Ketnawa, S.; Chaiwut, P. & Rawdkuen, S. (2012). Pineapple wastes: A potential source for bromelain. *Food and Bioproducts Processing*. 90(3), 385-391. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.12.006>

Ma, Z., Boye, J. I., Simpson, B. K., Prasher, S. O., Monpetit, D., & Malcolmson, L. (2011). Thermal processing effects on the functional properties and microstructure of lentil, chickpea, and pea flours. *Food Research International*, 44(8), 2534–2544. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2010.12.017>

Mattar, G., Haddarah, A., Haddad, J., Pujola, M., & Sepulcre, F. (2022). New approaches, bioavailability and the use of chelates as a promising method for food fortification. *Food Chemistry*, 373, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.131394>

Minekus, M., Alminger, M., Alvito, P., Ballance, S., Bohn, T., Bourlieu, C., Carrière, F., Boutrou, R., Corredig, M., Dupont, D., Dufour, C., Egger, L., Golding, M., Karakaya, S., Kirkhus, B., Le Feunteun, S., Lesmes, U., MacIerzanka, A., MacKie, A., ... Brodtkorb, A. (2014). A standardised static in vitro digestion method suitable for food – an international consensus. *Food & Function*, 5(6), 1113–1124. <https://doi.org/10.1039/C3FO60702J>

Mookerjee, A., & Tanaka, T. (2023). Influence of enzymatic treatments on legume proteins for improved functional and nutritional properties: expansion of legume protein utilization as food ingredients. *Current Opinion in Food Science*, 49. <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2022.100974>

Ohanenye, I. C., Tsopmo, A., Ejike, C. E. C. C., & Udenigwe, C. C. (2020). Germination as a bioprocess for enhancing the quality and nutritional prospects of legume proteins. *Trends in Food Science & Technology*, 101, 213–222. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2020.05.003>

Purwandari, F. A., Westerbos, C., Lee, K., Fogliano, V., & Capuano, E. (2023). Proximate composition, microstructure, and protein and starch digestibility of seven collections of Jack bean (*Canavalia ensiformis*) with

different optimal cooking times. *Food Research International*, 170, 112956. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2023.112956>

Rahate, K. A., Madhumita, M., & Prabhakar, P. K. (2021). Nutritional composition, anti-nutritional factors, pretreatments-cum-processing impact and food formulation potential of faba bean (*Vicia faba* L.): A comprehensive review. *LWT*, 138, 110796. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110796>

Ribéreau, S., Aryee, A. N. A., Tanvier, S., Han, J., & Boye, J. I. (2018). Composition, digestibility, and functional properties of yellow pea as affected by processing. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(1). <https://doi.org/10.1111/JFPP.13375>

Rousseau, S., Kyomugasho, C., Celus, M., Hendrickx, M. E. G., & Grauwet, T. (2020). Barriers impairing mineral bioaccessibility and bioavailability in plant-based foods and the perspectives for food processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(5), 826–843. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1552243>

Rutherford, S. M. (2010). Methodology for Determining Degree of Hydrolysis of Proteins in Hydrolysates: A Review. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*, 93(5), 1515–1522. <https://doi.org/10.1093/JAOAC/93.5.1515>

Shubham, K., Anukiruthika, T., Dutta, S., Kashyap, A. V., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Iron deficiency anemia: A comprehensive review on iron absorption, bioavailability and emerging food fortification approaches. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 58–75. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2020.02.021>

Singh, B., Singh, J. P., Kaur, A., & Singh, N. (2017). Phenolic composition and antioxidant potential of grain legume seeds: A review. *Food Research International*, 101, 1–16.

Staniak, M., Księżak, J., & Bojarszczuk, J. (2014). Mixtures of Legumes with Cereals as a Source of Feed for Animals. *Organic Agriculture Towards Sustainability*. <https://doi.org/10.5772/58358>

Tacias-Pascacio, V. G., Castañeda-Valbuena, D., Tavano, O., Murcia, Á. B., Torrestina-Sánchez, B., & Fernandez-Lafuente, R. (2023). Peptides with biological and technofunctional properties produced by bromelain hydrolysis of proteins from different sources: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253, 127244. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.127244>

Obtención de bacteriocinas de *Plantarum* y *L. lactis* y su actividad inhibitoria frente a *S. aureus* resistente causante de mastitis bovina.

F. Aquino De La Cruz ¹, E. Valero-Cases ² y M.J. Frutos ²

¹Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Facultad de Ciencias Agronómicas y Veterinarias, Universidad Autónoma de Santo Domingo (FCAV-UASD). Orcid: 0000-0001-9409-1421¹, julio de 2024.

faquino97@uasd.edu.do

²Departamento de Tecnología Agroalimentaria, CIAGRO-UMH, Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental, Universidad Miguel Hernández, 03312 Orihuela, Alicante, España; e-mail: e.valero@umh.es; mj.frutos@umh.es.

Resumen

La investigación bibliográfica tiene como objetivo un protocolo para obtención de bacteriocinas a partir de *Lactobacillus plantarum* y *Lactobacillus lactis*, para reducir la mastitis bovina causada por *Staphylococcus aureus* resistente a antibióticos, para la producción de bacteriocinas, cepas de *L. plantarum* y *L. lactis* son cultivadas en MRS durante 24 h a 37 °C, y posteriormente centrifugadas a 35 000 xg durante 15 min a 4 °C. Para la purificación de las bacteriocinas, el sobrenadante es centrifugado y filtrado a través de filtros de 0,22 µm, precipitándose luego progresivamente en sales de sulfato, iniciando al 30% hasta un 70 % en escala de 10. El sobrenadante precipitado es ajustado a pH 6, calentado a 80 °C durante 10 min para desactivar proteasas. La concentración mínima inhibitoria se determina por metodología del Instituto de Normas Clínicas y de Laboratorio (CLSI), se toman 2 ml de medio caldo Mueller Hinton (MH), se inoculan concentraciones de bacteriocinas 1-0.5-0.25-0.05-0.025-0.005 µg/ml de cada una por separado y combinadas, se inoculan 100 µL de concentración del inóculo de colonias *S. aureus* estandarizadas a 0.5 de turbidez en escala de McFarland e incubadas a 37 °C durante 24 h, posteriormente las muestras sin turbidez se toman 10 µL para inocularlos en medio agar MH en placas Petri, las muestras son incubadas a 37 °C durante 24 h, donde no hay crecimiento se considera dosis efectiva, con ella se formulará una solución acuosa conteniendo 1% carboximetilcelulosa y 2% etanol para ser utilizada en ensayos posteriores in vivo.

Palabras clave: mastitis bovina, *Staphylococcus aureus*, prevención y control, bacteriocinas, péptidos bioactivos.

Obtaining bacteriocins from *L. plantarum* and *L. lactis* and inhibitory activity against resistant *S. aureus* that causes bovine mastitis.

Abstract

The bibliographic research aims at a protocol for obtaining bacteriocins from *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus lactis*, to reduce bovine mastitis caused by *Staphylococcus aureus* resistant to antibiotics, for the production of bacteriocins, strains of *L. plantarum* and *L. lactis* are cultured in MRS for 24 h at 37 °C, and subsequently centrifuged at 35,000 x g for 15 min at 4 °C. For the purification of the bacteriocins, the supernatant is centrifuged and filtered through 0.22 µm filters, then progressively precipitated in sulfate salts, starting at 30% up to 70% on a scale of 10. The precipitated supernatant is adjusted to pH 6, heated at 80°C for 10 min to deactivate proteases. The minimum inhibitory concentration is determined by the methodology of the Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI), 2 ml of Mueller Hinton (MH) broth medium are taken, concentrations of bacteriocins 1-0.5-0.25-0.05-0.025-0.005 µg are inoculated. /ml of each separately and combined, 100 µL of inoculum concentration of standardized *S. aureus* colonies are inoculated at 0.5 turbidity on the McFarland scale and incubated at 37 oC for 24 h, subsequently the samples without turbidity are taken in 10 µL to inoculate them in MH agar medium in Petri dishes, the samples are incubated at 37 oC for 24 h, where

there is no growth is considered an effective dose, with it an aqueous solution containing 1% carboxymethylcellulose and 2% ethanol to be used in subsequent in vivo tests.

Keywords: bovine mastitis, *Staphylococcus aureus*, prevention and control, bacteriocins, bioactive peptides.

Introducción

Investigaciones indican que las bacterias ácido-lácticas tienen potencial para generar bacteriocinas (Hammami et al. 2013; Arief et al. 2015; Ye et al. 2024), metabolitos secundarios definidos como pequeños péptidos antimicrobianos, los cuales son altamente activos, con capacidades bacteriostática y bactericida de menor y amplio espectro contra varias bacterias (Geng et al. 2020; Hurtado y Cucunubo, 2023), estos estudios sugieren que las bacteriocinas pueden ser una alternativa valiosa para inhibir diversos patógenos de alto riesgo para la salud (Lozo et al. 2017), incluyendo a *Staphylococcus aureus* principal patógeno causante de mastitis el cual es resistente a meticilina (MRSA) según indica Baig et al. (2018), ya que existe evidencia que los agentes causales de esta patología presentan resistencia antimicrobiana a fármacos (RAM) diversos (Cheng et al. 2019). Por lo que, la implementación de terapias a base de bacteriocinas para el tratamiento de la mastitis puede ser efectiva para la profilaxis de esta patología bovina (Guo et al. 2021), ya que estos metabolitos proteicos presentan determinadas características como son mayor poder bactericida, baja toxicidad, muy estables y presentar espectros de actividad bactericidas y bacteriostáticos amplios y estrechos (Crowther et al. 2013). En tal sentido, recientes estudios, como los realizados por Arifin et al. (2021) y Zhongdu et al. (2024), donde se evidenció que una bacteriocina de *Lactobacillus Plantarum* exhibió una actividad antimicrobiana de amplio espectro e inhibió notablemente el *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina (MRSA). También *Lactobacillus Lactis* productor de la primera bacteriocina nisina, un lantibiótico, considerado como uno de los principales péptidos antimicrobianos (AMP), el cual es empleado como control alimentario contra patógenos (Cano-Serna et al. 2015; Lagedroste et al. 2019). Otros estudios indican que las bacteriocinas puede ser empleadas como un tratamiento efectivo contra cepas resistentes a múltiples fármacos como MRSA o cepas Gram-positivas similares (Crowther et al. 2013; Brunati et al. 2018). Para Morales et al. (2022), la extracción y purificación de metabolitos proteicos es un paso crítico a nivel de facilitar los procesos de industrialización, por ser dificultosos y costosos. En tal sentido, Ramírez-Carreto et al. (2021), indica que las técnicas de purificación de proteínas juegan un papel fundamental para el futuro de las investigaciones biotecnológicas. Para muchos investigadores surgen varias interrogantes al momento de iniciar un protocolo de extracción y purificación de proteínas (Structural Genomics Consortium et al. 2008), una posible respuesta es propuesta Kwon y Jewett (2015), al indicar que el desafío principal es enfocar nuestros esfuerzos en estandarizar un protocolo de alto rendimiento de extracto crudo para una síntesis robusta de proteínas libres de células basados en métodos apropiados, proponiendo la técnica de sonicación. Por lo que, esta revisión tiene como objetivo identificar un protocolo apropiado para obtención de metabolitos proteicos sintetizados ribosomalmente que muestran actividad antimicrobiana (Newstead et al. 2020), constituidos aproximadamente de 30 a 60 aminoácidos (Aguiar et al. 2021), extraídos de la fermentación de cultivos de bacterias ácidos lácticas con el fin de obtener sobrenadantes libre de células (CFS) a través de la precipitación fraccionada y posterior concentración de pequeños péptidos vía sales de sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, en diferentes porcentajes, para aplicarlas en el control e inhibición de *S. aureus in vitro* y posteriormente *in vivo*, el cual es el principal agente causal de la mastitis bovina, buscando una alternativa de sustitución de tratamientos convencionales basados fundamentalmente en antibióticos.

Metodología

Se realizó una búsqueda en plataformas bibliográficas utilizando técnicas avanzadas según los criterios de las bibliotecas de bases de datos PubMed y Google Scholar de artículos científicos gratuitos desde 2013 hasta abril de 2024. Las palabras clave utilizadas fueron mastitis bovina, Bacterias Ácidos Lácticas, *Staphylococcus aureus*, prevención y control y bacteriocinas. Se examinaron 73 documentos en PubMed y 24 en Google Scholar.

Metodologías para la extracción y purificación de bacteriocinas

Un grupo de investigadores, liderados por Pedretti et al. (2024), extrajeron y purificaron sobrenadante libre de células (SFC) a partir de *Bacillus siamensis* de la piel de humanos, evaluando su potencial actividad antimicrobiana frente *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecalis*, *Streptococcus agalactiae* y *Cándida spp. in vitro* en medio Caldo de Soja Tríptico (TSB), evidenciando actividad antimicrobiana frente a las bacterias indicadas, para obtener el extracto y purificación del SFC, el método empleado fue aplicado al sobrenadante obtenido a partir de cultivos bacterianos de la cepa mencionada, tomaron de 10 mL y por centrifugación ($10.000\times g$ durante 20 min a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$) fue separado el precipitado, seguidamente el SFC fue purificado con filtros de tamaño de poro de $0,45\text{ }\mu\text{m}$ (Millipore Corp., Bedford, MA, USA). Para asegurar que no hubo contaminación bacteriana de los SFC fue incubado 1 mL de cada uno a $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ y comprobando la turbidez (de 24 h a 72 h). En el método de difusión en agar pocillo, el control negativo viene dado por el TSB.

Un año previo, en el 2023, fue realizado un estudio para la purificación, caracterización y acción bactericida de la enzima lisozima, el protocolo que fue implementado consistió en tres pasos a partir del extracto obtenido de la fermentación de extractos de *Bacillus subtilis* BSN 314 realizada por Naveed y colaboradores, el proceso de purificación inicial fue realizado mediante fraccionamiento del extracto bacteriano en diferentes concentraciones de sales de sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, estas concentraciones fueron de 20, 70 y 90 % de la sal, la concentración más alta y la máxima actividad enzimática fue con la concentración de 70 %, los datos a esta concentración fueron proteína/lisozima fue $0,712\text{ mg/mL}$ y la actividad enzimática también fue 43 U/mL .

En otro contexto, otro grupo de investigadores encabezados por Arifin y colaboradores (2021), realizaron un estudio donde aislaron una nueva bacteriocina denominada plantaricina IIA-1A5, con potencial contra un amplio espectro de bacterias patógenas vinculadas a la contaminación de alimentos en condiciones *in vitro*, a partir de la multiplicación en un sustrato fundamentado en suero de leche de la cepa de *Lactobacillus Plantarum* IIA-1A5, estas fueron luego centrifugadas y posteriormente, el sobrenadante fue purificado mediante precipitación de los macroelementos proteicos vía sales de sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, seguida de cromatografía de intercambio iónico.

Durante el año 2021, en México, investigadores de la Universidad de Guadalajara, aislaron bacteriocinas, liderados por Aguiar y colaboradores, las cepas utilizadas fueron de *Lactobacillus fermentum* LH01 y *Lactobacillus plantarum* LH03, consideradas cepas no patógenas (GRAS), la metodología empleadas consistió en inocular las cepas en matraz Erlenmeyer conteniendo un litro de caldo MRS modificado con 20 g/l de fosfato monobásico de potasio (KH_2PO_4) , 10 g/l de dextrosa y 10 g/l de fructano, seguidamente fueron incubados a 37°C durante 18 a 20 horas sin agitación y pasada la fermentación fueron sometidos a inhibición de las proteasas calentando a 70°C durante 30 minutos, para luego ser centrifugadas a 4500 rpm por 15 minutos a 4°C para separar la biomasa del extracto crudo, ajustado el pH a 5.0 con NaOH 3M, y realizar la evaluaciones *in vitro*, luego de evaluado su poder contra bactericida, fueron purificadas mediante membranas de 10 kDa , y 3 kDa .

Los productos fermentados, son fuente para identificar bacterias con potencial inhibitorio, en ese sentido Wang et al. (2018), lideraron una investigación en Beijing, República Popular China, donde obtuvieron mediante pescado fermentado una nueva bacteriocina de clase IIa, la plantaricina LPL-1 a partir del aislamiento de una cepa de Bacterias Ácidos Lácticas (BAL) identificada como *Lactobacillus Plantarum*, LPL-1, contra la cepa indicadora de *Listeria monocytogenes* 54002 en condiciones de laboratorio, la metodología empleada para este investigación consistió en inocular en condiciones de esterilidad las BAL en placas de agar MRS, estas fueron incubadas a $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24-48 h. Luego el sobrenadante se obtuvo por centrifugación a $8000\times g$ durante 20 min a 4°C y se ajustó a pH $6,8\pm 0,2$ utilizando NaOH 1 M, los CFS fueron filtrados a través de filtros estériles de $0,22\text{ }\mu\text{m}$, para luego evaluar su potencial antibacteriano mediante ensayo de difusión en pocillo de agar contra la cepa indicadora de *L. monocytogenes* 54002. Para la purificación de las bacteriocinas el sobrenadante de CFS, se le añadió sulfato de amonio (KH_2PO_4) hasta una saturación del 70% con agitación a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, reposada se procedió a centrifugar nuevamente el sobrenadante a $8000\times g$ durante 20 min a $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ para obtener sobrenadante que contenía bacteriocina cruda.

También, para el año 2018, investigadores encabezados por Le et al. trabajaron para la obtención de bacteriocinas bajo el proyecto titulado: "Caracterización y evaluación de la seguridad de la bacteriocina parcialmente purificada producida por *Escherichia coli* E aislada de piña fermentada *Ananas comosus* (L.) Merr", contra bacterias patógenas en alimentos y la acuicultura, la cepa de *Edwardsiella tarda* 3, fue el principal microorganismo diana, la bacteriocina fue obtenida del sobrenadante libres de células (CFS) de la cepa de *Escherichia coli* E, para la purificación parcial de las bacteriocinas el método empleado fue el de Lee et al. 2017, utilizado durante su investigación, quienes tomaron después de la fermentación del *E. coli* E el CFS obtenido a partir de 1 L de cultivo, el cual fue precipitado en diferentes concentraciones de sulfato de amonio (20 %, 30 % y 50 %) a 4 °C durante 24 h, luego fue centrifugado a 20.130 g por 20 min, para posteriormente en solución con Tris-HCl 25 mM a un pH 8, finalmente el CFS fue dializado con el mismo tiempo por 12 h a 4 °C.

Durante el año 2016, un grupo de investigadores encabezados por Ge et al., obtuvieron de un Jugo de Chucrut Chino una bacteriocina sintetizada por *Lactobacillus paracasei* HD1-7, denominada Paracina 1.7, la cual ha evidenciado que tiene efectos inhibidores contra el desarrollo y multiplicación de bacterias clasificadas como Gram positivas tales como *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Bacillus* y algunos *Lactobacillus*, así como también efectos contrarios al desarrollo de bacterias Gram Negativas, entre estas están los microorganismos del grupo de *Enterobacterias*, *Proteus* y *Pseudomonas*, el protocolo desarrollado, empleado y descrito fue el siguiente: luego de aislada y puesta a multiplicar las bacterias, se obtuvo mediante centrifugación el sobrenadante, posteriormente este fue purificado mediante precipitación parcial con sales de sulfato de amonio (KH₂PO₄), en seguida se procedió a la aplicación de columna cromatográfica CM Sepharose Fast Flow y cromatografía Sephadex G-10 y la determinación del peso molecular 10 kDa mediante el protocolo de Tricine-SDS-PAGE.

Conclusiones

La comunidad científica relacionada en los aspectos de la salud muestra preocupación por la amenaza global que representa la resistencia antimicrobiana (Morales et al. 2023), según la Organización Mundial de la Salud (OMS), los problemas de resistencia a antibióticos causarán aproximadamente 10 millones de muertes para el 2050, se estima que el valor de gastos aproximado será de USD 100 billones (OMS,2014). Investigaciones indican que los tratamientos con para profilaxis de la mastitis bovina basados en terapias con fármacos ha inducido en resistencia de los agentes causales a los antibióticos (Cardona et al. 2021;Peng et al. 2020). Las bacteriocinas, pequeñas cadenas de péptidos producidos extracelularmente de la síntesis ribosómica por bacterias ácidos lácticas (BAL), con amplia capacidad activa para inhibir varios tipos de bacterias (Maldonado-Barragán y West, 2019; Ng et al.,2020; Heilbronner et al.,2021). Su acción antibacteriana es debido a su potencial para alterar y porocitar las membranas de diversos géneros bacterianos, gracias a su carga neta positiva, independiente de la variedad de péptidos que los constituyen, logrando plegarse a las membranas de forma anfifílica (Torres et al.2019). Al compararlas con los fármacos antimicrobianos tienen perfiles de toxicidad más bajo, teniendo mayor potencial inhibitorio a concentraciones inferiores (Newstead et al. 2020; Soltani et al., 2021).

Las técnicas para obtención, purificación y caracterización de las proteínas y polipéptidos han estado en constante desarrollo, esto es debido a la diversidad de funciones metabólicas y por la importancia que tiene conocer la estructura y función de estas moléculas orgánicas en posteriores investigaciones (Tang et al. 2021). Los protocolos de obtención recientemente conocidos están enfocados en obtener alta calidad de extractos proteicos reduciendo pasos para lograr la pureza, la concentración, la actividad y el máximo rendimiento de viabilidad metabólica (Lojewska et al. 2016; Owczarek et al.2016). En tal sentido, la solubilidad de las proteínas y moléculas peptídicas pueden estar comprometidas debido a la polaridad de sus cargas iónicas y la hidrofobicidad (Du et al. 2022). En tal sentido, a bajas concentraciones de iones aumentan la solubilidad de las proteínas junto con la fuerza iónica, por el contrario a altas concentraciones iónicas disminuye la solubilidad de la proteína a medida que aumenta la fuerza iónica (Duong y Gabelli, 2014). Parte de los aminoácidos constituyentes de proteínas están conformados por residuos ionizados, con regiones polares e hidrofóbicas que, en

contacto con el agua crean estructuras denominadas solvatación, definidas como capa de agua, que en esta condición, está estrechamente asociada a la superficie de la proteína (Novák y Havlíček 2016). Según lo indicado por Mtulis (2016), la diferencia de solubilidad permite un precipitado y fraccionamiento de los diferentes complejos proteicos efectivo. Esta reacción electroquímica donde la solubilidad de las proteínas disminuye con el aumento de las concentraciones de sal se ha denominado la técnica de precipitado por salazón (Duong y Gabelli, 2014), por lo que la precipitación y purificación de las proteínas con sales de sulfato de amonio es una técnica efectiva empleada como un alternativa de purificación sobre extractos complejos debido a la gran diversidad de tamaño y número de proteínas que pueden estar presentes en un compuesto biológico (Ramírez-Carreto et al. 2021). La preferencia por el sustrato de amonio con relación a otras sales y disolventes es gracia a su efectividad generada por sus dos iones, NH_4^+ y SO_4^{2-} , se encuentran en los extremos kosmotrópicos de la serie Hofmeister proporcionándole capacidad a la sal de interactuar con las proteínas y péptidos proteicos (Hanke et al. 2022). Son varias las ventajas de la técnica de precipitación de proteínas por salazón con $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, tales como seguridad por la inocuidad de la sales, acciones de suavidad sobre el metabolito de interés, mantenimiento metabólico de la proteína o péptidos proteicos, técnica muy simple y de bajo costo (Du et al. 2022).

Bibliografía

Aguilar U.B., Balcázar L.E., Fernando P.B., Chávez A., Rodríguez A.A., Solís A.L. Solís R.E y Solís P.J., 2021. Obtención y caracterización de bacteriocinas a partir de bacterias ácido-lácticas aisladas de leche humana. Revista Internacional de Salud, Bienestar y Sociedad. Volumen 7 Número 1. ISSN: 2386-7507 (versión electrónica).

Arief II, Budiman C, Jenie BS, Andreas E, Yuneni A., 2015. Plantaricin IIA-1A5 from *Lactobacillus plantarum* IIA-1A5 displays bactericidal activity against *Staphylococcus aureus*. *Benef Microbes*. 2015;6(4):603-13

Arifin M, Budiman C, Fujiyama K, Arief II., 2021. Estudio cinético y termodinámico de la plantaricina IIA-1A5, una bacteriocina producida por el probiótico indonesio *Lactobacillus plantarum* IIA-1A5. *Protein Pept Lett*. 28(6):680-686.

Baig S, Johannesen TB, Overballe-Petersen S, Larsen J, Larsen AR, Stegger M., 2018. Identificación de un nuevo tipo de mec XIII (9A) de SCC en un *Staphylococcus aureus* resistente a la metilina ST152. *Infect Genet Evol*. 2018; 61 :74–76.

Brunati C., Thomsen T., Gaspari E., Maffioli S., Sosio M., Jabes D., Løbner-Olesen A. y Donadio S., 2018. Ampliación del potencial de NAI-107 para el tratamiento de patógenos ESKAPE graves: combinaciones sinérgicas contra bacterias gramnegativas y actividad bactericida contra células que no se dividen, *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, Volumen 73, Número 2, febrero de 2018, Páginas 414–424.

Cano-Serna D, Gómez-Marín A, Oviedo-Gallego V, Ríos-Osorio LA. Nisina como conservante de alimentos: revisión sistemática de la literatura. *Rev Hechos Microbiol*. 2015;6(1-2):52-64.

Cadona J.S., Hernandez L.B., Lorenzo R., Bottini E., Bustamante A.V., Sanso A.M., 2021. Draft genome sequence of *Streptococcus agalactiae* TA B490, a multidrug-resistant strain isolated from Bovine Mastitis in Argentina. *Microbiology Resource Announcements*. 10(5).

Cheng J, Qu W, Barkema HW, Nobrega DB, Gao J, Liu G., 2019. Perfiles de resistencia antimicrobiana de 5 patógenos comunes de mastitis bovina en grandes rebaños lecheros chinos. *J Dairy Sci*. 102 :2416–26.

Crowther CA, Middleton P, McBain RD., 2013. Administración de anticuerpos anti-D durante el embarazo para prevenir la aloimmunización Rh. *Cochrane Database Syst Rev*. 2013 Feb 28;(2):CD000020.

Du M, Hou Z, Liu L, Xuan Y, Chen X, Fan L, Li Z, Xu B., 2022. Avances, aplicaciones, desafíos y perspectivas de la tecnología de purificación de proteínas. *Front Bioeng Biotechnol*. Dec 6; 10:1028691. [doi: 10.3389/fbioe.2022.1028691](https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1028691). [PMID: 36561042](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36561042/).

Duong-Ley KC, Gabelli SB., 2014. Salazón de proteínas mediante precipitación de sulfato de amonio. *Métodos: Enzimol.* 541:85-94.

Ge J, Sun Y, Xin X, Wang Y, Ping W., 2016. Purificación y caracterización parcial de una nueva bacteriocina sintetizada por *Lactobacillus paracasei* HD1-7 aislada de jugo de chucrut chino. *Sci Rep.* 14 de enero de 2016;6:19366.

Geng H, Zou W, Zhang M, Xu L, Liu F, Li X, Wang L, Xu Y., 2020. Evaluación de la terapia con fagos en el tratamiento de la mastitis inducida por *Staphylococcus aureus* en ratones . *Folia Microbiol (Praga)* . 65 (2): 339–351.

Guo Mengting, Ya Gao, Yibing Xue, Liu Yuanping, Xiaoyan Zeng, Yuqiang Cheng, Ma Jingjiao, Rey Hengan, Sol Jianhe , El rey Zhao Fei.Yaxian Yan, 2021. Los cócteles de bacteriófagos protegen a las vacas lecheras contra la mastitis causada por una infección por *Escherichia coli* resistente a los fármacos. *Frente. Cell. Infect. Microbiol. Sec. Microbiología Clínica Volumen 11.*

Hammami H., Bormann J., Mhamdi N., Montaldo H. y Gengler N., 2013. Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. *J. Dairy Sci.* 96 :1844–1855.

Hanke M, Hansen N, Chen R, Grundmeier G, Fahmy K, Keller A., 2022. Salazón de nanoestructuras de origami de ADN por sulfato de amonio. *Int J Mol Sci.* 4 de marzo de 23(5):2817.

Heilbronner S., Krismer B., Brötz-Oesterhelt H., Peschel A., 2021. El papel de las bacteriocinas en la modelación del microbioma. *Nat. Rev. Genet.* 19:726–739.

Hurtado P. y Cucunubo S., 2023. Prevalencia de mastitis y caracterización productiva en pequeños productores de Simijaca y Tenjo (Cundinamarca), Colombia. *Rev. colombiana cienc. anim. Recia vol.15 no.2 Sincelejo.* .

Kwon YC, Jewett MC., 2015. Métodos de preparación de alto rendimiento de extracto crudo para una síntesis robusta de proteínas libres de células. *Sci Rep.* Mar 2;5:8663.

Lagedroste M, Reiners J, Smits SHJ, Schmitt L., 2019. Caracterización sistemática de las variantes de la posición uno dentro del lantibiótico nisina. *Sci Rep.* Jan 30;9(1):935.

Lee SW, Wendy W, Leelakriangsak M., 2017. La eficacia de una nueva bacteriocina derivada de *Escherichia coli* colonizada en la piña fermentada *Ananas comosus* (L.) Merr. contra bacterias patógenas aisladas de sitios de acuicultura. *Vet World.* 2014;7:1014–1018

Le VT, Leelakriangsak M, Lee SW, Panphon S, Utispan K, Koontongkaew S., 2018. Caracterización y evaluación de la seguridad de la bacteriocina parcialmente purificada producida por *Escherichia coli* E aislada de piña fermentada *Ananas comosus* (L.) Merr. *Braz J Microbiol.* Jan;50(1):33-42.

Lojewska E., Kowalczyk T., Olejniczak S., Sakowicz T., 2016. Métodos de extracción y purificación en el procesamiento posterior de proteínas recombinantes de origen vegetal. *Protein Expr. Purif.* 120, 110–117. [10.1016/j.pep.2015.12.018](https://doi.org/10.1016/j.pep.2015.12.018).

Lozo J, Mirkovic N, O'Connor PM, Malesevic M, Miljkovic M, Polovic N, Jovic B, Cotter PD, Kojic M. *Lactolisterina* BU, una nueva bacteriocina de amplio espectro de clase II derivada de *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* bv. *diacetylactis* BGBU1-4. *Appl Environ Microbiol.* Oct 17;83(21):e 01519-17.

Maldonado-Barragán A., West SA., 2019. Costo y beneficio de la producción de bacteriocinas controladas por quórum sensing en *Lactobacillus plantarum*. *J. Evol. Biol.* 33:101–111

Morales B.D., Baryolo G.L., Mora G.N., Ramos S.L. y Pérez S.A., 2022. Precipitación salina de un extracto crudo con actividad celulítica producido por *Aspergillus niger* UC 33. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales Volumen 9 (2).* Julio – Diciembre. [p. 69-85].

Morales-Ubaldo AL, Rivero-Pérez N, Valladares-Carranza B, Velázquez-Ordoñez V, Delgadillo-Ruiz L, Zaragoza-Bastida A.,2023. Mastitis bovina, una enfermedad de impacto mundial: prevalencia, resistencia antimicrobiana y enfoques alternativos viables. *Vet Anim Sci.* Jul 24; 21:100306.

Naveed M, Wang Y, Yin X, Chan MWH, Aslam S, Wang F, Xu B, Ullah A.,2023. Purificación, caracterización y acción bactericida de la lisozima, aislada de *Bacillus subtilis* BSN314: un efecto desintegrador de la lisozima en bacterias grampositivas y gramnegativas. *Moléculas.* 20 de enero de 2023; 28(3):1058. doi: [10.3390/moléculas28031058](https://doi.org/10.3390/moléculas28031058).

Newstead LL, Varjonen K, Nuttall T, Paterson GK., 2020. Bacteriocinas y péptidos antimicrobianos producidos por estafilococos: su potencial como tratamientos alternativos para las infecciones por *Staphylococcus aureus*. *Antibiotics (Basel).* Jan 21;9(2):40.

Ng ZJ, Zarin MA, Lee CK., 2020. Aplicación de bacteriocinas en la conservación de alimentos y el tratamiento de enfermedades infecciosas en humanos y ganado: una revisión. *RSC Adv.*10(64).

Novák P., Havlíček V., 2016. Extracción y precipitación de proteínas. Perfilado proteómico y química analítica. Elsevier; Ámsterdam, Países Bajos. págs. 51-62.

Organización Mundial de la Salud. Resistencia a los antimicrobianos: Informe mundial sobre vigilancia. Organización Mundial de la Salud; Ginebra, Suiza: 2014. 256p.

Owczarek B., Gerszberg A., Hnatuszko-Konka K., 2019. Un breve recordatorio de los sistemas de producción y recuperación basada en cromatografía de biofármacos de proteínas recombinantes. *Biomed. Res. Int.* 2019, 1–13. [10.1155/2019/4216060](https://doi.org/10.1155/2019/4216060).

Pedretti N, Iseppi R, Condò C, Spaggiari L, Messi P, Pericolini E, Di Cerbo A, Ardizzoni A, Sabia C.,2024. El sobrenadante libre de células de una cepa de *Bacillus siamensis* aislada de la piel mostró un amplio espectro de actividad antimicrobiana. *Microorganismos.* 12(4):718.

Peng J., Lu Q., Liu X., Deng Y., Shang T., Yuan L., Zhang H., Zeng Q.,2022. Efecto antibacteriano del lipopéptido sintético ultracorto sobre *Streptococcus agalactiae* y su actividad sobre la mastitis bacteriana en ratones. *Comunicaciones de investigación bioquímica y biofísica.*601:153–159.

Ramírez-Carreto, S., Miranda-Zaragoza, B. y Rodríguez-Almazán, C., 2021. Purificación de proteínas. *Revista Mensaje Bioquímico.* 45 (2021) 35-47. Instituto de Biotecnología, UNAM Av. Universidad # 2001 Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México. CP. 62210 Tel. +52 (55) 56 22 86 02, claudiar@comunidad.unam.mx.

Soltani S., Hammami R., Cotter PD, Rebuffat S., Said LB, Gaudreau H., Bédard F., Biron E., Drider D., Fliss I., 2021. Bacteriocinas como una nueva generación de antimicrobianos: aspectos de toxicidad y regulaciones. *FEMS Microbiol. Rev.* 45:fuaa039.

Structural Genomics Consortium; China Structural Genomics Consortium; Northeast Structural Genomics Consortium, 2008. Protein production and purification. *Nat Methods.* Feb;5(2):135-46. doi: 10.1038/nmeth.f.202. Erratum in: *Nat Methods.*

Tang R., Yang S., Nagel G., Gao S., 2021. mem-iLID, un método de purificación de proteínas rápido y económico. *Biosci. Rep.* 41 (7), BSR20210800. [10.1042/BSR20210800](https://doi.org/10.1042/BSR20210800).

Torres MD, Sothiselvam S, Lu TK, de la Fuente-Nunez C.,2019. Principios de diseño de péptidos para aplicaciones antimicrobianas. *J Mol Biol.* 431(18):3547–3567

Wang Y, Qin Y, Xie Q, Zhang Y, Hu J, Li P., 2018. Purificación y caracterización de plantaricina LPL-1, una nueva bacteriocina de clase IIa producida por *Lactobacillus plantarum* LPL-1 aislado de pescado fermentado. *Microbiol frontal.* 28 de septiembre de 2018;9:2276. doi: [10.3389/fmicb.2018.02276](https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02276).

Ye Z, Shentu H, Zhou Q, Wu D, Li P, Gu Q., 2024. A novel bacteriocin against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*, purified from *Lactobacillus plantarum* ZFM9. *Food Chem.* 2024 Sep 1;451:139344.



Zhongdu Ye, Huifei Shentu, Qingqing Zhou, Danli Wu, Ping Li, Qing Gu, 2024. Una nueva bacteriocina contra *Staphylococcus aureus* resistente a la meticilina, purificada a partir de *Lactiplantibacillus plantarum* ZFM9. Elsevier: *Química de Alimentos*. Volumen 451, 139344.

***Moringa oleifera* como ingrediente potencial en productos de panadería**

C. Belmar-Moya¹, E. Sayas-Barberá¹ y C. Navarro-Rodríguez de Vera¹

¹ Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental CIAGRO. Universidad Miguel Hernández, Ctra. de Beniel km 3.2,03312, Orihuela, Alicante, e-mail: consuelo.belmar@goumh.umh.es

Resumen

La *Moringa oleifera* es una planta de rápido crecimiento, nativa del sur de Asia, con capacidad de adaptación a climas calurosos con escasas lluvias. Todas sus partes (hojas, raíces, vainas, semillas y su correspondiente aceite) son comestibles y presentan propiedades bioactivas beneficiosas para la salud, que han sido utilizadas desde la antigüedad con uso terapéutico. En especial, las hojas de moringa poseen una elevada concentración de proteínas con todos los aminoácidos esenciales, vitaminas C y A, minerales (Ca, Fe, Mg, K) y antioxidantes naturales como carotenoides y tocoferoles. La *Moringa oleifera* ha sido incorporada en diversos alimentos, como productos cárnicos y de panadería, para mejorar sus propiedades bioactivas, con el objetivo de hacer llegar sus beneficios nutritivos y funcionales al consumidor. El objetivo de este estudio es analizar el efecto de la incorporación de hojas de *Moringa oleifera* en panes integrales sobre su calidad. Para ello, se elaboraron cinco panes con diferentes concentraciones de moringa (0%, 2,5%, 5%, 7,5% y 10%), y se llevaron a cabo determinaciones físicas (rendimiento en peso, coeficiente de elevación, altura rebanada derecha e izquierda, volumen aparente, volumen específico y % de miga), fisicoquímicas (color y A_w) y sensoriales. La incorporación de moringa afectó al volumen específico, a la altura de los laterales de cada rebanada y a la luminosidad (L^*) de la miga, disminuyendo los valores al aumentar su %. El análisis sensorial mostró que los catadores no percibieron de manera favorable los atributos organolépticos aportados por las hojas de moringa al pan.

Palabras clave: *Moringa oleifera*, pan integral, propiedades físicas, color.

***Moringa oleifera* as a potential ingredient in bakery products**

Abstract

Moringa oleifera is a fast-growing plant, native to southern Asia, with the ability to adapt to hot climates with low rainfall. All its parts (leaves, roots, pods, seeds and its corresponding oil) are edible and have bioactive properties beneficial to health, which have been used since ancient times for therapeutic purposes. In particular, moringa leaves have a high concentration of proteins with all the essential amino acids, vitamins C and A, minerals (Ca, Fe, Mg, K) and natural antioxidants such as carotenoids and tocopherols. *Moringa oleifera* has been incorporated into various foods, such as meat and bakery products, to improve its bioactive properties, with the objective of bringing its nutritional and functional benefits to the consumer. The objective of this study is to analyze the effect of incorporating *Moringa oleifera* leaves in whole grain breads on their quality. For this purpose, five breads were made with different concentrations of moringa (0%, 2.5%, 5%, 7.5% and 10%), and physical (weight yield, elevation coefficient, right and left slice height, apparent volume, specific volume and % crumb), physicochemical (color and A_w) and sensory determinations were carried out. The incorporation of moringa affected the specific volume, the height of the sides of each slice and the brightness (L^*) of the crumb, decreasing the values as its % increased. The results of the sensory analysis showed that the tasters did not have a positive perception of the organoleptic properties of moringa leaves in the bread.

Keywords: *Moringa oleifera*, whole grain bread, physicochemical properties, color.

Introducción

La creciente preocupación por consumir productos que no sean solo novedosos, sino que también ofrezcan ventajas nutricionales significativas, ha dado lugar al desarrollo de nuevas propuestas de alimentos saludables, incorporando ingredientes vegetales que aportan compuestos bioactivos beneficiosos para la salud. La *Moringa oleífera* aparece como un ingrediente prometedor por su alto valor nutritivo (Oyeyinka y Oyeyinka, 2018)-

Moringa oleífera pertenece a la familia *Moringaceae*. Este género está constituido por 13 especies (*M. hildebrandtii*, *M. borziana*, *M. arbórea*, *M. drouhardii*, *M. longituba*, *M. ovalifolia*, *M. rivae*, *M. corcanensis*, *M. ruspoliana*, *M. stenopetala*, *M. peregrine*, *M. pygmaea*, *M. oleífera*) siendo *Moringa oleífera* la especie más extendida y cultivada (Hernández *et al.*, 2022). Es nativa del sur de Asia, aunque su plantación se ha extendido a lo largo del mundo (Singh *et al.*, 2020). Se trata de un árbol foliado de rápido crecimiento, presente en climas tropicales y subtropicales, y con capacidad de adaptación a climas secos y cálidos. Su temperatura ideal de crecimiento es de 25-35°C, aunque puede soportar hasta los 48°C (Doménech Asensi *et al.*, 2017).

La *Moringa oleífera* es conocida desde la antigüedad debido a las propiedades curativas que se le atribuyen para ayudar a tratar diversas afecciones y su consumo contribuye a la mejora nutricional en países menos desarrollados (Doménech Asensi *et al.*, 2017; Oyeyinka y Oyeyinka, 2018). Todas las partes de la planta de moringa (hojas, raíces, vainas, semillas y su correspondiente aceite) son comestibles y presentan propiedades bioactivas beneficiosas para la salud (Sharma, *et al.*, 2022), especialmente las hojas. Según Sánchez-Peña *et al.* (2013), existen análisis en las hojas de moringa que demuestran que el 30% de su peso seco está formado por proteínas. Además, sus hojas no aportan calorías prácticamente y tienen minerales (Ca, Fe, Mg, K), vitaminas C y A, y antioxidantes naturales como carotenoides, tocoferoles o flavonoides (Oyeyinka y Oyeyinka, 2018). En su composición también se incluyen aminoácidos como arginina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, fenilalanina, metionina, treonina, triptófano y valina (Hernández Rodríguez e Iglesias Marichal, 2022). Así pues, también son una fuente rica en ácidos grasos omega 3, omega 6 y AGPI (ácido linoleico y linoléico) (Álvarez Baladrón, 2019).

La moringa ha sido incorporada en diversos alimentos, como productos cárnicos y de panadería, para mejorar sus propiedades bioactivas, con el objetivo de hacer llegar sus beneficios nutritivos y funcionales al consumidor. En este contexto, el pan constituye un medio idóneo para la fortificación nutricional, ya que forma parte de la dieta de todo el mundo y es consumido por personas de todas las clases sociales (Doménech Asensi *et al.*, 2017). La inclusión de las diferentes partes (hojas, semillas, flores, etc.) para la fortificación de panes es una estrategia adecuada para mejorar el valor nutricional de este alimento (aumento del contenido en proteínas y de fibra bruta) aunque influye negativamente en las características sensoriales y físicas (Sengev *et al.*, 2013; Oyeyinka y Oyeyinka, 2018).

El objetivo de este trabajo es analizar el efecto de la incorporación de hojas de *Moringa oleífera* sobre las características físicas, fisicoquímicas y sensoriales en panes integrales de trigo y centeno. Los resultados de este estudio permiten combinar los beneficios del centeno, un cereal rico en fibra, con las propiedades de la moringa, una planta conocida por su alto contenido en vitaminas, minerales y compuestos antioxidantes. Además, el cultivo sostenible de la moringa contribuye a la conservación del medio ambiente, añadiendo un valor adicional para los consumidores conscientes del impacto de sus elecciones alimentarias en el planeta.

Materiales y Métodos

Elaboración del pan

Se elaboraron cinco lotes de panes integrales con diferentes concentraciones de hojas moringa (0%, 2,5%, 5%, 7,5% y 10%). Se utilizaron hojas de moringa procedentes de agricultura ecológica proporcionadas por NATURCID (Monforte del Cid, Alicante, España). Cumplían con los criterios de calidad (herbicidas y pesticidas, metales pesados, microbiología, radioactividad y organoléptico) exigidos por la normativa vigente (REGLAMENTO (UE) 2018/848).

Los ingredientes utilizados fueron: preparado comercial (74,4% de harina integral de trigo y 24,8% de harina integral de centeno, 0,93 % de sal, levadura deshidratada, malta de cebada, ácido ascórbico y monoestearato de sorbitano) y agua. A partir de esta fórmula básica se desarrollaron los cinco tipos de panes: lote control (0% moringa), lote 2,5% (2,5% moringa), lote 5% (5% moringa), lote 7,5% (7,5% moringa) y lote 10% (10% moringa). Los ingredientes utilizados en cada lote se detallan en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Formulaciones utilizadas para la elaboración de los diferentes lotes de panes integrales.

<i>Materias primas</i>	<i>Pan 0%</i>	<i>Pan 2,5%</i>	<i>Pan 5%</i>	<i>Pan 7,5%</i>	<i>Pan 10 %</i>
Preparado para pan (g)	500	500	500	500	500
Hojas de <i>Moringa oleífera</i> (g)	0	12,5	25	37,5	50
Agua (mL)	350	350	350	350	350

Para la elaboración del pan se utilizó una Thermomix (Vorwerk TM31) para las etapas de pesado, mezclado y amasado. Se utilizó la velocidad de espiga durante un periodo de 5 minutos, garantizando una homogeneización óptima de la masa. Posteriormente, se procedió a un proceso adicional de amasado manual de 5 minutos. La masa, trabajada, se depositó en moldes específicos para su reposo durante 1 hora. Finalmente, se horneó la masa durante 50 minutos a una temperatura de 200°C. Una vez a temperatura ambiente, los panes elaborados fueron analizados. Se realizaron dos elaboraciones independientes.

Determinaciones analíticas

Propiedades fisicoquímicas: color y actividad de agua

Para las mediciones de color se utilizó un colorímetro Minolta CM-700d (Minolta Camera Co, Osaka, Japón), utilizando D65 como iluminante y un observador 10°. Se determinaron las coordenadas de color CIEL*a*b*, y las magnitudes psicofísicas tono (h*) y croma (C*). Para la medición de la A_w se utilizó el equipo Novasina (LabTouch-aw, Pfaffikon, Suiza).

Propiedades físicas

Se determinaron las características físicas del pan (rendimiento en peso, coeficiente de elevación, altura rebanada derecha e izquierda, volumen aparente, volumen específico y % de miga). La masa y los panes horneados se pesaron y se calculó el rendimiento en peso. El coeficiente de elevación y las alturas de las rebanadas se midieron utilizando un pie de rey digital. Para la determinación del volumen aparente del pan se utilizó el método del desplazamiento de semillas de mijo (AACC, 2000). El % de miga se calculó pesando las rebanadas con y sin corteza.

Estudio preliminar de consumidores

Se realizó una prueba sensorial a 27 catadores no entrenados compuestos por personal y estudiantes de la Universidad Miguel Hernández. Los catadores evaluaron cada muestra mediante una escala hedónica con 7 categorías (desde “me disgusta enormemente” hasta “me gusta enormemente”), a través de un formulario *online* al cual se accedía a través de un código QR. Durante la prueba, se dieron a probar porciones de cada lote (2x2x2 cm) identificadas con cifras de tres números al azar. Las

características organolépticas evaluadas de cada muestra fueron: apariencia, color, olor, textura, sabor y valoración global. Además, se les pregunto a los catadores la muestra que más les gustó y la que menos.

Análisis estadístico

Se determinaron medias y desviaciones estándar para todos los parámetros estudiados. Se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las diferencias significativas del efecto de la formulación de las muestras utilizando el programa informático SPSS versión 29 para Windows (IBM, Chicago, USA.). Se realizó una comparación de medias usando el test de Tukey para determinar entre qué niveles del factor considerado las diferencias fueron significativas ($P < 0,05$).

Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos de los parámetros de color en los diferentes lotes de pan integral y de las hojas de moringa se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Medias y desviaciones estándar de los parámetros de color de las hojas de moringa y de los diferentes lotes de pan integral elaborados con 0%, 2,50%, 5%, 7,5% y 10% de moringa

		% de hojas de moringa				
		0%	2,50%	5%	7,50%	10%
CORTEZA	L*	33,98 ± 2,50	26,98 ± 3,37	34,65 ± 2,18	32,57 ± 5,88	29,05 ± 1,59
	a*	11,73 ± 1,10ab	9,86 ± 0,31a	12,13 ± 0,17b	10,06 ± 1,09a	11,39 ± 0,54ab
	b*	15,88 ± 1,78ab	14,48 ± 0,85a	19,53 ± 0,83b	17,86 ± 2,10ab	16,23 ± 1,62ab
	h	53,50 ± 2,34a	55,73 ± 1,14ab	58,13 ± 0,74ab	60,44 ± 4,63b	54,86 ± 1,59ab
	C*	19,75 ± 1,94ab	17,52 ± 0,84a	22,99 ± 0,79b	20,54 ± 1,69ab	19,84 ± 1,62ab
MIGA	L*	50,31 ± 3,33b	41,85 ± 5,13ab	41,01 ± 1,48ab	39,40 ± 2,58a	38,33 ± 4,00a
	a*	7,87 ± 0,29	7,37 ± 0,58	6,55 ± 1,44	7,96 ± 2,57	5,76 ± 0,53
	b*	21,93 ± 0,99	21,24 ± 1,69	21,20 ± 1,99	21,84 ± 2,14	20,63 ± 0,33
	h	70,23 ± 1,28	70,77 ± 2,42	72,97 ± 2,31	70,29 ± 3,91	74,40 ± 1,11
	C*	23,30 ± 0,89	22,49 ± 1,50	22,20 ± 2,30	23,29 ± 2,91	21,42 ± 0,46
HOJAS DE MORINGA	L*	41,83 ± 1,69				
	a*	1,99 ± 0,24				
	b*	19,99 ± 1,17				
	h	95,67 ± 0,35				
	C*	20,09 ± 1,18				

a-b Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre lotes.

La incorporación de hoja de moringa no presento ningún impacto sobre la luminosidad de la corteza ($p > 0,05$) y si para el resto de parámetros de color ($p < 0,05$). Posiblemente las diferencias se deban más al efecto del horneado del pan que al efecto de la moringa.

Por lo que respecta a la miga, existen diferencias significativas ($p < 0,5$) en la luminosidad (L*), disminuyendo a medida que aumenta el % de moringa, lo que indicaría que la moringa tiene un efecto oscurecedor de la miga del pan, siendo proporcional a su concentración. Esta disminución de la luminosidad se puede observar en la **figura 1 y** podría deberse a la menor L* de la hoja de Moringa (L* de la hoja de moringa fue de $41,83 \pm 1,69$ (datos sin publicar)). No se observaron diferencias significativas en a*, b*, tono (h) y croma (C*), a pesar del color verde oscuro que tienen las hojas de moringa. Esto estaría mostrando que el color de la harina integral estaría enmascarando el impacto de las hojas de moringa, lo que se concluye que este tipo de harina es un buen vehículo para la

incorporación de ingredientes vegetales con propiedades de color que podrían tener un efecto desfavorable o negativo en el color y producir rechazo a la hora de su compra.

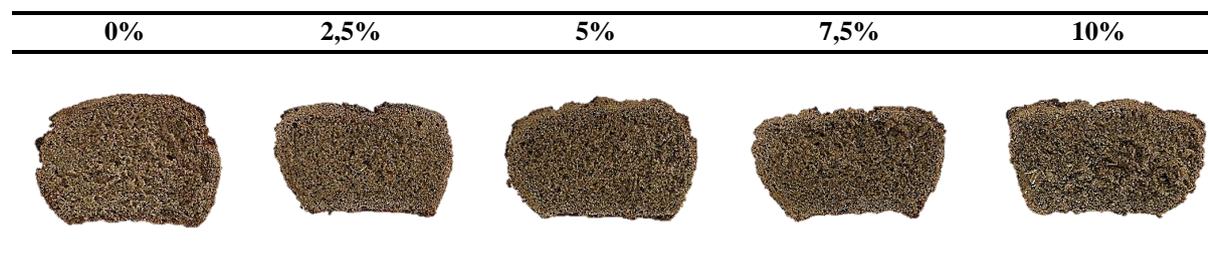


Figura 1. Imágenes de los diferentes lotes de pan integral elaborados con hoja de moringa

Los resultados obtenidos tras realizar las determinaciones físicas y de A_w se recogen en la **Tabla 3**. Se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en el rendimiento en peso, altura de los laterales de cada rebanada, volumen específico y A_w . No se observaron diferencias ($p > 0,05$) en el coeficiente de elevación, volumen aparente y % de miga de las muestras.

Tabla 3. Medias y desviaciones estándar de las propiedades físicas y de la A_w de los diferentes lotes de pan integral elaborados con hoja de moringa

	0%	2,50%	5%	7,50%	10%
Rendimiento en peso (%) pan	93,09 ± 0,01c	92,67 ± 0,01b	88,91 ± 0,02a	97,78 ± 0,01d	93,05 ± 0,01c
Coefficiente de elevación	1,48 ± 0,01	1,89 ± 0,28	1,57 ± 0,01	1,83 ± 0,03	1,75 ± 0,07
Altura rebanada izquierda (cm)	84,45 ± 0,64b	73,75 ± 0,78a	74,50 ± 3,54a	69,75 ± 0,92a	68,60 ± 2,55a
Altura rebanada derecha (cm)	75,45 ± 2,76b	66,10 ± 3,25a	66,05 ± 0,50a	65,30 ± 2,40a	69,85 ± 1,20ab
Volumen aparente (mL)	12,50 ± 3,54	10 ± 0,01	12,50 ± 3,54	17,50 ± 3,54	10 ± 0,01
Volumen específico pan (cm ³ /g)	16,89 ± 0,13b	14,75 ± 0,16a	14,90 ± 0,71a	13,95 ± 0,18a	13,72 ± 0,51a
% miga	140,90 ± 40,87	147,50 ± 1,56	125 ± 41,01	81,48 ± 17,52	137,20 ± 5,09
A_w	0,95 ± 0,01ab	0,95 ± 0,01ab	0,94 ± 0,01a	0,96 ± 0,01ab	0,96 ± 0,01b

a-b Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los lotes.

Las diferencias encontradas en el rendimiento en peso del pan carecen de relevancia práctica, y podrían atribuirse a factores relacionados con la etapa del horneado (disposición de los moldes, T^a , etc.) y no al efecto de la moringa.

La actividad de agua fue mayor en los lotes de pan con las concentraciones más altas de moringa. Este resultado concuerda con el estudio de Chinchilla Reyes (2019), donde indica que al aumentar la concentración de moringa en magdalenas aumenta también su actividad de agua. En la muestra control y en la muestra con 2,5% de moringa obtuvimos la misma A_w , lo cual es positivo ya que indica que la A_w no se ve afectada por la incorporación de 2,5% de moringa.

El volumen específico disminuyó significativamente al incrementar la concentración de hoja de moringa, de 16,89 a 13,73 cm³/g. Sengev *et al.* (2013) obtuvieron resultados similares, señalando que esto podría deberse a la menor proporción del contenido de gluten presente a medida que se aumentaba la cantidad de hoja de moringa en la fórmula y a la menor capacidad de fermentación. El volumen específico también puede haber disminuido por el número de alveolos en el pan. La reducción de gluten en la masa podría estar relacionada con la disminución del número de alveolos y, por lo tanto, con la disminución del volumen específico (Rodríguez Chirinos, 2021). La disminución de la altura de los laterales al aumentar la concentración de moringa también podría atribuirse de nuevo a la menor proporción del contenido de gluten en la fórmula al aumentar la concentración de moringa.

El análisis sensorial evidenció que las muestras que contenían hojas de moringa generaron una percepción negativa entre los evaluadores. De los cinco lotes de pan estudiados la muestra preferida fue el control (0% hojas de moringa) por el 66,7% de los catadores, seguida por la muestra con 2,5%. Mientras que la muestra con un 10% resultó ser la que menos puntuación recibió por los catadores. Estos resultados podrían estar relacionados con el sabor a hierba que aporta la moringa, como ha sido observado en otros estudios (Sengev *et al.*, 2013). En la **figura 2**, se representan los resultados del análisis sensorial. La figura indica que los lotes de pan integral con concentraciones de hojas de moringa por encima de 5% obtuvieron los menores valores en los atributos evaluados. Esto indica que los atributos organolépticos asociados a la incorporación de moringa, como el olor, el sabor, la textura, la apariencia y el color, no fueron bien aceptados por los catadores.

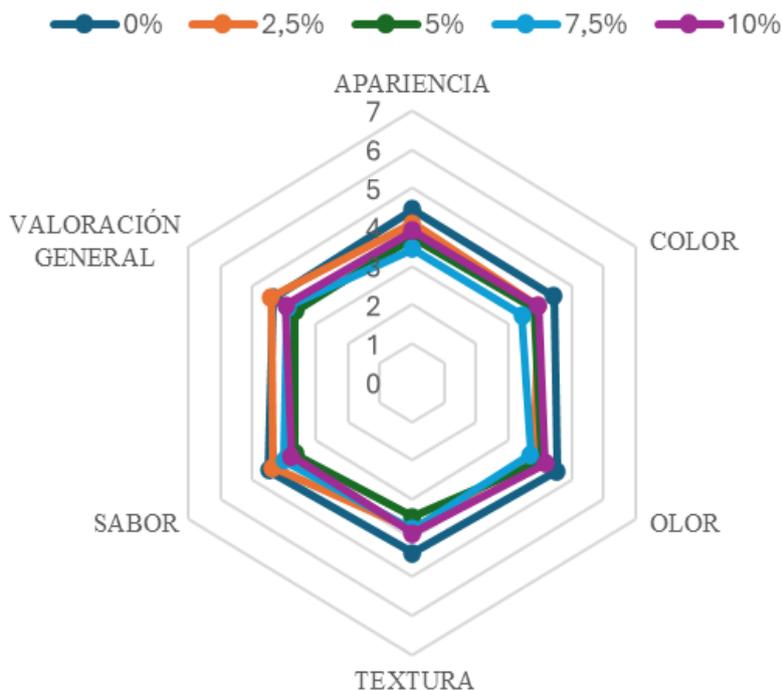


Figura 2. Resultados del análisis sensorial de los diferentes lotes de pan integral elaborados con hoja de moringa

Conclusiones

La moringa oscureció la miga de pan y afectó al volumen específico y a la altura de los laterales de cada rebanada, disminuyendo los valores al aumentar su porcentaje de incorporación, aunque estos efectos no representaron un fuerte impacto negativo. La *Moringa oleífera* puede ser utilizada como un ingrediente natural y sostenible para el enriquecimiento del pan integral y se muestra como una posible estrategia para contribuir a la mejora en su valor nutricional. El análisis sensorial permitió concluir que los catadores no valoraron de manera positiva los atributos organolépticos que la incorporación de moringa aportó al pan. Sin embargo, se observó que únicamente en concentraciones pequeñas, específicamente alrededor del 2,5%, existía posibilidad de que el producto pudiera considerarse viable desde un punto de vista comercial. Se debe de continuar investigando para realizar cambios en la formulación y explorar estrategias para equilibrar los beneficios funcionales de la moringa con las preferencias sensoriales de los consumidores.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto titulado “Estudio preliminar de la optimización de alimentos para mejorar el bienestar de la mujer mediante la selección de nuevos ingredientes sostenibles (FOOD-WOM)”. Referencia VIPROY23/28 y ha sido financiado por la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Bibliografía

Álvarez Baladrón, C. (2019). Propiedades farmacológicas de *Moringa oleifera*. <https://core.ac.uk/download/pdf/286564741.pdf>

Chinchilla Reyes, M. A. Magdalenas con polvo de hojas de Moringa (*Moringa oleifera*): mejora nutricional y aceptabilidad. Trabajo para optar por Master en Ciencia e Ingeniería de los Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia, España, 2019.

Doménech Asensi, G., Durango Villadiego, A. M., & Ros Berruezo, G. (2017). *Moringa oleifera*: Revisión sobre aplicaciones y usos en alimentos. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 67(2), 86-97.

Hernández, E. A., Abascal, V. L., Borges, R. M., Arana, O. E., García, K. G., Rivero, Y. H., & Jiménez, E. R. (2022). Evaluación farmacognóstica de extractos de hojas secas de *Moringa oleifera* Lam. del ecotipo criolla cultivada en Cuba. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 26(3).

Hernández Rodríguez, J., & Iglesias Marichal, I. (2022). Efectos benéficos de la *Moringa oleifera* en la salud de las personas. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 38(1).

Oyeyinka, A. T. y Oyeyinka, S. A. (2018). *Moringa oleifera* como fortificante alimenticio: tendencias y perspectivas recientes. *Revista de la Sociedad Saudita de Ciencias Agrícolas*, 17(2), 127-136.

Rodríguez Chirinos, R. E. (2021). Evaluación del grado de sustitución de la harina de trigo (*Triticum durum* L.) por harina de loche (*Cucurbita moschata* Duch.) en la elaboración de pan de molde. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/8220>

Sánchez-Peña, Y. A., Martínez-Avila, G. C., Sinagawa-García, S. R., & Vázquez-Rodríguez, J. A. (2013). *Moringa oleifera*; importancia, funcionalidad y estudios involucrados. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 5(9), 25-30.

Sengev, A. I., Abu, J. O., & Gernah, D. I. (2013). Efecto de la suplementación con polvo de hoja de *Moringa oleifera* sobre algunas características de calidad del pan de trigo. *Ciencias de la Alimentación y la Nutrición*, 4(3), 270.

Sharma, K., Kumar, M., Waghmare, R., Suhag, R., Gupta, O. P., Lorenzo, J. M., ... y Kennedy, J. F. (2022). *Moringa (Moringa oleifera Lam.)* polisacáridos: Extracción, caracterización, bioactividades y aplicación industrial. *Revista Internacional de Macromoléculas Biológicas*, 209, 763-778.

Singh, A. K., Rana, H. K., Tshabalala, T., Kumar, R., Gupta, A., Ndhlala, A. R., & Pandey, A. K. (2020). Phytochemical, nutraceutical and pharmacological attributes of a functional crop *Moringa oleifera* Lam: An overview. *South African Journal of Botany*, 129, 209-220.

UE (2018) Reglamento (UE) 2018/848 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, sobre la producción ecológica y el etiquetado de los productos ecológicos y por el que se deroga el Reglamento (CE) n° 834/2007 del Consejo**. Diario Oficial de la Unión Europea, L 150, 1-92.

Gestión y Valorización de Residuos Orgánicos en la Agricultura

Tableros de paja de arroz (*Oryza sativa* L.) usando residuo de piel de patata como aglutinante.

M. Martínez-Fernández¹, M.T. Ferrández-García¹, M. Ferrández-Villena¹

¹Grupo de Investigación de Materiales de Construcción a partir de residuos vegetales del CIAGRO (Instituto de Investigación e Innovación Agroalimentario y Agroambiental). Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO): Universidad Miguel Hernández, Ctra. Beniel Km. 3.2, 03312, Orihuela, Alicante
email: maria.mtz.fdz@hotmail.es; mt.ferrandez@umh.es; m.ferrandez@umh.es

Resumen

Nuestra dependencia de materiales de construcción con ciclo de vida lineal está acabando con los recursos naturales del planeta, por ello, la industria de la construcción está bajo una presión creciente para encontrar formas de ser más sostenibles. Los residuos agrícolas y de la industria agroalimentaria poseen propiedades que los hacen potencialmente interesantes para su uso como materiales de construcción. Este estudio ha desarrollado un material compuesto tipo tablero a partir de partículas vegetales de paja de arroz (*Oryza sativa* L.) y residuo de piel de patata de la industria alimentaria como aglutinante natural. El material obtenido es totalmente biodegradable. En la elaboración se usó como materia prima partículas de paja de arroz ($\leq 4\text{mm}$) y el contenido de polvo de patata se fijó en el 5%, 10%, 15% y 20% en peso basado en las partículas del arroz. Se fabricaron 24 tableros aglomerados de una sola capa con una presión de 2.6 MPa y 150 °C durante 12 y 20 minutos. Se estudiaron las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los tableros elaborados. En general, las propiedades mecánicas mejoraron cuando se aumentó la concentración de aglutinante de polvo de piel de patata con un tiempo de prensado de 12 minutos, especialmente en lo que respecta a la cohesión interna de las partículas. Los tableros tenían una conductividad térmica baja (0,071 y 0,093 W·m⁻¹·K⁻¹) y podrían utilizarse como paneles aislantes en los edificios.

Palabras clave: Paja, *Oryza sativa*; residuo de patata; tableros; aislante térmico.

Rice straw (*Oryza sativa* L.) boards using potato skin residue as binder.

Abstract

Our reliance on building materials with a linear life cycle is depleting the planet's natural resources, so the construction industry is under increasing pressure to find ways to be more sustainable. Agricultural and agri-food industry wastes have features that make them potentially interesting for use as building materials. This study has developed a board-type composite material from plant particles of rice straw (*Oryza sativa* L.) and potato peel residue from the food industry as a natural binder. The material obtained is completely biodegradable. In the preparation, rice straw particles ($\leq 4\text{mm}$) and the content of potato powder, set at 5%, 10%, 15% and 20% by weight based on the rice particles were used as raw material. 24 single-layer chipboards were manufactured with a pressure of 2.6 MPa and 150 °C for 12 and 20 minutes. The physical, mechanical and thermal properties were studied on the processed boards. The mechanical properties increasing with concentration of potato skin powder binder was increased with a pressing time of 12 minutes especially with respect to the internal cohesion of the particles. The boards had low thermal conductivity (0.071 and 0.093 W·m⁻¹·K⁻¹) and could be used as insulating panels in buildings.

Keywords: Straw; *Oryza sativa*; potato residue; particleboards; insulating panels.

Introducción

El arroz (*Oryza sativa* L.) es un cereal de gran importancia en la alimentación humana. Además, posee gran relevancia social y económica en muchas regiones del mundo. La FAO prevé un aumento en la utilización mundial del arroz de un 1,2 % entre 2024 y 2025 (términos interanuales) alcanzando el máximo histórico de 531,5 millones de toneladas.

En la Comunidad Valenciana, el arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los cultivos más representativos. Las 15.000 has cultivadas actualmente representan el 12,5% y el 13,5% de la superficie y producción total española respectivamente. El cultivo del arroz, además de su importancia socioeconómica y alimentaria, es insustituible desde el punto de vista medio ambiental y está vinculado a ecosistemas como el Parque Natural de La Albufera y los humedales de Pego-Oliva y Almenara-La Llosa.

El Parque Natural de la Albufera, constituye uno de los principales humedales de la península ibérica y una de las de mayor importancia del mediterráneo occidental. Por otro lado, el cultivo del arroz en este enclave representa la base fundamental que ha permitido y permite su mantenimiento como zona húmeda y la supervivencia de parte de las comunidades biológicas que lo habitan, de manera que, en la actualidad, este espacio no puede ser interpretado sin la realidad agrícola y humana que lo envuelve.

Los esfuerzos para garantizar el futuro de esta zona como humedal, deben basarse en la compatibilización e integración de esta actividad y en la mejora de sus condiciones, ya que permite el sostenimiento de una valiosa comunidad biológica y un rico entorno paisajístico y humano.



Figura 1. Cultivo de arroz en la Albufera (Valencia)

En la actualidad, la agricultura está atravesando un importante momento de transición ecológica, en el que se están aplicando técnicas productivas más sostenibles, incluyendo la economía circular mediante el aprovechamiento de subproductos. Por ello, es crucial buscar alternativas y herramientas que permitan el uso de los residuos y subproductos vegetales, como la paja, y encontrar nuevos métodos de gestión que ayuden a los agricultores a manejar sus cultivos de manera más eficiente y sostenible.

Este estudio propone soluciones para el aprovechamiento de los residuos agrícolas, fundamentándose en el concepto de economía circular, tal como lo establece la Ley 7/2022, de 8 de abril, sobre residuos y suelos contaminados para una economía circular cuya finalidad es la prevención y la reducción de la generación de residuos y de los impactos adversos de su generación y gestión, la reducción del impacto global del uso de los recursos y la mejora de la eficiencia de dicho uso con el objeto de proteger el medio ambiente y la salud humana.

El propósito de este estudio es evaluar la viabilidad técnica del uso de subproductos del cultivo de arroz, como la paja, y de la industria agroalimentaria, como la cáscara de patata, los cuales actualmente carecen de aplicaciones de valor y suelen ser eliminados mediante incineración (paja) o depositados en vertederos (cáscara de patata). La investigación se centra en la fabricación de materiales compuestos tipo tablero, con un enfoque particular en su potencial uso como aislante térmico en edificaciones. Para ello, se fabrican paneles que incorporan partículas de paja, utilizando polvo de cáscara de patata como un aglutinante natural.

La paja de arroz es uno de los residuos más difíciles de gestionar, sobre todo en entornos naturales y con alto valor ecológico, como suelen ser los humedales donde se desarrolla este cultivo. De manera estándar se producen alrededor de 5-6 t de paja por hectárea de arroz. (Ribo et al., 2017). Si el manejo y gestión de la paja no es adecuado se puede producir anoxia, podredumbres y puede constituir una fuente del inóculo de *Pyricularia oryzae*, hongo Ascomycota que causa una de las enfermedades más importantes en el arroz a nivel mundial por las pérdidas económicas que ocasiona. El inóculo se queda en las parcelas en los restos de material vegetal, malas hierbas o restos de la cosecha anterior (Pascual Villalobos et al., 2023).

Para evitarlo, tradicionalmente se ha optado por la quema de la paja, pero esto produce la emisión de determinados contaminantes atmosféricos. Por ello la quema de rastrojos y demás restos vegetales procedentes de la poda y la cosecha está prohibida en esta zona salvo por razones de carácter fitosanitario que no sea posible abordar con otro tipo de tratamiento, de acuerdo con el artículo 27.3 de la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados y previa solicitud de autorización. Por lo que, la retirada de la paja y su posterior aprovechamiento, supone una vía alternativa favorable para su correcta gestión. Además, los residuos agrícolas vegetales como la paja, presentan buenas características para su uso como paneles aislantes térmicos. Los aislantes térmicos, en general, son caros y muchos no son respetuosos con la naturaleza.

Se han llevado a cabo múltiples estudios sobre el uso de la paja en la construcción. Algunos autores estudiaron la posibilidad de convertir estos residuos en productos útiles, como tableros de partículas (Halvarsson et al., 2010) tableros de fibras de relleno (Li et al., 2010) compuestos termoplásticos (Zhan y Hu, 2014).

Bouasker et al. (2014) realizaron el estudio de cuatro tipos de fibra de paja, tres de ella provenientes del trigo y una de la cebada. Primero que todo se hizo un análisis de las partículas a través de imágenes examinadas en el microscopio, seguido a esto se determinó la densidad aparente, la densidad absoluta y la porosidad. Los valores obtenidos de porosidad oscilaban entre 94 y 97% y los valores obtenidos de densidad absoluta fueron de 865 a 871 (Kg/m³).

Los materiales porosos tienden a almacenar aire en su interior. El aire es un mal conductor del calor lo que hace que la conductividad eléctrica de estos materiales sea baja. Por este motivo los materiales porosos como la paja son buenos aislantes. Es importante estudiar la influencia de la cantidad, calidad y distribución de la porosidad en el comportamiento térmico de un material.

Por otra parte, la paja de arroz y las cáscaras de arroz fueron investigadas preliminarmente por Izhar et al. y Sakamoto et al. mostrando sus características útiles de absorción acústica. (Buratti et al., 2024). Ferrández García et al. (2017) estudiaron la resistencia al fuego y caracterización física y mecánica de tableros de partículas de paja de arroz sin aglutinante. La reacción a la prueba de fuego demostró que los tableros de paja de arroz sin aglutinante pueden clasificarse en la clase B (en la misma categoría que los paneles de yeso y los polímeros ignífugos). Además, los paneles podían considerarse aislantes térmicos.

De manera particular, podemos considerar que las edificaciones hechas con paja representan una novedosa solución constructiva que emplea placas de paja como elementos estructurales, de relleno o de aislamiento.

Para la cohesión de las partículas de madera, la industria incorpora adhesivos que actúan como aglutinantes. Los más utilizados actualmente son perjudiciales para la salud y el medio ambiente: la urea-formaldehído (UF), el fenol formaldehído (PF), melamina urea formaldehído (MUF) y los monocomponentes de poliuretano (PUR), resinas de acetato de vinilo y resinas a base de isocianato. Esto ha originado investigaciones con distintos tipos de adhesivos naturales como el almidón (Ferrández-García et al., 2012) los taninos (Guimarães Carvalho et al., 2014) la lignina (El Mansouri et al., 2006) o ácido cítrico (Liao et al., 2016) para la formación de tableros de partículas.

Las pieles de la patata (*Solanum tuberosum*) procedentes de la industria alimentaria, contienen almidón. Actualmente son destinadas a alimentación animal o a procesos de compostaje en vertederos. Se producen volúmenes elevados de forma centralizada y es por esto por lo que son considerados

un residuo apropiado para su selección y valorización. Para producir 1 kg de patata frita se necesitan 4 kg de patata cruda aproximadamente. Si hablamos de residuos, de esos 4 kg de patata cruda aproximadamente 0,25 Kg sería piel y restos de patata no conforme. En una fábrica donde la producción diaria ronda los 20.000 kg la cantidad de residuos diaria puede oscilar de 1250 kg a 500 kg de residuo de peladura de patata al día.

Además, debido a su naturaleza, los almidones tienen un gran potencial como sustitutos de materiales poliméricos sintéticos, principalmente con fines medioambientales. Ferrández-García et al. (2012) utilizó almidón de patata sin modificar para aglutinar partículas de caña común con buenos resultados. Actualmente, muchas investigaciones se centran en producir un adhesivo adecuado a partir del almidón para unir las partículas vegetales.

El uso de residuos de peladura de patata como aglutinante para tableros de residuos agrícolas es una idea innovadora y sostenible. Existe un gran potencial en la circularidad en torno a estos residuos y subproductos, aplicando la tecnología adecuada se pueden convertir en valiosos recursos aún por explotar. Al reutilizar estos desechos de la industria agroalimentaria, no solo se reduce el impacto ambiental, sino que también se le da un valor añadido a un material que de otra manera tendría escaso aprovechamiento industrial. Esta práctica contribuye a la economía circular y promueve la sostenibilidad en la industria.

Materiales y Métodos

Se trabajó con dos tipos de subproductos de origen agroindustrial. El material lignocelulósico utilizado en el presente estudio fue paja procedente del cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.) procedente del coto arrocero de Calasparra y como aglutinante se usó el residuo polvo de piel de peladura patata procedente de una fábrica de patatas fritas. Estos subproductos fueron sometidos a diferentes tratamientos de acondicionamiento para facilitar su uso como materia prima en la elaboración de materiales compuestos. Los tallos de paja se desfibraron mediante una desfibradora de cuchillas y se clasificaron las partículas por las dimensiones según atravesaban el tamiz seleccionando un tamaño de partícula de 4 mm en una tamizadora vibradora (Figura 2).



Figura 2. Detalle partículas paja arroz tamizadas: 4 mm.

La peladura de piel de patata se secó al aire libre empleando el secado solar directo. Una vez seco el material, se aplicó calor adicional en la estufa y finalmente se trituró para obtener el polvo de piel de patata (Figura 3).



Figura 3. Residuo de peladura de piel de patata: a) de fábrica, b) seco, c) triturado.

Para la elaboración de los tableros (Figura 4) se fabricaron paneles en condiciones de laboratorio a partir de partículas de paja de arroz de tamaño ≤ 4 mm añadiendo polvo de residuo de piel de patata como aglutinante a diferentes concentraciones: 5 %, 10%, 15 % y 20%. Las partículas de paja y el residuo de patata mezcladas se depositan en un molde, para formar la manta de 600 mm x 400 x 10 mm. Se añade el 25% de agua mediante pulverización. Posteriormente se introducen en una prensa hidráulica, equipada con calentamiento eléctrico, con temperatura de 150 °C. La presión aplicada fue de 2,6 MPa durante 12 y 20 minutos. Terminado el ciclo de prensado los tableros fueron enfriados a temperatura ambiente y posteriormente fueron retiradas las probetas para los diferentes ensayos físicos y mecánicos propuestos.



Figura 4. Secuencia del proceso de fabricación de los tableros en laboratorio: a) partículas de paja tamizadas, b) residuo piel de patata, c) manta, d) prensa hidráulica, e) tablero, f) cortes para probetas.

Las características de todos los tableros fabricados se muestran a continuación en la Tabla 1:

Tabla 1. Características de los paneles elaborados.

Tipo	Tamaño de partícula (mm)	Dosificación g/100g de partículas		Temperatura (°C)	Presión (MPa)	Tiempo (min)	Número de tableros
		Polvo de piel de patata	Agua				
A1	4	5	25	150	2,6	12	3
A2	4	5	25	150	2,6	20	3
B1	4	10	25	150	2,6	12	3
B2	4	10	25	150	2,6	20	3
C1	4	15	25	150	2,6	12	3
C2	4	15	25	150	2,6	20	3
D1	4	20	25	150	2,6	12	3
D2	4	20	25	150	2,6	20	3

Medición de las propiedades físicas y mecánicas: Se determinaron algunas propiedades físicas y mecánicas de acuerdo con las normas europeas correspondientes.

Tabla 2. Normativa de ensayos para caracterización de tableros.

Normativa	Parámetro/Característica
UNE-EN 317:1993	TS 24 h/ Hinchazón en espesor tras inmersión en agua
UNE-EN 319:1994	IB/ Cohesión interna
UNE-EN 323:1994	ρ /Densidad
UNE-EN 310: 1994	MOE/ Módulo de elasticidad
UNE-EN 310:1994	MOR/ Módulo de la resistencia a flexión
EN 12667:2002	Conductividad térmica mediante flujo de calor (λ)

Análisis estadísticos de los resultados: De los valores medios de los ensayos se obtuvo la desviación estándar y se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) para un nivel de significancia de $\alpha < 0,05$. El análisis estadístico se realizó con el programa informático SPSS v.29.

Resultados y Discusión

Propiedades físicas

En la tabla 3 se muestran las propiedades físicas de los tableros ensayados.

Tabla 3. Resultados medios de las propiedades físicas analizadas en función del tipo de tablero.

Tipo de Tablero	Polvo de piel de patata (%)	Tiempo (min.)	Densidad (kg/m ³)	TS 24 (%)	WA 24 (%)	Conductividad Térmica (W/m·K)
A1	5	12	917,64 (23,36)	48,75 (3,4)	115,55 (5,4)	0,080 (0,002)
A2	5	20	847,09 (50,77)	51,49 (3,0)	113,18 (6,4)	0,085 (0,003)
B1	10	12	862,92 (31,34)	43,52 (3,4)	102,86 (10,0)	0,088 (0,002)
B2	10	20	886,32 (19,41)	60,04 (8,0)	118,18 (12,1)	0,071 (0,001)
C1	15	12	867,75 (8,11)	80,53 (2,3)	160,26 (2,5)	0,093 (0,001)
C2	15	20	889,65 (23,04)	54,66 (4,5)	123,64 (8,8)	0,080 (0,001)
D1	20	12	901,63 (29,01)	46,98 (3,1)	109,63 (6,9)	0,082 (0,003)
D2	20	20	950,29 (7,96)	57,44 (8,1)	107,21 (5,7)	0,084 (0,002)

TS: espesor hinchado tras 24 h en agua. WA: absorción de agua tras 24 h de inmersión. (..): desviación estándar.

La densidad de los tableros oscila entre 847,09 y 950,29 kg/m³ pudiendo considerarse tableros de media densidad. Uno de los principales problemas de los paneles autoadhesivos es su escasa resistencia al agua. Esta propiedad suele expresarse como la combinación de TS y WA Ferrández García et al. (2017). Los valores obtenidos en este estudio muestran que para un tiempo de prensado de 12 minutos TS y WA 24 h alcanzan sus máximos valores máximo de TS y WA para el tablero C1. Los valores de conductividad térmica obtenidos oscilan entre 0,07156 y 0,0931 (W/m·K) (tabla 3), presentando estos tableros buenas propiedades aislantes. El valor mínimo para este parámetro se da en el tablero B2 y el mayor en C1.

Propiedades mecánicas

La caracterización de los materiales compuestos, tipo tablero, obtenidos se llevó a cabo según normativa de ensayos descrita en la norma de especificaciones técnicas UNE EN 312:2010: Tableros de partículas, Especificaciones (Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación de tableros (EN 312, 2010)

Tipo de tablero	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	IB (N/mm ²)
Tipo P1	10.50	-	0,24
Tipo P2	13.00	1600.00	0,40
Tipo P4	15.00	2300.00	0,45

A continuación, se recogen las gráficas de las propiedades mecánicas ensayadas:

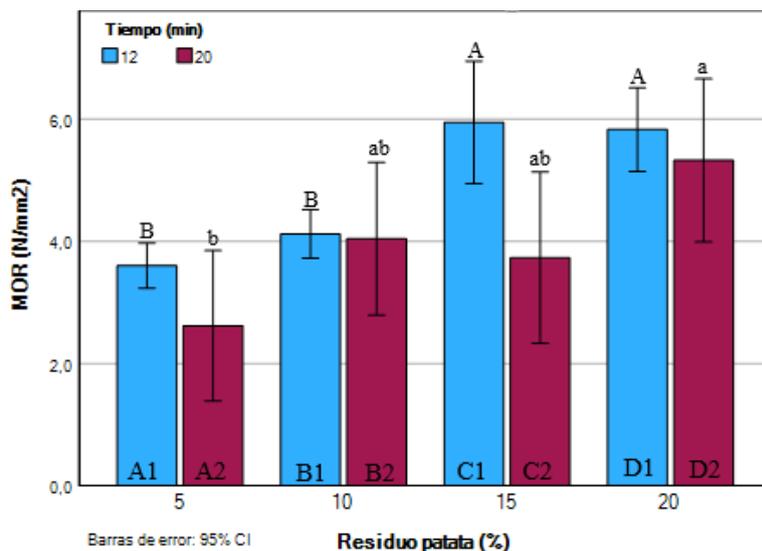


Figura 5. Valores de MOR (N/mm²) para los tableros ensayados: Distintas letras mayúsculas indican diferencias significativas para la variable tiempo (t=12 min) respecto la cantidad añadida de polvo de piel de patata (%). Distintas letras minúsculas indican diferencias significativas para la variable tiempo (t=20 min) respecto la cantidad añadida de polvo de piel de patata (%).

Los tableros ensayados no llegan a la mínima clasificación de la norma EN 312, 2010, por tener MOR inferior a 10,50 N/mm² pero se observa un aumento en la resistencia en esta variable según aumenta la concentración de aglutinante de polvo de piel de pata (ver gráfico 1), encontrándose el valor máximo (MOR= 5,9433 N/mm²) de la media para C1 seguido de D1 (MOR= 5,8267 N/mm²). Con diferencias significativas (P<0,05) respecto a A1 (3,6000 N/mm²) y B1 (4,1167N/mm²).

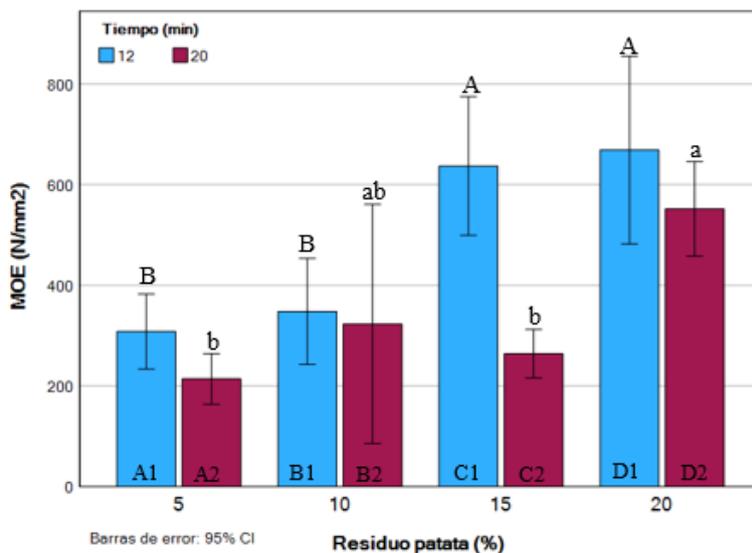


Figura 6. Valores de MOE (N/mm²) para los tableros ensayados: Distintas letras mayúsculas indican diferencias significativas para la variable tiempo (t=12 min) respecto la cantidad añadida de polvo de piel de patata (%). Distintas letras minúsculas indican diferencias significativas para la variable tiempo (t=20 min) respecto la cantidad añadida de polvo de piel de patata (%).

El mejor valor alcanzado para el módulo de elasticidad a flexión MOE es D1 (MOE=668,63 N/mm²) seguido de C1 (MOE= 636,81 N/mm²). Según aumenta la concentración de aglutinante de polvo de piel de patata (ver gráfico 2) también mejora el valor de MOE. Existen diferencias significativas (P<0,05) respecto a los tableros ensayados con menores concentraciones de polvo de piel de patata. Cuanto mayor es la concentración de residuo de piel de patata mayor es el módulo de elasticidad.

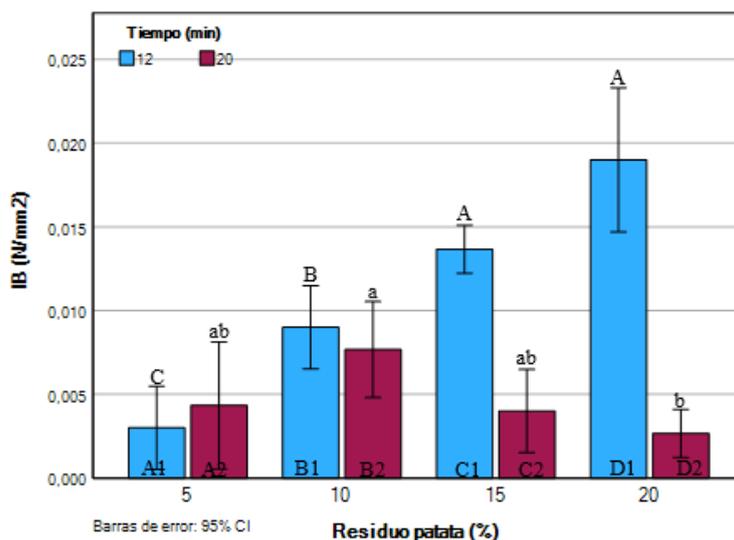


Figura 7. Valores de Cohesión Interna IB (N/mm²) para los tableros ensayados: Distintas letras mayúsculas indican diferencias significativas para la variable tiempo (t=12 min) respecto la cantidad añadida de polvo de piel de patata (%). Distintas letras minúsculas indican diferencias significativas para la variable tiempo (t=20 min) respecto la cantidad añadida de polvo de piel de patata (%).

Según especificaciones técnicas de tableros aglomerados, se solicitan valores mínimos, para el espesor de tablero elaborado (10 mm), de 0.24 N/mm² para ambiente seco y 0.40 N/mm² para uso específico en aplicaciones de interior, incluyendo el mobiliario, en ambiente seco. La cohesión interna de los materiales (IB) es considerablemente baja respecto a los mínimos requeridos para tableros de uso en mobiliario en ambiente seco (tabla 4), sin embargo, podemos observar claramente que se da un aumento

en la misma cuanto mayor es la cantidad de residuo de polvo de piel de patata (ver gráfico 3) para un tiempo de prensado de 12 minutos, alcanzando un valor significativamente mayor en D1. La variable concentración de residuo de polvo de piel de patata influye favorablemente en la cohesión interna de las partículas (IB) cuando el tiempo de prensado es de 12 minutos.

Conclusiones

En este trabajo se han evaluado las propiedades mecánicas y físicas de paneles elaborados con paja de arroz, utilizando residuo de piel de patata como aglutinante natural obteniendo un material que presenta buenas propiedades aislantes y podría ser utilizado como aislante térmico en los edificios debido a su baja conductividad térmica.

Las propiedades mecánicas estudiadas: módulo de resistencia a flexión (MOR), módulo de elasticidad (MOE) y cohesión interna de las partículas (IB), no cumplen con los mínimos requeridos según las normas europeas para tableros de uso en interior. Sin embargo, estas propiedades mejoran cuando aumenta el porcentaje de polvo de piel de patata y el tiempo de prensado es de 12 minutos.

Asimismo, el presente estudio, desarrolla un polvo procedente del procesamiento del residuo de peladura de piel de patata que puede usarse como aglutinante de tableros de fibra vegetal de forma satisfactoria.

Se deben realizar nuevos ensayos en los que se aumente el porcentaje de almidón añadido con el fin de mejorar los valores de módulo de resistencia a flexión (MOR), módulo de elasticidad (MOE) y cohesión interna de las partículas (IB) así como probar nuevos tiempos de prensado, temperatura y presión.

Bibliografía

BOE de 09/04/2022: Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. Boletín Oficial del Estado núm. 85

Bouasker, M., Belayachi, N., Hoxha, D., and Al-Mukhtar., M. 2014. Physical Characterization of Natural Straw Fibers as Aggregates for Construction Materials Applications. *Materials*, 7, 3034-3048; <https://doi.org/10.3390/ma7043034>

Buratti C., Belloni E., Lascaro E., Merli F., Ricciardi P., 2018. Rice husk panels for building applications: Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials. *Construction and Building Materials* <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.089>

El Mansouri., N.E., Salvadó, J. 2006. Structural characterization of technical lignins for the production of adhesives: Application to lignosulfonate, kraft, soda-anthraquinone, organosolv and ethanol process lignins. *Ind. Crop. Prod.*, 24(1), 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.10.002>

EN 12667. Thermal performance of building materials and products: Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods: Products of high and medium thermal resistance. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2002.

EN 310. Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.

EN 312. Particleboards–Specifications. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2010.

EN 317. Particleboards and fiberboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.

EN 319. Particleboards and fiberboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of de board. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.

EN 323. Wood-based panels. Determination of density. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.

EN 326. Wood-based panels. In Sampling, Cutting and Inspection. Part 1: Sampling and Cutting of Test Pieces and Expression of Test; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 1994.

Ferrández-García, C.E., Andreu-Rodríguez, J., Ferrández-García, M.T., Ferrández-Villena, M., and García-Ortuño, T. 2012. Panels made from giant reed bonded with non-modified starches. *BioResources*, 7(4), 5904-5916. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.7.4.5904-5916>

Ferrández-García, C.E., Andreu-Rodríguez, J., Ferrández-García, M.T., Ferrández-Villena, M., García-Ortuño, T. 2012. Panels made from giant reed bonded with non-modified starches. *BioResources*. 7(4), 5904-5916. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.7.4.5904-5916>

Ferrández-García, M., Ferrández-García, A., Ferrández-García, B.E., García-Ortuño, T., Martínez-Fernández, M., Ferrández-Villena, M. 2023. Análisis del almidón de maíz como adhesivo en los tableros aglomerados de partículas de paja de arroz. En: Pérez Ruiz, M., Egea Cegarra, G., Pérez Urrestarazu, L., Díaz de la Torre, L., Rodríguez Lizana, A., Franco Salas, A., González Ortega, M J., Pineda Martos R., y Prior Fernández A., (Eds.), Libro de actas del XII Congreso Ibérico de Agroingeniería. Gandulfo Impresores, S.L., Sevilla, pp. 314-323.

Guimarães Carvalho, A., Costa Lelis, R. C., do Nascimento, A. M. 2014. Avaliação de adesivos à base de taninos de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* e de *Acacia mearnsii* na fabricação de painéis aglomerados. *Cienc. Florest*, 24(2), 479-489. <https://doi.org/10.5902/1980509814588>

Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Centenario del departamento del arroz (1913-2013). 2013. Jornada Técnica Internacional sobre Investigación en Arroz. Sueca (Valencia).

Liao, R., Xu, J., Umemura, K. 2016. Low density sugarcane bagasse particleboard bonded with citric acid and sucrose: effect of board density and additive content. *BioResources*., 11(1), 2174-2185. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.11.1.2174-2185>

Oficina de Gestión Técnica del Parc Natural de L'Albufera. 2002. Importancia del cultivo del arroz en el parc natural de l'Albufera. Ed. Consellería de Medio Ambiente. 36 pp.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Nota informativa de la FAO sobre la oferta y la demanda de cereales Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>. (accessed Septiembre 2024).

Pascual Villalobos, M., Guerrero, M.M., Martínez, M. López, S., D.R.O.P Calasparra. 2023. Estrategias de Control de *Pyricularia oryzae* en el coto arrocerero de Calasparra. Ed. Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Medioambiental. 18 pp.

Ribo, M., Albiach, R., Pomares, F., Canet, R. 2017. Alternativas de gestión de la paja de arroz en la albufera de valencia. Ed. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA). Nota técnica, pp. 7.

Situación de los sectores lácteo, agrícola y ganadero en pequeñas poblaciones del cantón Mocha (Ecuador).

S. Ramos- Romero¹, I. Gavilanes-Terán¹, J. Idrovo-Gavilanes², J. Idrovo-Novillo¹,
Víctor Valverde-Orozco³, C. Paredes⁴

¹Facultad de Ciencias. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, EC060155-Riobamba (Chimborazo), Ecuador

²Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid UCM, Pl.de las Ciencias, 2,28040 Madrid

³Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, EC060108, Riobamba (Chimborazo), Ecuador

⁴Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Miguel Hernandez University, EPS-Orihuela, ctra. Beniel km 3.2, 03312 Orihuela, Alicante, Spain

Correo electrónico: stevensr25@hotmail.com

Resumen

El cantón Mocha se encuentra ubicado al suroeste de la provincia de Tungurahua (Ecuador). El cantón cuenta con una superficie total de 86,2 km² y los ingresos económicos de su población se obtienen principalmente a través de la agricultura, ganadería y la industria láctea con la elaboración de quesos. Estas actividades utilizan métodos de producción convencionales, generando grandes cantidades de residuos sólidos los que son inadecuadamente gestionados, lo que ocasiona alteraciones sobre el suelo como la eutrofización, toxicidad de los cuerpos de agua y disminución de la fertilidad de los suelos, debido al uso excesivo de fertilizantes químicos. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la producción, tipos de cultivos y ganado que se desarrolla en el sector y de este modo tener la información necesaria para plantear estrategias que promuevan la sostenibilidad del sector agropecuario de la zona. Para ello, se realizó un estudio de la matriz productiva, utilizando como método de recolección de datos la encuesta, en donde para el sector agrícola se tomaron los siguientes criterios: tipo de cultivo sembrado, hectáreas que cultivan, uso de fertilizantes y pesticidas, tipo de asesoramiento técnico, además del uso de los residuos generados de las cosechas. Las encuestas del sector ganadero estuvieron relacionadas con la raza de ganado, el número de cabezas de ganado, litros de leche producida diariamente, el número de hectáreas de terreno que son destinadas a estas actividades, tipo de alimento, fuentes hídricas de uso de bebida de agua y uso de plaguicidas para el pasto de pastoreo de los animales, así como usos del estiércol generado y su cercanía a fuentes hídricas. Con respecto a la industria láctea las encuestas consideraron al tipo de producto elaborado con mayor demanda, el volumen de leche requerido diariamente para la obtención de los distintos productos lácteos, y destino del lactosuero, entre otras. Los resultados indicaron que en el sector agrícola se produce principalmente patatas, maíz, cebolla, guisantes y habas en minifundios de menos de 7,5 ha y el 81,1% de los agricultores utilizan fertilizantes inorgánicos y pesticidas para los cultivos, teniendo el 70,3 % de los agricultores asesoramiento técnico para la utilización de estos insumos agrícolas. De otra mano, los datos mostraron que la mayor parte de los residuos vegetales generados en la zona son colocados directamente sobre el suelo o son usados como alimento para especies menores. Respecto al sector ganadero, el 56,8% de los encuestados indicaron que crían ganado bovino de la raza criolla, las cuales pueden producir alrededor de 100 litros de leche al día, alimentándose principalmente de pasto, y la fuente hídrica empleada mayoritariamente es el agua de riego. Por otra parte, el 71,6% de los ganaderos consideran el estiércol como un residuo, depositándolo directamente sobre el suelo, lo que podría afectar a los recursos hídricos cercanos. Finalmente, al estudiar la industria láctea, el 80% de los encuestados se dedica a la producción de quesos, y el principal residuo generado es el lactosuero, utilizado principalmente para alimentación animal o en muchos casos para riego de praderas causando impactos en el suelo y en los cuerpos de agua receptores.

Palabras clave: sector agropecuario, gestión de residuos agrícolas, gestión de residuos ganaderos, industria láctea, lactosuero

Situation of the dairy, agricultural and livestock sectors in small towns in the Mocha canton (Ecuador)

Abstract

The Mocha canton is located southwest of the province of Tungurahua (Ecuador). The canton has a total surface area of 86.2 km². The population's income is obtained mainly through agriculture, livestock, and the dairy industry through the cheese production process. These activities use conventional production methods, generating large amounts of solid waste that are inadequately managed, causing soil alterations such as eutrophication, toxicity of water bodies and decreased soil fertility due to the excessive use of chemical fertilizers. Therefore, the objective of this study was to evaluate the production, types of crops and livestock that are grown in the sector and thus have the necessary information to propose strategies that promote the sustainability of the agricultural sector in the area. To this end, a study of the productive matrix was carried out, using the survey as a method of data collection, where the following criteria were used for the agricultural sector: type of crop planted, hectares cultivated, use of fertilizers and pesticides, type of technical advice, as well as the use of crop residues generated. The surveys of the livestock sector were related to the breed of cattle, the number of heads of cattle, liters of milk produced daily, the number of hectares of land used for these activities, type of feed, water sources used for drinking water and use of pesticides for the grazing pasture of the animals, as well as, use of manure generated and its proximity to water sources. With respect to the dairy industry, the surveys considered the type of product in greatest demand, the volume of milk required daily to obtain the different dairy products, and the destination of the whey, among others. The results indicated that the agricultural sector mainly produces potatoes, corn, onions, beans, peas on smallholdings of less than 7.5 ha and 81.1% of farmers use inorganic fertilizers and pesticides for crops, with 70.3% of farmers receiving technical advice for the use of these agricultural inputs. On the other hand, the data showed that most of the vegetable waste generated in the area is placed directly on the ground or used as food for minor species. Regarding the livestock sector, 56.8% of the respondents indicated that they raise Criollo breed cattle, which can produce around 100 liters of milk per day, feeding mainly on pasture, and the main source of water used is irrigation water. On the other hand, 71.6% of the farmers consider manure as waste, depositing it directly on the soil, which could affect nearby water resources. Finally, when studying the dairy industry, 80% of those surveyed are engaged in cheese production, and the main waste generated is cheese whey, used mainly for animal feed or in many cases for irrigation of pastures, causing impacts on the soil and on the receiving bodies of water.

Keywords: agro-livestock sector, agricultural waste management, livestock waste management, dairy industry, cheese whey.

Introducción

El cantón Mocha se ubica al norte de la provincia de Chimborazo, está conformado por la parroquia urbana de Mocha y dos parroquias rurales: La Matriz y Pinguilí Santo Domingo. Esta última parroquia cuenta con los caseríos de Yanahurco, El Rosal, Acapulco, El Porvenir, Cochalata, Chilcapamba y Altillo. El cantón Mocha cuenta con una extensión aproximada de 85 km² con una altitud que varía entre los 2500 hasta los 4965 m.s.n.m. Actualmente, la actividad económica de este cantón se basa principalmente en la ganadería bovina y la agricultura. Se cultivan productos de ciclo corto, como la patata, cebolla colorada, maíz, habas, zanahoria, entre otros. Los cultivos se desarrollan bajo un modelo productivo preestablecido y subdesarrollado, caracterizado por la escasez de mano de obra para la agricultura, el bajo rendimiento de los productos agrícolas, el alto riesgo por fenómenos naturales, alta inversión en insumos, malas prácticas agrícolas y una disponibilidad de riego que depende de las condiciones geográficas, los mismos que al combinarlas hace que muchos de sus habitantes salgan en busca de nuevas fuentes de sustento. Por tal motivo, en los últimos años una actividad que ha tomado fuerza ha sido la ganadería bovina, debido al incremento en la superficie destinada al pasto cultivado, sobre todo en las partes altas de la frontera agrícola. La ganadería en el cantón se focaliza en la producción de leche para el desarrollo de productos lácteos (queso, yogurt, etc), utilizando bovinos de raza mestiza y criolla, en algunas fincas también se vende el animal en pie cuando ya han cumplido más de dos años, la alimentación suplementaria es ocasional y la base de la alimentación son los

pastizales con mezclas forrajeras (ray grass, trébol y pasto azul). Además, la población también cría y explota otras especies menores, como cobayas y aves de corral (Memoria Técnica cantón Mocha, 2014). No obstante, las actividades mencionadas son predominantemente realizadas por pequeños productores que enfrentan desafíos para acceder a tecnologías adecuadas destinadas a la gestión y valorización de los residuos, además de lidiar con restricciones normativas que limitan el reúso, reciclaje e industrialización de residuos en los procesos productivos, causando riesgos potenciales para la salud asociados a la presencia de patógenos, metales pesados y contaminantes orgánicos, así como los efectos a corto y largo plazo que estos contaminantes tienen sobre el suelo, aire y el agua (Ghirardini et al., 2020; Fu et al., 2021; van derWeerden et al., 2021). Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la producción, tipos de cultivos y ganado que se desarrolla en el sector y de este modo tener la información necesaria para plantear estrategias que promuevan la gestión sostenible de los residuos generados en el sector agropecuario de la zona.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en la parroquia urbana de Mocha y en las comunidades de las parroquias rurales: La Matriz y Pinguilí Santo Domingo. En esta área de estudio, se desarrolló un levantamiento de la línea base ambiental que abarcó aspectos como la geografía, el uso del suelo, las principales actividades económicas, la hidrología y las condiciones socioeconómicas de los habitantes de las comunidades locales. Además, se determinó la producción agropecuaria del sector utilizando como método de recolección de datos la encuesta. Posteriormente, en base a los gradientes altitudinales del cantón Mocha se identificaron los puntos de estudio que en primera instancia abarcaría las regiones enfocadas a la actividad agrícola, definiendo los tipos de productos que se producen en las franjas urbana y rural del cantón, así como también zonas de mayor producción de pastos y la disponibilidad a fuentes cercanas de riego. Se seleccionaron las comunidades de Yanahurco, El Rosal, Acapulco, El Porvenir, Cochalata; dado que la mayor parte de la superficie agropecuaria se encuentra en el rango de 2.800 a 3.600 m.s.n.m., con 1.686 ha. En las comunidades consideradas de mayor producción agrícola, se determinó tipo de cultivo sembrado, hectáreas que cultivan, uso de fertilizantes y pesticidas, tipo de asesoramiento técnico, además del uso de los residuos generados de las cosechas.

Por otro lado, un eje estratégico del cantón Mocha es la ganadería, dividida en dos zonas claramente definidas, la zona de mayor altitud dedicada principalmente a la cría de ganado vacuno para la producción de leche y la zona baja del cantón centrada en la crianza de animales menores, pero esta actividad no es muy significativa en esta zona de menor altitud. Por lo tanto, las encuestas se centraron en el ganado bovino y los criterios de selección incluyeron la raza del ganado, la cantidad de animales, la producción diaria de leche, el área de terreno dedicada a la ganadería, el tipo de alimentación, las fuentes de agua para el consumo animal y la aplicación de plaguicidas en los pastos, así como, el uso del estiércol y su proximidad a fuentes de agua. Las comunidades de San Juan y San José fueron elegidas debido a su cercanía a la zona alta (páramos) y su predominante enfoque en la ganadería.

Además, una actividad económica principal del desarrollo del cantón Mocha es la industria láctea que a través de la ganadería da origen a una materia prima de calidad como es la leche para la elaboración de productos lácteos entre los que destaca el queso. En el cantón Mocha la industria láctea está constituida principalmente por micro, pequeñas y medianas empresas, que brindan oportunidades de desarrollo a ciudadanos del cantón. Para ello, se encuestó a 10 pequeñas empresas productoras de queso ubicadas en las comunidades de Mocha, Mochapata, Yanayacu, la Dolorosa para obtener información sobre el tipo de producto lácteo producido, volumen de leche procesada al día y destino del suero de leche.

Resultados y Discusión

Los resultados mostraron que la producción agrícola ocupa gran parte de los suelos del cantón Mocha, con un 57 % del total dedicado a cultivos permanentes y transitorios, donde la labor agrícola se realiza en pequeñas parcelas de carácter extensivo-intensivo (menor a 7,5 ha), con tenencia de la tierra propia, con riego, niveles de rendimiento relativamente bajos, propios de tecnologías tradicionales y semi tecnificados donde, sin embargo, se cultivan gran variedad de productos. Económicamente predominan los cultivos de patata y maíz con un 24,3% y 20,3%, respectivamente (Figura 1), debido a su gran capacidad para adaptarse a regiones andinas con altitudes entre los 2.800 a 3.200 m.s.n.m, además de presentar ciclos relativamente cortos entre 4 a 6 meses, con respecto a los demás productos que se producen en la zona como la cebolla blanca, colorada, guisantes, habas, zanahoria, quinoa, cilantro, tomate, entre otros. También, es de destacar que el 37,8% de los agricultores practican la agricultura sostenible al producir cultivos asociados, preservando y asegurando un cierto nivel de rendimiento, así como estándares de calidad, lo que comúnmente se logra mediante la prevención y la lucha contra plagas, enfermedades y malezas no deseadas (Arias-Estévez et al., 2008), con respecto al 62,2% que realizan prácticas agrícolas tradicionales, labranza intensiva resultando muchas veces en disminución de la materia orgánica del suelo, debido a su oxidación rápida y mayor con el tiempo, causando pérdida de la actividad biológica y la fertilidad del suelo y por tanto, la degradación y la reducción de la resiliencia del suelo (Meena et al., 2018). Los mayores datos de producción se observaron en cultivos de patatas y maíz, con 3000 y 4000 kg, respectivamente, sin embargo, para alcanzar estos niveles de producción el 81,1% de los productores mencionó utilizar fertilizantes y plaguicidas con el objetivo de promover el crecimiento y desarrollo de los cultivos y aumentar el rendimiento. Estas prácticas producen efectos negativos en el medio ambiente, tales como el aumento del contenido de nitratos superior al estándar en las aguas subterráneas y la degradación del entorno ecológico (Liu y Huang, 2013). Un 70,3% de los productores manifestaron que los proveedores de estos insumos brindaban un asesoramiento técnico en el uso de fertilizantes y pesticidas. Sin embargo, el otro 29,7% mencionó que no recibe ninguna asesoría técnica por parte de los proveedores de insumos, causando probablemente eficacia reducida del producto fitosanitario, fitotoxicidad en la planta, contaminación del suelo y fuentes de agua cercanas (Celeste Molpeceres et al., 2023).

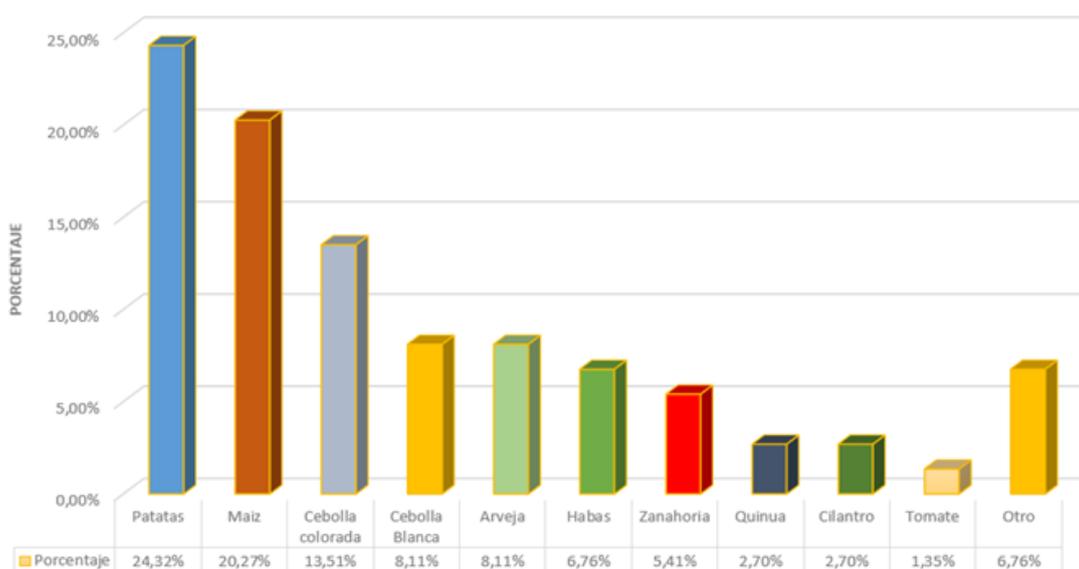


Figura 1. Porcentajes de aportación a la producción agrícola por producto en el cantón de Mocha

Los datos del uso de abonos orgánicos por parte de los productores, mostraron que un 47,3% usan como abonos gallinaza, estiércol de cobaya, conejo, vaca y humus, lo que se traduce en una mejora en el contenido de la materia orgánica del suelo, que influye directamente en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que finalmente conduce a un incremento en la productividad de los cultivos (Meena et al., 2017). Además, el 39,2% de los agricultores combinan los abonos orgánicos con fertilizantes inorgánicos y el 13,5% restante emplean únicamente fertilizantes inorgánicos, los cuales se formulan principalmente en concentraciones y combinaciones apropiadas para suministrar nutrientes esenciales a las plantas para sostener el crecimiento de los cultivos. Sin embargo, la mayor parte de los nutrientes aplicados se pierde en el medio ambiente a través de procesos físicos, químicos y bioquímicos y no pueden ser absorbidos por las plantas, lo que causa importantes pérdidas económicas y de recursos, pero también presenta amenazas muy graves para el suelo y el medio ambiente (Ombódi y Saigusa, 2000).

La generación de residuos en los cultivos también fue estudiada, encontrándose que los cultivos que generan mayor cantidad de residuos sólidos son los de maíz, habas, guisantes, quinoa y patatas; este hecho se debe a la estructura foliar del cual se desprenden hojas y tallos principalmente. Sin embargo, los cultivos que producen una menor cantidad de residuos son la zanahoria, debido a que solo se desechan la parte aérea (hojas). También, se cultivan productos en los que no se obtienen ningún residuo, como el cilantro, cebolla blanca y colorada. Respecto al destino que los productores brindan a los residuos, se puede evidenciar en la Figura 2 que un 51% lo aprovecha como alimento para ganado y especies menores, mientras que un 35% los coloca sobre el suelo, sin antes estabilizarlos. Esta última práctica podría causar diferentes efectos adversos, como el aumento de la tasa de mineralización del C orgánico endógeno del suelo a través del aumento de la actividad microbiana, la producción de condiciones anaeróbicas debido al consumo de oxígeno en la mineralización de materia orgánica no estabilizada y la modificación del pH del suelo (Medina et al., 2015). Además, los aleloquímicos presentes en los residuos de cultivo, como los compuestos polifenólicos, podrían inhibir la germinación y el desarrollo de plántulas del cultivo siguiente (Fu et al., 2021). Por otro lado, el 14% restante de los agricultores incinera los residuos de los cultivos, lo cual se considera útil ya que aumenta la fertilidad del suelo; sin embargo, la quema en realidad tiene un efecto mixto diferencial sobre la fertilidad del suelo, ya que puede aumentar la disponibilidad de fósforo y potasio y también aumentar el pH del suelo; sin embargo, desencadena la pérdida de otros nutrientes importantes como el nitrógeno y el azufre (Meena et al., 2016), al mismo tiempo que es el factor importante que causa la contaminación del aire al liberar gases de efecto invernadero y aerosoles a la atmósfera (Mgalula et al., 2021; Rahman et al., 2022). Además, la quema de residuos de cultivo puede contribuir a la pérdida de nutrientes durante las lluvias a través de la escorrentía y la disminución del almacenamiento de carbono en el suelo (Snyman, 2015) También, es de destacar que el 94,7% de los agricultores clasifica los productos vegetales y desecha los que no cumplen con los estándares de comercialización y no se venden. El 49% de estos vegetales desechados se destina al consumo propio; el 32% se utiliza como alimento para ganado y animales menores; y el 19% se reincorpora al suelo sin previo tratamiento de estabilización. En todos los casos, los residuos procedentes de los cultivos no reciben tratamiento previo a su disposición final.

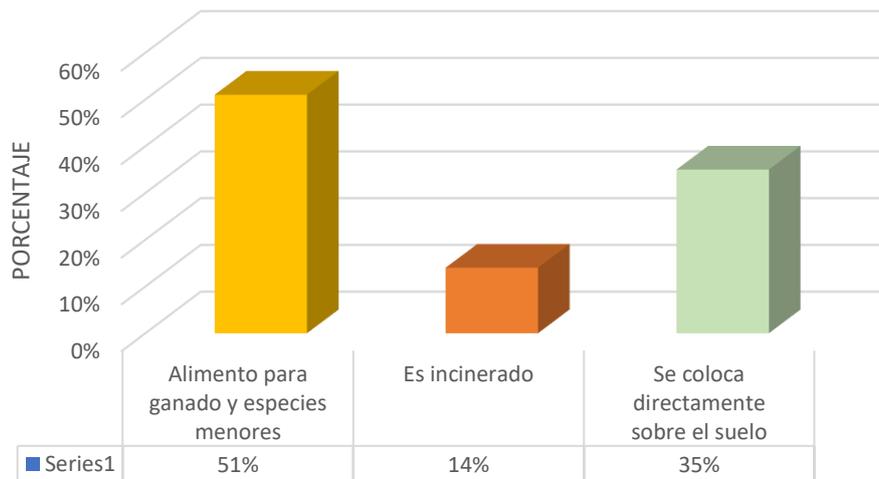


Figura 2. Porcentajes de destinos de los residuos al final de la cosecha en el cantón Mocha

En cuanto a la actividad pecuaria, el 80% de los entrevistados indicaron que su principal fuente de ingresos proviene de la cría de ganado vacuno. Esta actividad es llevada a cabo principalmente por pequeños núcleos familiares, que manejan entre 1 y 15 cabezas de ganado. Los productores prefieren la raza Criolla con un 56,8% (Figura 3) debido a su notable capacidad para adaptarse a condiciones extremas, incluyendo forrajes de baja calidad, temperaturas bajas y humedad reducida características de la zona, con respecto a las demás razas foráneas o mejoradas donde no habría los mismos resultados. La raza Criolla es valorada por su versatilidad, ya que se utiliza tanto para la producción de leche y carne, como para labores de trabajo (Mendoza et al., 2022).

RAZA DE GANADO VACUNO

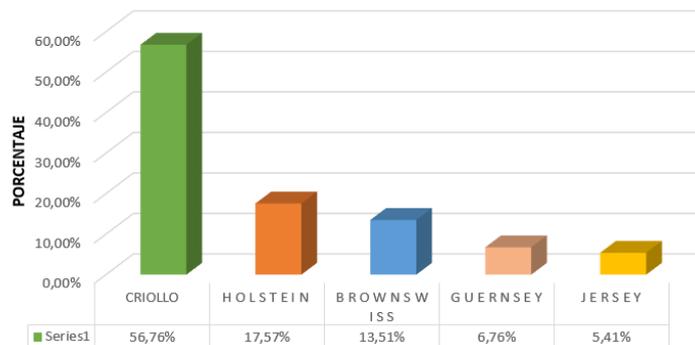


Figura 3. Porcentajes de razas de ganado vacuno criadas en el cantón Mocha

El ganado bovino se alimenta principalmente de pastos y alfalfa, mientras que un pequeño porcentaje lo hace de residuos de gramíneas, o con piensos. También, el 90% de productores manifestó que no se utilizan pesticidas para fumigar las zonas dedicadas al pastoreo, pues los animales muestran signos de toxicidad, problemas digestivos y nerviosos al ingerirlos, disminuyendo la calidad de la producción. Además, los datos mostraron que el 64,9% de los ganaderos reciben asesoría técnica para la crianza del ganado principalmente de centros veterinarios y de capacitaciones que han sido realizadas por el municipio del cantón en colaboración con el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. La evaluación de las fuentes hídricas disponibles para el ganado, mostraron los siguientes datos: el 56,8% del ganado bebe agua de riego, el 32,4% bebe agua potable, un 8,1% bebe agua de vertiente y solamente el 2,7% bebe agua de pozo (Figura 4).

FUENTES DE AGUA PARA EL GANADO

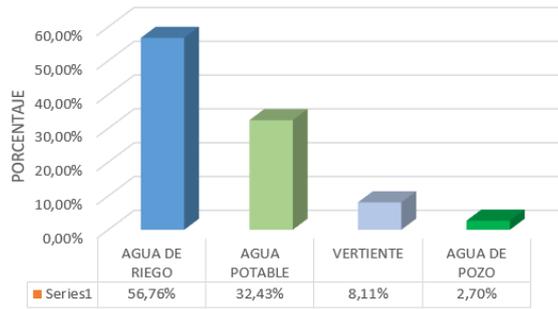


Figura 4. Fuente de agua para el ganado que se cría en el cantón Mocha.

Los ingresos económicos en la ganadería están directamente relacionados con la extensión de las áreas dedicadas al pastoreo. Se observan dos tipos principales de producción: las familias pequeñas que crían entre 1 y 15 animales, y las grandes explotaciones que se dedican a la ganadería extensiva en terrenos cercanos a los páramos, donde se manejan más de 50 cabezas de ganado. Considerando que una vaca puede llegar a producir entre 10 y 15 litros de leche al día, el 56,8% de los productores indicó que su ganado puede generar entre 1 y 100 litros diarios. No obstante, esta producción depende de múltiples factores, como la calidad de la alimentación, la raza del ganado y las condiciones ambientales del área de pastoreo.

En relación con el manejo de residuos ganaderos, el 72% de los ganaderos considera el estiércol como un residuo. De este porcentaje, el 58% lo utiliza aplicándolo directamente sobre el suelo, el 35% lo seca para usarlo posteriormente como abono, mientras que el 7% no le asigna un uso específico. Estas prácticas generan importantes impactos ambientales, como emisiones de gases de efecto invernadero (van derWeerden et al., 2021) y contaminación de fuentes de agua y suelos por el exceso de nutrientes, patógenos y xenobióticos administrados a los animales (Hw et al., 2016; Ghirardini et al., 2020).

La economía del cantón de Mocha también se sustenta en la industria láctea, con un total de 10 empresas distribuidas en las comunidades de Mocha, Mochapata, Yanayacu y La Dolorosa. De estas, el 80% se dedica a la producción de quesos, mientras que el 20% también elabora yogurt (Figura 5). El volumen de leche procesado varía según la capacidad de producción de cada empresa. Así, el 70% de las empresas, consideradas medianas, procesan entre 600 y 1000 litros diarios. En contraste, el 30% restante, clasificado como pequeñas empresas, maneja entre 50 y 500 litros al día.

PRODUCTOS LÁCTEOS

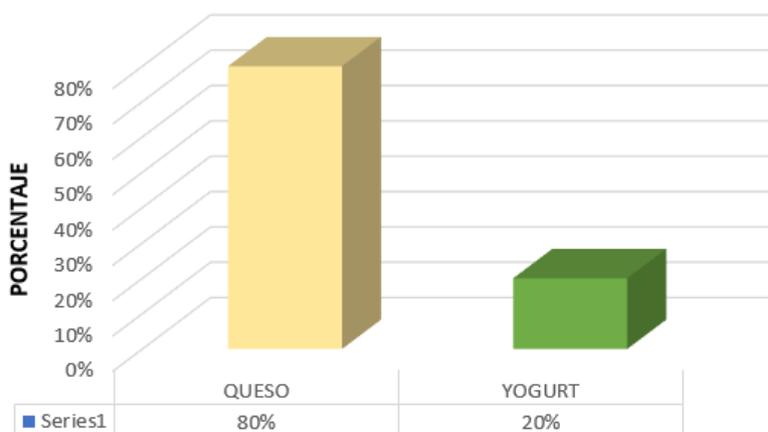


Figura 5. Productos Lácteos del cantón Mocha.

Dado que la mayoría de las empresas lácteas del cantón se especializa en la producción de queso, el proceso de elaboración se inicia con la separación del coágulo de la leche. Este proceso se realiza mediante la acción de ácidos o enzimas como el cuajo, que rompen el sistema coloidal de la leche en dos fracciones distintas. La primera fracción, sólida, está compuesta principalmente por proteínas insolubles y lípidos, que durante su precipitación arrastran y atrapan en menor medida algunos de los componentes solubles en agua (Poveda, 2013). La segunda fracción, líquida es el lactosuero, el cual es su mayoría es lactosuero dulce. Se pueden diferenciar dos tipos de lactosuero: lactosuero dulce (pH = 6,2–6,6; producido a partir de la coagulación de la caseína por acción enzimática del cuajo) y lactosuero ácido (pH = 4,6–5,0; obtenido a partir de la coagulación de la leche por acción ácida de los lactobacilos o del ácido láctico o de ácidos inorgánicos) (Fox et al., 2017).

El lactosuero es considerado un residuo por el 100% de los productores. Este enfoque se debe a la falta de conocimiento sobre los beneficios nutricionales de este subproducto, las dificultades para acceder a tecnologías adecuadas para su manejo y procesamiento, así como a las limitaciones en la regulación alimentaria que impiden su utilización adecuada como ingrediente alimenticio. Como resultado, el 50% de los productores lo utiliza para alimentar ganado bovino y porcino. El 20% lo vierte directamente en las praderas, lo que provoca una reducción del pH del suelo y la liberación de gases, así como, la contaminación de los cuerpos de agua, contribuyendo al crecimiento de algas y bacterias que consumen el oxígeno del agua, lo que lleva a la asfixia de los ríos y la gradual desaparición de los peces, así como a la promoción de la eutrofización (Raghnath et al., 2016). Finalmente, el 10% de los productores lo vende el lactosuero a muy bajo precio (Figura 6).

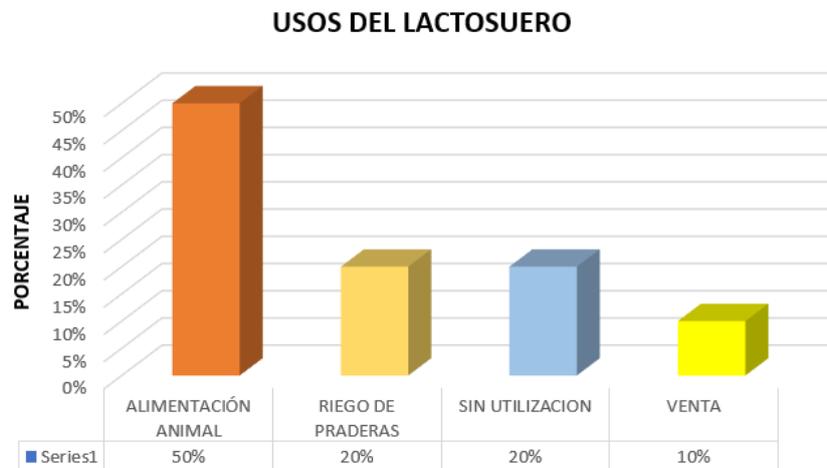


Figura 6. Usos del lactosuero en el cantón Mocha.

Conclusiones

Los resultados indican que la economía del cantón Mocha se fundamenta en la agricultura y la ganadería. Los cultivos mayoritarios son el de patata y maíz. La agricultura es llevada a cabo principalmente por pequeños núcleos familiares que gestionan parcelas de menos de 7,5 hectáreas, resultando en producciones modestas. Un alto porcentaje de agricultores (81,1%) recurre a fertilizantes para mejorar los rendimientos de sus cultivos. Sin embargo, el 29,7% de los que utilizan fertilizantes químicos lo hace sin criterios técnicos adecuados en cuanto a dosificación y almacenamiento, ignorando los problemas ambientales asociados. Un 47,3% de los agricultores emplea abonos orgánicos, como gallinaza, estiércol de cobaya, conejo, vaca y humus. Los residuos agrícolas se destinan mayormente a la alimentación de ganado y animales menores, mientras que una menor proporción se utiliza directamente como nutriente para el suelo o se incinera.

En cuanto a la ganadería, la actividad principal es la cría de ganado bovino, especialmente para la producción de leche. La raza criolla predomina sobre las razas mejoradas, y el ganado se alimenta principalmente de pastos, utilizando mayormente agua de riego para su abastecimiento. El estiércol generado se considera un residuo y la mayoría se reincorpora al suelo sin tratamiento previo, lo que genera impactos negativos en el aire, el suelo y las fuentes de agua cercanas. Un porcentaje menor lo seca antes de aplicarlo al suelo. Dado que la mayor parte de la producción se destina a la producción de leche, el cantón se especializa en la elaboración de queso, y la mayor parte de los productores obtiene como subproducto el lactosuero dulce, mediante la adición de cuajo. El lactosuero es considerado un residuo por todos los productores, y la mayoría lo utiliza para alimentar ganado bovino y porcino, mientras que el 20% restante lo vierte directamente en las praderas, lo que provoca la contaminación de cuerpos de agua, suelo y aire.

Estos resultados demuestran la urgente necesidad de proponer tratamientos ambientalmente amigables para los residuos agro-ganaderos y del sector lácteo, que fomenten la sostenibilidad de estas actividades económicas de la zona estudiada, solucionando con ello los problemas ambientales existentes y aumentando la rentabilidad de estas actividades.

Bibliografía

Arias-Estévez, M., López-Periago, E., Martínez-Carballo, E., Simal-Gándara, J., Mejuto, J.-C., García-Río, L., 2008. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 123(4), 247-260. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.07.011>

Celeste Molpeceres, M., Zulaica, M. L., Tomaino, V. B., 2023. Cuestionamientos al uso de agroquímicos en Argentina y el mundo (2000-2020): una revisión. *Novum Ambiens* 1, e2340. <https://doi.org/10.31910/novamb.v1.n1.2023.2340>

Fox, P.F., Guinee, T.P., Cogan, T.M., McSweeney, P.L.H., 2017. *Fundamentals of Cheese Science*, 2nd ed. Springer, New York, USA.

Fu, B., Chen, L., Huang, H., Qu, P., Wei, Z., 2021. Impacts of crop residues on soil health: A review. *Environ Pollut B* 33, 164-173. <https://doi.org/10.1080/26395940.2021.1948354>

Ghirardini, A., Grillini, V., Verlicchi, P., 2020. A review of the occurrence of selected micropollutants and microorganisms in different raw and treated manure—Environmental risk due to antibiotics after application to soil. *Sci. Total Environ.* 707, 136118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136118>

Hw, Z., Pagliari, P.H., Waldrip, H.M., 2016. Applied and Environmental Chemistry of Animal Manure: A Review. *Pedosphere* 26, 779-816. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60087-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60087-X)

Liu, E. M., Huang, J., 2013. Risk preferences and pesticide use by cotton farmers in China. *J. Dev. Econ.* 103, 202–215. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2012.12.005>

Medina, J., Monreal, C., Barea, J.M., Arriagada, C., Borie, F., Cornejo, P., 2015. Crop residue stabilization and application to agricultural and degraded soils: A review. *Waste Manag. Res.* 42, 41-54. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.002>

Meena, B. L., Fagodiya, R. K., Prajapat, K., Dotaniya, M. L., Kaledhonkar, M. J., Sharma, P. C., Meena, R. S., Mitran, T., Kumar, S., 2018. Legume Green Manuring: An Option for Soil Sustainability, in: Meena, R.S., Das, A., Yadav, G.S., Lal, R. (Eds.), *Legumes for Soil Health and Sustainable Management*. Springer, Singapore, pp. 387-408). https://doi.org/10.1007/978-981-13-0253-4_12

Meena, H., Meena, R. S., Rajput, B. S., Kumar, S., 2016. Response of bio-regulators to morphology and yield of clusterbean [*Cyamopsis tetragonoloba* (L.) Taub.] under different sowing environments. *J. Appl. Sci.* 8(2), 715-718. <https://doi.org/10.31018/jans.v8i2.863>

Meena, R. S., Gogoi, N., Kumar, S., 2017. Alarming issues on agricultural crop production and environmental stresses. *J. Clean. Prod.*142, 3357-3359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.134>

Memoria Técnica cantón Mocha, 2014
http://metadatos.sigtierras.gob.ec/pdf/Memoria_tecnica_Coberturas_MOCHA_20150306.pdf (acceso 5 septiembre 2024)

Mendoza, D., Marini, P., Zambrano, J., 2022. Los bovinos criollos un recurso zoogenético de seguridad alimentaria para Ecuador y Latinoamérica. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS* 4, 175-185. <https://www.editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/83>

Mgalula, M.E., Wasonga, O.V., Hülsebusch, C., Richter, U., Hensel, O., 2021. Greenhouse gas emissions and carbon sink potential in Eastern Africa rangeland ecosystems: A review. *Pastoralism* 11, 19. <https://doi.org/10.1186/s13570-021-00201-9>

Ombódi, A., Saigusa, M., 2000. Broadcast application versus band application of polyolefin-coated fertilizer on green peppers grown on andisol. *J. Plant Nutr.*23(10), 1485-1493. <https://doi.org/10.1080/01904160009382116>

Raghunath, B. V., Punnagaiarasi, A., Rajarajan, G., Irshad, A., Elango, A., Mahesh Kumar, G., 2016. Impact of Dairy Effluent on Environment-A Review, in: Prashanthi, M., Sundaram, R. (Eds), *Integrated Waste Management in India*. Environmental Science and Engineering. Springer, Suiza, pp. 239-249. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27228-3_22

Rahman, M.H., Singh, N., Kundu, S., Datta, A., 2022 Potential areas of crop residue burning contributing to hazardous air pollution in Delhi during the post-monsoon season. *J. Environ. Qual.* 51, 181-192. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20326>

Snyman, H.A., 2015. Short-term responses of Southern African semi-arid rangelands to fire: A review of impact on soils. *Arid Land J. Manag. Res* 29, 222-236. <https://doi.org/10.1080/15324982.2014.944244>

van derWeerden, T.J., Noble, A., de Klein, C.A.M., Hutchings, N., Thorman, R.E., Alfaro, M.A., Amon, B., Beltran, I., Grace, P., Hassouna, M., 2021. Ammonia and nitrous oxide emission factors for excreta deposited by livestock and land-applied manure. *J. Environ. Qual.* 50, 1005-1023. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20259>

Ejemplo de gestión sostenible mediante agrocompostaje de residuos de la industria oleícola en una almazara en la comunidad valenciana

Natalia Manrique^{1*}, Cristina Álvarez-Alonso¹, S. Sánchez-Méndez¹, Carlos Gómez¹, Enrique Agulló¹, Ana García-Rández¹, Vicente Blay¹, Ignacio Irigoien², Marga López³, Raúl Moral¹, M^a Dolores Pérez-Murcia¹, M^a Ángeles Bustamante¹

¹CIAGRO, Universidad Miguel Hernández, EPS-Orihuela, Ctra. Beniel, Km 3.2, 03312 Orihuela, Alicante.

² Dpto. de Agronomía, Biotecnología y Alimentación UPNA- Universidad Pública de Navarra, 31006, Pamplona, Navarra. ³ Dpto. d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia (DEAB), Escola Superior d'Agricultura de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Esteve Terradas, 8, 08860 Castelldefels, Barcelona
mail: nmanrique@umh.es

Resumen

La gestión de los residuos de producción del aceite de oliva, como el alperujo, presenta desafíos debido a las características particulares del residuo, así como a la estacionalidad de su producción y el importante volumen generado. Por ello, la gestión sostenible de estos residuos es un reto significativo en la sociedad actual. En la campaña 2022-23, el sector oleícola de la Comunidad Valenciana produjo más de 18.000 toneladas de aceite de oliva, lo que generó un gran volumen de residuos oleícolas que requieren una gestión adecuada. El compostaje se presenta como una alternativa sostenible a los métodos tradicionales de gestión de estos residuos.

En el municipio de Enguera (Comunidad Valenciana), en la propia instalación donde se produce el aceite de oliva, se han desarrollado diversas mezclas de compostaje constituidas por los residuos provenientes de la propia almazara, así como de productores cercanos, con el objetivo de producir compost utilizable en sus instalaciones como sustituto de fertilizantes inorgánicos. Esta estrategia no solo mejora la sostenibilidad de la planta, sino que también reduce el consumo de recursos naturales y protege el medioambiente.

Por tanto, el propósito de este estudio fue comparar cuatro ciclos de muestreo del compostaje realizados en tres pilas, utilizando una mezcla de alperujo, hoja de olivo, gallinaza, sarmiento, orujo y chips de madera. Se llevó a cabo un seguimiento del proceso de compostaje y se caracterizaron tanto los materiales iniciales como el compost resultante en términos de valor agronómico, madurez, estabilidad e higienización, para determinar si el compost producido presentaba adecuadas características para su uso en agricultura sin implicar ningún tipo de riesgo para la salud humana y/o el medioambiente.

Palabras clave: compost, residuos agroindustriales, alperujo, madurez, estabilidad, valorización de residuos orgánicos.

Example of sustainable management by means of agro-composting of olive mill waste in a plant in the valencian community

Abstract

The management of olive oil waste, such as olive mill waste (alperujo), presents challenges due to the particular characteristics of the waste, as well as the seasonality of the production and the important volume generated. Therefore, the sustainable management of these wastes is nowadays a significant challenge for our society. In the 2022-23 campaign, the olive oil sector in the Valencian Community produced over 18,000 tons of olive oil, which generated a large volume of olive mill waste that requires proper management. Co-composting emerges as a sustainable alternative to traditional waste management methods.

In the municipality of Enguera (Valencian Community), at the own installation where the olive oil is produced, several composting mixtures have been developed, formed by the organic wastes of this installation and from nearby producers for composting, to produce compost that can be used in its facilities as a substitute for

inorganic fertilizers. This strategy not only enhances the sustainability of the plant but also reduces the consumption of natural resources and improve the environment protection.

Therefore, the purpose of this study was to compare four composting cycles carried out in three piles, using a mixture of alperujo, olive leaves, poultry manure, vine shoots, orujo, and wood chips. The composting process was monitored, and both the initial materials and the resulting compost were characterized in terms of agronomic value, maturity, stability, and sanitization. The goal was to determine if the produced compost has adequate properties for its use in agriculture without posing any risk to human health and/or the environment.

Keywords: compost, agroindustrial wastes, alperujo, maturity, stability, valorisation of organic wastes.

Introducción

En los últimos años, el incremento de la población ha exacerbado la generación de residuos en los diferentes sectores (INE., 2023). En el sector primario, este fenómeno se manifiesta en el aumento de la producción de aceite de oliva, lo que ha resultado en la acumulación de subproductos de la industria oleícola, como alperujos, orujos y alpechines. Estos subproductos plantean dificultades particulares debido a su complejidad química y biológica, así como a su considerable volumen (MAPA, 2023).

Para abordar esta problemática de manera efectiva, es esencial emplear técnicas de gestión de residuos que permitan su valorización y reduzcan su impacto ambiental. Entre estas técnicas, el co-compostaje se presenta como una estrategia prometedora para transformar los residuos olivareros en compost. Este compost puede ser elaborado in situ y utilizado en las propias instalaciones como biofertilizante, sustituyendo así la fertilización inorgánica (Joumri y col., 2024).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la gestión mediante compostaje de los residuos orgánicos derivados de la producción de aceite de oliva en una almazara situada en el municipio de Enguera (Valencia). Para ello, se elaboraron 3 mezclas de compostaje y se hizo un seguimiento de los procesos, así como se determinaron las características en los compost finales, considerando su valor agronómico, madurez, estabilidad e higienización para evaluar si los compost obtenidos presentaban características adecuadas para su uso en agricultura o si, por el contrario, podrían representar algún tipo de riesgo ambiental.

Materiales y Métodos

En la Tabla 1 se presenta la caracterización de los materiales utilizados en la planta de Enguera (Valencia) para la elaboración de las tres mezclas destinadas al proceso de compostaje. Para este proceso, se emplearon residuos generados en la obtención de aceite de oliva (alperujo), así como otros residuos orgánicos procedentes del entorno cercano, como orujo y chips de madera de una bodega, además de estiércol de oveja de un ganadero local. Las pilas de los diferentes ciclos se formaron con las mismas cantidades: 68.134 kg de alperujo, 17.094 kg de gallinaza, 1.650 kg de hoja de olivo, 5.464kg de sarmiento, 8.817 kg de orujo y 2.197 kg de chips de madera, Lo que corresponde al 65.9%, 16.5%, 1.6%, 5.3%, 8.5% y 2.1%, respectivamente. Durante el proceso de compostaje, se realizaron riegos en cinco ocasiones: en los días 17, 91, 108, 130 y 213. Además, cada 7 a 14 días se tomaron registros de la temperatura mediante un sensor para monitorear las condiciones del proceso. Durante el proceso de compostaje, se realizaron cinco volteos de las pilas, teniendo la etapa bio-oxidativa del proceso una duración de 251 días

Por otro lado, se llevaron a cabo análisis en laboratorio para obtener diversos resultados. Entre los métodos empleados se incluyen el uso de equipos como el pHmetro y el conductímetro, además de procedimientos para evaluar la capacidad de intercambio catiónico, el carbono extraíble y el índice de germinación, entre otros.

Tabla 1. Caracterización de los materiales iniciales.

Tipo Producto	Humedad (%)	pH	CE (dS/m)	MO (%)	N (%)	Corg/NT	Na (g/kg)	K (g/kg)	P (g/kg)
Alperujo	56,2	5,8	4,9	88,4	1,8	30,6	0,4	21,0	2,0
Gallinaza	40,2	6,6	8,5	80,1	3,2	13,2	3,2	29,6	8,5
Hoja de olivo	18,7	5,1	2,5	91,0	1,6	32,6	0,2	10,6	1,4
Sarmiento	22,8	6,8	1,7	95,5	0,8	55,2	0,2	7,1	1,6
Orujo	20,6	6,3	3,3	88,1	2,2	24,4	0,1	33,7	4,3
Chips madera	25,2	5,5	0,5	97,6	0,2	195,9	0,0	2,3	0,2

CE conductividad eléctrica; MOT: materia orgánica total; NT: nitrógeno total; COT: carbono orgánico total

Resultados y Discusión

En la Tabla 2 se detallan las características térmicas asociadas a los procesos de compostaje. Se identificó una notable exotermia (medida como el índice EXI^2 dividido por los días de la fase bio-oxidativa) a lo largo de los distintos procesos de compostaje. Las temperaturas registradas se mantuvieron por encima de los 50 °C durante más de 214 días, alcanzando temperaturas superiores 65 °C durante 55 días y más de 70°C durante 21 días. cumpliendo así con los requisitos de higienización establecidos en el Reglamento (UE) 2019/1009, asegurando así una reducción óptima de patógenos en el compost final.

Tabla 2: Características térmicas.

Parámetros térmicos	Pila 1	Pila 2	Pila 3
Nº Días >40°C	257	257	253
Nº Días >50°C	255	256	214
Nº Días >60°C	116	107	96
Temperatura máxima	75	79	79
Temperatura promedio	53	55,4	53,9
Días Bio-oxidativo	7,8	7,8	7,8
Nº días >40°C/Bio-oxidativa	0,915	0,915	0,900
EXI^2 Acumulado	425268	449785	387075
Ratio EXI^2 /Nº días Bio-oxidativa	1513	1601	1377

EXI^2 : sumatorio cuadrático de la diferencia diaria entre la temperatura promedio de la pila y la temperatura ambiente.

La Tabla 3 muestra la evaluación de los parámetros fisicoquímicos a lo largo del proceso. En las diferentes mezclas de compostaje se observó una disminución de más del 50% en la materia orgánica (MO) debido a la degradación aeróbica de los compuestos orgánicos.

Tabla 3. Evolución de los parámetros fisicoquímicos y químicos durante el proceso (s.m.s).

	Densidad (kg/L)	Humedad (%)	pH	EC (ds/m)	MO (%)	NT (%)	Corg/NT	Na (g/kg)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
Pila 1										
M1	0,368	55,4	6,9	4,0	80,5	2,1	21,7	0,9	0,9	2,2
M2	0,702	61,1	8,4	1,1	61,8	1,7	23,3	0,4	0,8	0,9
M3	0,665	20,1	8,1	2,4	58,8	1,9	19,4	0,6	0,9	1,6
M4	0,529	32,9	8,6	1,7	46,9	2,20	13,9	0,7	1,4	2,3
Pila 2										
M1	0,313	50,1	7,1	5,0	78,0	2,3	17,7	1,5	1,1	2,5
M2	0,643	64,2	7,3	1,3	66,4	1,7	22,2	0,2	0,6	0,6
M3	1,026	31,8	8,6	2,0	46,3	1,2	22,8	0,5	0,7	1,2
M4	0,597	22,1	8,8	1,5	42,5	1,8	15,0	0,7	1,1	2,1
Pila 3										
M1	0,351	34,3	7,1	3,6	80,4	1,7	23,2	0,6	0,7	1,8
M2	0,801	62,7	8,0	1,1	67,7	1,4	33,4	0,2	0,4	0,5
M3	0,605	25,6	8,2	2,1	58,9	2,2	16,5	0,5	0,9	1,2
M4	0,639	37,8	8,4	1,4	45,0	2,1	13,8	0,6	1,5	1,7

CE conductividad eléctrica; MOT: materia orgánica total; NT: nitrógeno total; COT: carbono orgánico total.

Durante el proceso, se observó un aumento en el pH, obteniendo valores ligeramente básicos al final del proceso. En contraste, la salinidad disminuyó durante el proceso en todas las pilas, probablemente debido a que las pilas se desarrollaron en un área sin cobertura, por lo que la lluvia pudo haber provocado pérdidas por lixiviación. En cuanto al nitrógeno (N), se registró un ligero incremento en los ciclos 1 y 3, mientras que en el ciclo 2 se observó una leve disminución. El P₂O₅ se mantuvo relativamente constante, con pequeñas variaciones a lo largo del proceso. Por otro lado, el K₂O disminuyó en los ciclos 2 y 3, mientras que en el ciclo 1 experimentó un leve incremento. La Tabla 4 detalla los parámetros de madurez de los compost finales y el contenido de metales pesados. Los análisis mostraron que todos los composts lograron una madurez y estabilidad apropiadas, sin evidencias de fitotoxicidad, y con un índice de germinación que superó el 50%. Asimismo, se registró una mayor presencia de ácidos húmicos en comparación con los ácidos fúlvicos. (Brinton y col. 1995). Además, conforme al Real Decreto 506/2013, sobre productos fertilizantes, los compost finales obtenidos de los tres ciclos de compostaje se clasificaron de la siguiente manera: los ciclos 1 y 3 se clasificaron como Clase B, mientras que el ciclo 2 alcanzó la clasificación de Clase A.

Tabla 4. Parámetros de madurez y metales pesados.

	Polifenoles (mg/Kg)	IG (%)	Cext (%)	Cfulv (%)	Chum (%)	Cd (mg/Kg)	Cr (mg/Kg)	Cu (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)
Pila 1	1816	106	8,8	1,9	6,9	0,3	78,8	61,4	19,5	10,9	226
Pila 2	1086	109	5,9	1,2	4,7	0,3	50,9	53,6	14,4	18,8	179
Pila 3	812	117	7,0	1,5	5,5	0,3	49,9	70,9	15,3	17,7	245

Cext: Carbono extraíble, C_{fulv}: Ácidos fúlvicos, C_{hum}: ácidos húmicos, IG: índice de germinación.

Conclusiones

Los compost obtenidos a partir de las tres pilas de compostaje exhibieron condiciones óptimas en términos fisicoquímicos y químicos, así como en cuanto a contenido nutriente y grado de madurez. Estos compost cumplieron con los estándares regulatorios en cuanto al contenido de metales pesados, asegurando la seguridad y calidad del producto final. Esta conformidad con las normativas refuerza la sostenibilidad del proceso, garantizando que el compost sea seguro y eficaz para su uso en aplicaciones agrícolas.

El proceso de compostaje también se integra perfectamente en un sistema de economía circular, que busca maximizar el uso de recursos y minimizar los desechos. Al transformar residuos orgánicos en compost de alta calidad, se cierra el ciclo de nutrientes y se promueve la reutilización de materiales, reduciendo la necesidad de insumos externos y minimizando el impacto ambiental.

Como resultado, los compost finales obtenidos presentaron una calidad agronómica adecuada, lo que no solo mejora la fertilidad del suelo, sino que también apoya la sostenibilidad agrícola y medioambiental. Este enfoque contribuye de manera significativa a que las industrias puedan aprovechar los residuos, o mejor llamados materias primas secundarias, en sus propias instalaciones.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada en el marco del proyecto de investigación NEOCOMP (ref. PID2020-113228RB-I00) financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033. Los autores también quieren agradecer a la empresa Coop Vall de Quatretonda por su ayuda en este estudio.

Bibliografía

Brinton, W. F., Evans, E., Droffner, M. L., & Brinton, R. B. (1995). A standardized Dewar test for evaluation of compost self-heating. *Biocycle*, 36(11), 1-16.

INE (2023). Instituto Nacional de Estadística, Estadística sobre generación de residuos. Últimos datos. https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176841&menu=ultiDatos&idp=1254735976612 (fecha de consulta 24/05/2024)

Joumri, L. E., Labjar, N., El Hajjaji, S., Douaik, A., Benali, A., Halima, O. I., ... & Zouahri, A. (2024). Can Co-Composted Olive Mill by-Products be an Environmentally Conscious Approach for Enhancing Soil Fertility and Plant growth? A Review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-21.

MAPA (2023). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Anuario de estadística 2023. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/2023/default.aspx?parte=1> (fecha de consulta 24/05/2024)

Vico A., Pérez-Murcia M.D., Bustamante M.A., Agulló E., Marhuenda-Egea F.C., Sáez J.A., Paredes C., Pérez-Espinosa A., Moral R. 2018. Valorization of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) pruning biomass by co-composting with urban and agri-food sludge. *Environ Manage.* 226, 408-415.

Alternativas de gestión, tratamiento y valorización de los lixiviados procedentes de la disposición de residuos sólidos urbanos

C. Díaz ^{1*}, C. Paredes ²

¹Fundación Universitaria de San Gil (UNISANGIL), km 2 vía Matepantano, El Yopal, Casanare, 850001, Colombia, Correo electrónico: christtiam1995@gmail.com

*Estudiante del Máster Universitario en Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos.
Universidad Miguel Hernández

²Instituto de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Universidad Miguel Hernández, Ctra. Beniel km 3,2, 03312-Orihuela (Alicante)

Correo electrónico: c.paredes@umh.es

Resumen

En este estudio se presentó la problemática de la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) en el mundo y en América Latina, destacando que la mayoría de los residuos sólidos en términos generales se eliminan sin un proceso de aprovechamiento en la mayor parte de los países en vía de desarrollo, lo que genera un impacto ambiental negativo debido a la generación de gases y lixiviados. Se focalizó la gestión de los lixiviados generados por la disposición de residuos en los vertederos, presentando y promoviendo sistemas de tratamiento eficientes y alternativas de aprovechamiento para reducir su impacto ambiental. Se identificaron buenas prácticas y oportunidades de mejora en la gestión de lixiviados en rellenos sanitarios. Se revisó exhaustivamente las alternativas de gestión, tratamiento y valorización de lixiviados, subrayando la importancia de estrategias integradas para abordar la complejidad de estos efluentes y promover la sostenibilidad ambiental en la gestión de los RSU. La metodología incluyó una revisión bibliográfica en bases de datos como Web of Science (WOS) y Dialnet, enfocándose en artículos de investigación publicados. Los resultados mostraron que las tecnologías convencionales combinadas con procesos de membrana son fundamentales para cumplir con regulaciones estrictas y lograr altos niveles de eficiencia en la eliminación de contaminantes. La revisión también reveló una preferencia por enfoques biológicos y fisicoquímicos, con aplicaciones exitosas de procesos como la ozonización y la electroquímica para la eliminación efectiva de contaminantes en lixiviados estabilizados. Además, se identificaron tendencias regionales significativas, como el alto uso de tecnologías biológicas en Iberoamérica, reflejando la importancia de adaptar las estrategias de tratamiento a las particularidades locales. Se destaca el potencial de estas tecnologías para la generación de recursos valiosos, como biogás y agua tratada, que pueden ser utilizados en diversas aplicaciones industriales y agrícolas, impulsando así la economía circular y la sostenibilidad en la gestión de residuos. En conclusión, la gestión integral de RSU y la valorización de lixiviados no solo reducen la carga contaminante de los vertederos, sino que también generan oportunidades significativas para la producción de recursos y productos útiles, promoviendo una gestión más sostenible y eficiente de los residuos urbanos.

Palabras claves: Disposición de residuos sólidos, rellenos sanitarios, lixiviado, tratamiento de lixiviados, valorización de lixiviado.

Alternatives for management, treatment and valorization of leachate from the disposal of municipal solid waste

Abstract

The problem of municipal solid waste (MSW) management in the world and in Latin America is presented, highlighting that most of the solid waste in general terms is eliminated without a recycling process, in a greater proportion in developing countries, which can have negative impacts on the environment due to the generation of gases and leachates. The management of leachate generated by the disposal of waste in landfills is focused, presenting and promoting efficient treatment systems and use alternatives to reduce their environmental impact.

Good practices and opportunities for improvement in leachate management in landfills are identified. The alternatives for leachate management, treatment and recovery were exhaustively reviewed, highlighting the importance of integrated strategies to address the complexity of these effluents and promote environmental sustainability in MSW management. The methodology included a bibliographic review in databases such as Web of Science (WOS) and Dialnet, focusing on published research articles.

The results show that conventional technologies combined with membrane processes are essential to comply with strict regulations and achieve high levels of contaminant removal efficiency. The review reveals a preference for biological and physicochemical approaches, with successful applications of processes such as ozonation and electrochemistry for the effective removal of contaminants in stabilized leachates. In addition, significant regional trends are identified, such as the high use of biological technologies in Latin America, reflecting the importance of adapting treatment strategies to local particularities. The potential of these technologies for the generation of valuable resources, such as biogas and treated water, is highlighted, which can be used in various industrial and agricultural applications, thus promoting the circular economy and sustainability in waste management. In conclusion, the comprehensive management of MSW and the recovery of leachate not only reduces the polluting load of landfills, but also generates significant opportunities to produce useful resources and products, promoting more sustainable and efficient management of urban waste.

Keywords: Solid waste disposal, landfills, leachate, leachate treatment, leachate recovery.

Introducción

Los residuos sólidos urbanos (RSU) representan una fracción significativa de los desechos generados en entornos urbanos a nivel mundial, abarcando una diversidad de materiales como envases, vidrio, metal, cartón, papel y plástico. Estos materiales, si son gestionados de manera adecuada, pueden ser recuperados y reintegrados a la cadena productiva, lo que subraya la importancia de implementar políticas y estrategias que promuevan la reducción, reutilización y reciclaje de residuos para mitigar su impacto ambiental y fomentar la economía circular. En este contexto, la gestión integral de los residuos sólidos urbanos se posiciona como un componente fundamental de la gestión ambiental a nivel global, con el objetivo de direccionar la generación de residuos hacia su aprovechamiento y reducir los problemas ambientales asociados con su disposición inadecuada. Actualmente, la alternativa de disposición final de residuos más empleada es el depósito en vertedero debido a su fácil implementación y al manejo masivo de desperdicios, sin embargo, generan un impacto ambiental considerable sobre los diferentes medios (físico, biótico y social). Existe disparidad en la generación de residuos sólidos entre los países teniendo en cuenta los ingresos y el nivel de desarrollo de cada país (Kaza et al., 2018). La mayoría de los países europeos, Norte América y Australia presentan la mayor generación per cápita de residuos (> 1,5 kg/habitante día). En el contexto de América Latina, la generación de residuos sólidos alcanza niveles significativos, con una producción per cápita media de 0,99 kg/habitante día, la cual supera en un 25% la media global. La región presenta una variabilidad considerable en la tasa de cobertura de recolección de residuos, desde ciudades con una cobertura del 100% hasta otras con cifras más bajas, lo que refleja disparidades en la gestión de residuos a nivel regional (Kaza et al., 2018; The World Bank, 2018).

La disposición de residuos en rellenos sanitarios genera lixiviados, efluentes altamente contaminantes que requieren de estrategias efectivas de tratamiento y valorización para minimizar su impacto ambiental. Los lixiviados procedentes de la descomposición de los residuos depositados en los vertederos tienen una composición que depende de diferentes factores tales como el tipo de basuras, edad del vertedero, balance de agua, diseño y operación del vertedero, solubilidad de los desechos, procesos de conversión microbiológica y química e interacción del lixiviado con el medio ambiente (Muñoz y Zapata, 2013). Investigaciones adelantadas a nivel mundial han identificado diversas alternativas de gestión y tratamiento de lixiviados, destacando enfoques como el tratamiento biológico (34,1%) > fisicoquímico (25,0%) > membranas (15,9%) > recirculación (11,4%) > térmico (6,8%) > natural (6,8%). A nivel de Iberoamérica en el enfoque de tratamiento de lixiviado es: biológico (49,5%) > térmico (17,0%) > natural (9,8%) > fisicoquímico (9,6%) > membranas (8,9%) > recirculación (5,20%) (Zafra-Mejía y Romero-Torres, 2019). Lo anterior, refleja la importancia de considerar las particularidades regionales al diseñar estrategias de tratamiento de lixiviados.

La integración de tecnologías convencionales con procesos de membrana se ha vuelto fundamental para cumplir con regulaciones más estrictas y lograr altos niveles de eficiencia en la eliminación de contaminantes (Keyikoglu et al., 2021). La combinación de tratamientos fisicoquímicos y biológicos ha demostrado ser altamente efectiva, alcanzando eliminaciones significativas de contaminantes en lixiviados estabilizados (Poblete et al., 2024). Por lo anterior, la revisión bibliográfica se enfoca en analizar las diferentes alternativas de gestión, tratamiento y valorización de lixiviados, resaltando la importancia de estrategias integrales para abordar la complejidad de estos efluentes y promover la sostenibilidad ambiental en el manejo de residuos sólidos urbanos.

Metodología

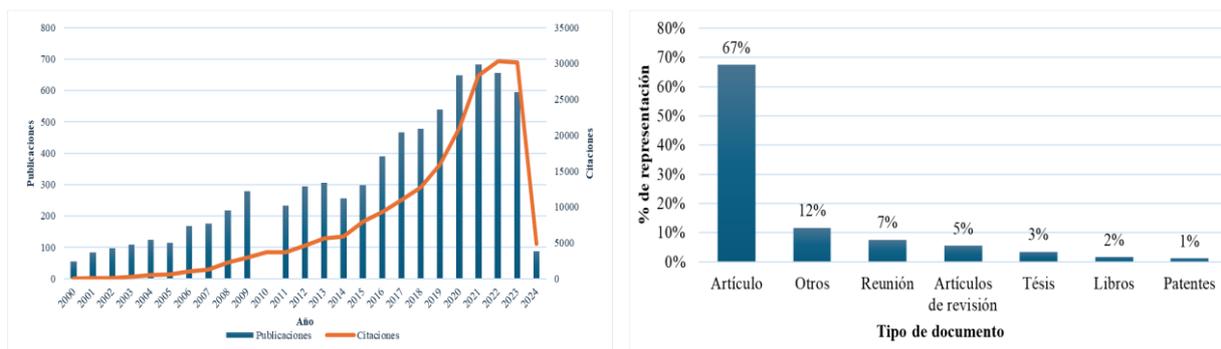
Se realizó una revisión bibliográfica en la base de datos de la Web Of Science (WOS) y los términos utilizados para la búsqueda fueron "*Landfill AND treatment AND leachate*". También, se realizó la búsqueda bibliográfica en la base de datos Dialnet con la palabra clave "Tratamiento de Lixiviados en rellenos sanitarios", para generar una búsqueda más profunda sobre trabajos e información en español. En estas búsquedas se incluyeron todos los artículos, actas a congresos, tesis, libros y patentes, verificando la información disponible y avances de investigación sobre la gestión, tratamiento y valorización de lixiviados generados por la disposición de residuos sólidos urbanos en los vertederos o rellenos sanitarios. Se realizó especial énfasis en los artículos de investigación publicados.

Resultados y Discusión

La búsqueda en WOS arrojó 7.346 resultados para el período de 2000 a 2024, mostrando un aumento significativo en publicaciones y citas desde el 2011 (Figura 1a). Del total de publicaciones encontradas, se evidencia que gran parte responde a documentos de tipo artículo, seguido por una categoría discriminada como "otros" lo que sugiere una oportunidad de mejora en la presentación y categorización de información, y por reuniones técnicas, artículos de revisión, disertaciones de Tesis, libros y patentes (Figura 1b). Las publicaciones predominan en idioma inglés (94,5%), seguido por chino (1,8%), coreano (1,2%), portugués (1%) y español (0,5%). Respecto a la geografía de las publicaciones, se identificaron 136 países contribuyentes, destacando China como líder seguido por Estados Unidos, Malasia, India y Brasil. Pese a la pluralidad de países con publicaciones sobre el tema analizado, solamente 18 países presentan más de 100 publicaciones en los últimos 24 años.

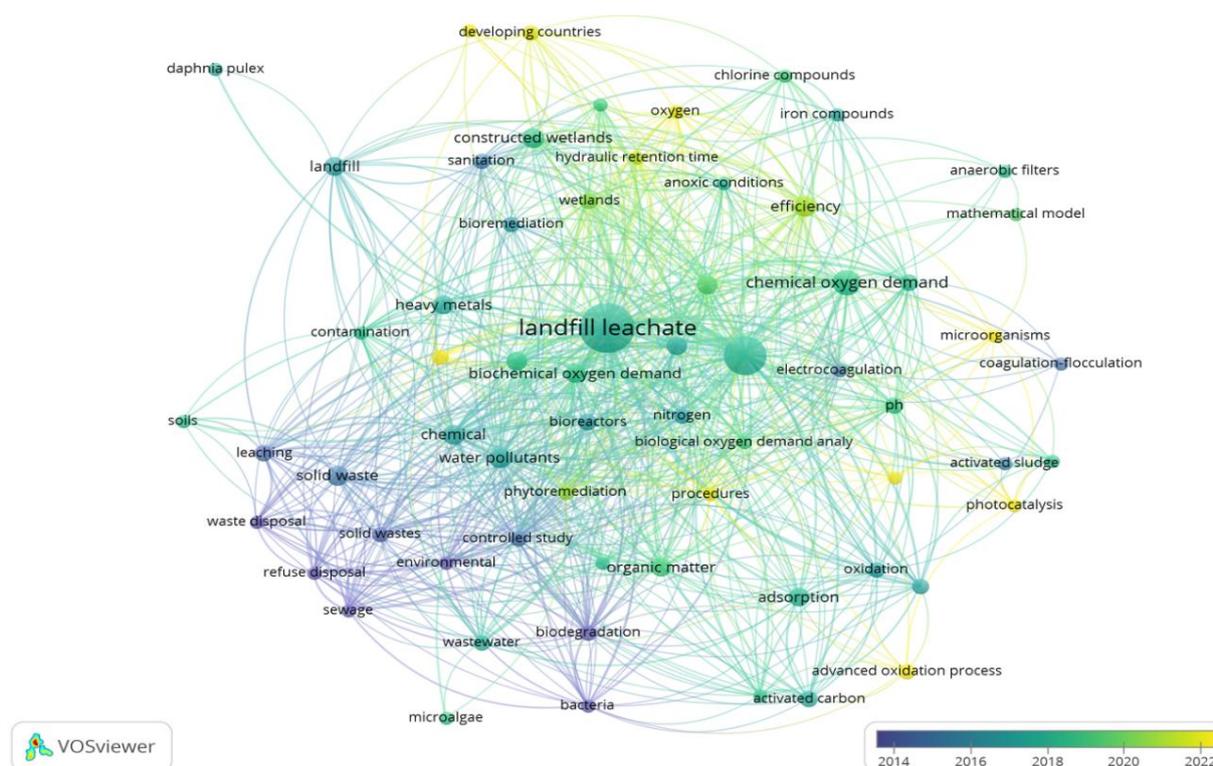
La búsqueda específica en Dialnet para documentos en español reveló 44 resultados entre los últimos 24 años. De estos documentos, la totalidad correspondieron a artículos publicados en revistas de investigación.

La Figura 1c muestra la coocurrencia de palabras clave en el tratamiento de lixiviados a nivel mundial. Entre los años 2015 y 2017 se identificaron palabras como "*biodegradation*", "*bacteria*", "*bioreactors*", "*activated sludge*" y "*sewage*", lo que sugiere el estudio de procesos biológicos de tratamiento; mientras que desde el 2018 hasta el 2021, se identifican palabras como "*chemical oxygen demand*" (DQO), "*organic matter*", "*constructed wetlands*", "*heavy metals*", lo que indica investigaciones relacionadas con procesos de biorremediación y adsorción para la eliminación de la materia orgánica, en términos de DQO, y de metales pesados. Finalmente, en años más recientes, desde 2022 a la actualidad, la aparición de "*advanced oxidation process*", "*photocatalysis*", "*ozone*", "*microorganisms*" implica que las investigaciones alrededor del tratamiento biológico de lixiviados se están combinando con tecnologías de oxidación avanzada que permitan mejorar su efectividad.



(a)

(b)



(c)

Figura 1. (a) número de publicaciones y citas por año obtenidos en la búsqueda realizada en la base de datos WOS; (b) tipo de documento obtenidos en la búsqueda realizada en la base de datos WOS y (c) co-ocurrencia de palabras claves en artículos.

La Tabla 1 relaciona los tipos de tratamiento y procesos más empleados para el tratamiento de lixiviado generado por la disposición de RSU en vertederos. Se destacan diversas opciones de tratamiento, desde enfoques fisicoquímicos hasta biológicos, que permiten la eliminación eficiente de contaminantes presentes en el lixiviado, como sólidos en suspensión, metales pesados y compuestos orgánicos. Estos procesos de tratamiento no solo contribuyen a la mejora de la calidad del agua residual tratada, sino que también abren la posibilidad de generar productos y subproductos de valor. Entre las opciones de valorización se encuentran la recuperación de nutrientes, la producción de biogás a través de la digestión anaerobia, la obtención de agua tratada para reutilización y la generación de energía a partir de residuos orgánicos. Estos productos derivados del tratamiento y

valorización del lixiviado no solo representan una oportunidad para reducir la carga contaminante del vertedero, sino que también pueden ser empleados en diversas aplicaciones, como la generación de energía renovable, la fertilización de suelos agrícolas y el suministro de agua tratada para usos no potables. En este sentido, el aprovechamiento y valorización del lixiviado no solo se traduce en beneficios ambientales al reducir la contaminación, sino que también abre la puerta a la generación de recursos y productos útiles para diversos sectores industriales y agrícolas, promoviendo así la economía circular y la sostenibilidad en la gestión de residuos.

Tabla 1. Alternativas de tratamiento para el lixiviado generado en vertederos

Tratamiento		Tipo de Lixiviado	Principales efectos en la eliminación de contaminantes	Referencia bibliográfica
Tipo	Proceso			
Fisicoquímico	Flotación	Maduro	Reducir materias flotantes como coloides, aceites y grasas, sustancias y fibras. Presenta baja producción de lodos	Rubio et al. (2002)
	Coagulación - Floculación - Sedimentación	Maduro y/o estabilizado	Metales pesados = 50%-65% Turbidez = 97% Color = 70% DQO = 23%-60% Ácidos húmicos = 80% SST = 90%-92%	Amokrane et al. (1997); Silva et al. (2004); Marañón et al. (2008); Zheng et al. (2009); Kargi (2003); Smaoui et al. (2016); Ghafari et al. (2009)
	Procesos de Oxidación Avanzada (Ozonización)	Estabilizado	DQO = 67,6%	Ke et al. (2011)
	Electroquímicos	Estabilizado	DQO = 87,5% NH ₃ -N= 74,96%	Khataee et al. (2014) Moradi et al. (2020)
Membrana	Ultrafiltración, nanofiltración, microfiltración y/o ósmosis inversa	Estabilizado	DQO 98% Metales pesados = 99%	Trebouet et al. (2001); Ushikoshi et al. (2002).
Biológico	UASB-MBR	Joven	DQO, DBO ₅ y SS	Jia et al. (2009)
	Lodos activos	Joven	Materia orgánica = 98% Metales pesados = 82%	Chávez Porras et al. (2017a); Chávez Porras et al. (2017b)
	Lagunas de estabilización aerobia	Estabilizado	DQO= 91,17% DBO ₅ = 98,24% Coliformes = 99,99%	Pesántes et al. (2018); Pellón Arrechea et al. (2015)
	Humedales	Estabilizado	DQO= 50%, DBO ₅ = 59%, nitrógeno amoniacal= 51%,	Bulc (2006)

Tratamiento		Tipo de Lixiviado	Principales efectos en la eliminación de contaminantes	Referencia bibliográfica
Tipo	Proceso			
			fósforo total= 53%, sulfuros= 49%, Cloruros= 35% y Hierro= 84%, con efectos negativos para nitratos y sulfatos (-7%).	
Térmico	Evaporación	Joven y maduro	Se debe presta atención a los Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs).	Giraldo (2001)
Alternativas emergentes	Recirculación de lixiviado	Joven y maduro	-	Benson et al. (2007); Kumar et al. (2011); Gu et al. (2020)
Combinación	Biológico-Membrana	Joven y maduro	DQO = 99% NH ₃ -N = 99%	Kurniawan et al. (2006)

DQO = Demanda Química de Oxígeno; SST = Sólidos Suspendedos Totales; DBO = Demanda Biológica de Oxígeno

Conclusiones

La generación de RSU está estrechamente vinculada al nivel de desarrollo económico de los países. Los países más desarrollados tienden a generar más residuos debido al mayor consumo de bienes y servicio.

Diversos métodos como la oxidación avanzada, la biología anaerobia y los tratamientos fisicoquímicos han mostrado ser efectivos en la reducción de la carga contaminante de los lixiviados. Estas tecnologías no solo mejoran la calidad del agua tratada, sino que también ofrecen oportunidades de valorización como la producción de biogás y la recuperación de recursos.

El tratamiento y aprovechamiento del lixiviado no solo son esenciales para mejorar la calidad del agua residual tratada y disminuir la contaminación en vertederos, sino que también ofrecen una valiosa oportunidad para crear recursos y productos beneficiosos. Las opciones de valorización abarcan desde la recuperación de nutrientes hasta la producción de biogás mediante la digestión anaerobia, así como la obtención de agua tratada para su reutilización y la generación de energía a partir de residuos orgánicos. Estos productos no solo tienen aplicaciones ambientales directas, como la fertilización de suelos por el tratamiento del lodo y la generación de energía renovable, sino que también son útiles en diversos sectores industriales y agrícolas, impulsando así la economía circular y la sostenibilidad en la gestión de residuos.

Bibliografía

- Amokrane, A., Comel, C., Veron, J., 1997) Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation. *Water Research* 31(11), 2775-2782. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00147-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00147-4)
- Benson, C. H., Barlaz, M. A., Lane, D. T., Rawe, J. M., 2007. Practice review of five bioreactor/recirculation landfills. *Waste Management* 27(1), 13-29. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.04.005>
- Bulc, T. G., 2006. Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. *Ecological Engineering* 26(4), 365-374. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.01.003>

Chávez Porras, Á., Casallas O, N., Ramírez C, T., 2017a. Gestión operativa en el tratamiento de lodos de lixiviados generados en el RSDJ, Bogotá D.C., Colombia. <https://revistas.fio.unam.edu.ar/index.php/semillero/article/view/124/114> (acceso 25 de mayo de 2024).

Chávez Porras, Á., Pinzón Uribe, L. F., Velasquez Castiblanco, Y. L., 2017b. Análisis comparativo de ensayos de fitoremediación en lodos de lixiviado aplicando Análisis Envolvente de Datos. INGE CUC 13(2), 79-83. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.13.2.2017.07>

Ghafari, S., Aziz, H. A., Isa, M. H., Zinatizadeh, A. A., 2009. Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum. Journal of Hazardous Materials 163(2-3), 650-656. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.07.090>

Giraldo, E., 2001. Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. Revista de Ingeniería 14, 44-55. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i14.538>

Gu, Z., Chen, W., Wang, F., Li, Q., 2020. A pilot-scale comparative study of bioreactor landfills for leachate decontamination and municipal solid waste stabilization. Waste Management 103, 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.023>

Jia, H., Linsheng, Z., Yuezhong, L., 2009. Application of UASB-MBR System for Landfill Leachate Treatment. 2009 International Conference on Energy and Environment Technology, 203-206. <https://doi.org/10.1109/ICEET.2009.514>

Kargi, F., 2003. Powdered activated carbon added biological treatment of pre-treated landfill leachate in a fed-batch reactor. Biotechnology Letters 25(9), 695-699. <https://doi.org/10.1023/A:1023456116291>

Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F., 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0> (acceso 6 de septiembre 2024)

Ke, Z., Shao-Qi, Z., Sha, S., Mei-Mei, Y., 2011. Degradation kinetics of ozone oxidation on landfill leachate rejected by RO treatment. Huan Jing Ke Xue 32(10), 2966-2970.

Keyikoglu, R., Karatas, O., Rezanía, H., Kobya, M., Vatanpour, V., Khataee, A., 2021. A review on treatment of membrane concentrates generated from landfill leachate treatment processes. Separation and Purification Technology 259, 118182. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118182>

Khataee, A., Safarpour, M., Vahid, B., Akbarpour, A., 2014. Degrading a mixture of three textile dyes using photo-assisted electrochemical process with BDD anode and O₂-diffusion cathode. Environmental Science and Pollution Research 21(14), 8543-8554. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2776-0>

Kumar, S., Chiemchaisri, C., Mudhoo, A., 2011. Bioreactor landfill technology in municipal solid waste treatment: An overview. Critical Reviews in Biotechnology 31(1), 77-97. <https://doi.org/10.3109/07388551.2010.492206>

Kurniawan, T.A., Lo, W.H., Chan, G.Y.S., 2006. Degradation of recalcitrant compounds from stabilized landfill leachate using a combination of ozone-GAC adsorption treatment. Journal of Hazardous Materials 137(1), 443-455. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.020>

Marañón, E., Castrillón, L., Fernández-Nava, Y., Fernández-Méndez, A., Fernández-Sánchez, A., 2008. Coagulation–flocculation as a pretreatment process at a landfill leachate nitrification–denitrification plant. Journal of Hazardous Materials 156(1-3), 538-544. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.12.084>

Moradi, M., Vasseghian, Y., Khataee, A., Kobya, M., Arabzade, H., Dragoi, E.-N., 2020. Service life and stability of electrodes applied in electrochemical advanced oxidation processes: A comprehensive review. Journal of Industrial and Engineering Chemistry 87, 18-39. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.03.038>

Muñoz, F. A., Zapata, C. E., 2013. A method of environmental management for landfill evaluation. Gestión y Ambiente 16(2), 105-120.

Pellón Arrechea, A., López Torres, M., Espinosa Lloréns, M.C., 2015. Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* 36(2), 3-16.

Pesántes, L., Ruiz, V., Muñoz, M., Aldás, M. B., 2018. Estudio piloto para el tratamiento de lixiviados generados en un botadero controlado. *Gestión y Ambiente* 21(2), 233-241. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n2.74908>

Poblete, R., Alanís, F., Serna Galvis, E. A., Torres Palma, R. A., 2024. Depuration of landfill leachates using fly ash as a catalyst in solar advanced oxidation processes and a compost bioreactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 12(1), 111651. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111651>

Rubio, J., Souza, M. L., Smith, R. W., 2002. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Minerals Engineering* 15(3), 139-155. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(01\)00216-3](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(01)00216-3)

Silva, A. C., Dezotti, M., Sant'Anna, G. L., 2004. Treatment and detoxification of a sanitary landfill leachate. *Chemosphere* 55(2), 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.10.013>

Smaoui, Y., Chaabouni, M., Sayadi, S., Bouzid, J., 2016. Coagulation–flocculation process for landfill leachate pretreatment and optimization with response surface methodology. *Desalination and Water Treatment* 57(31), 14488-14495. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1067837>

The World Bank, 2018. What a Waste 2.0. <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/> (acceso 17 de marzo de 2024).

Trebouet, D., Schlumpf, J. P., Jaouen, P., Quemeneur, F., 2001. Stabilized landfill leachate treatment by combined physicochemical–nanofiltration processes. *Water Research* 35(12), 2935-2942. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00005-7)

Ushikoshi, K., Kobayashi, T., Uematsu, K., Toji, A., Kojima, D., Matsumoto, K., 2002. Leachate treatment by the reverse osmosis system. *Desalination* 150(2), 121-129. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00937-2](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00937-2)

Zafra-Mejía, C., Romero-Torres, D., 2019. Tendencias tecnológicas de depuración de lixiviados en rellenos sanitarios iberoamericanos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín* 18(35), 125-147. <https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a8>

Zheng, Z., Zhang, H., He, P.-J., Shao, L.-M., Chen, Y., Pang, L., 2009. Co-removal of phthalic acid esters with dissolved organic matter from landfill leachate by coagulation and flocculation process. *Chemosphere* 75(2), 180-186. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.12.011>

Suelos enmendados con compost obtenidos mediante compostaje descentralizado: evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero.

C. Álvarez-Alonso^{1*}, M.D. Pérez-Murcia¹, N. Manrique¹, S. Sánchez-Méndez¹, L. Orden¹, J. Saez-Tovar¹, F.J. Andreu¹, I. Irigoien², M. López³, R. Moral¹ y M.A. Bustamante¹.

¹CIAGRO-UMH, Universidad Miguel Hernández, EPS-Orihuela, Ctra. Beniel Km 3.2, 03312 Orihuela, Alicante, España y e-mail: cristina.alvareza@umh.es

²Dpto. de Agronomía, Biotecnología y Alimentación UPNA- Universidad Pública de Navarra, 31006, Pamplona, Navarra.

³Dept. d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia (DEAB), Escola Superior d'Agricultura de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Esteve Terradas, 8, 08860, Castelldefels, Barcelona.

Resumen

Recientemente, la Unión Europea ha introducido directrices para la gestión separada de los biorresiduos, y ha surgido la correspondiente necesidad de aplicar la circularidad en los modelos de gestión. Esto ha llevado a la aparición de nuevos modelos de compostaje, incluido el compostaje comunitario y el compostaje urbano descentralizado. El compostaje representa una técnica medioambientalmente sostenible para la gestión de residuos orgánicos, mediante la cual se produce un material final estable, higienizado, maduro y compatible con la agricultura. Sin embargo, las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a las transformaciones de la materia orgánica en el suelo tienen el potencial de causar contaminación atmosférica y han sido objeto de investigaciones recientes. El objetivo de este estudio fue evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), concretamente de CO₂, CH₄ y N₂O, en un ensayo de incubación en mesocosmos bajo condiciones controladas de humedad y temperatura de suelos enmendados con compost procedente de compostaje urbano comunitario y descentralizado. Para ello, se mezclaron 200 gramos de suelo con 4,5 gramos de cada compost (equivalente a 50 toneladas por hectárea en peso seco) en recipientes de polietileno de 500 mL. Cada muestra de suelo enmendado con compost se ensayó por triplicado, mientras que el suelo sin enmienda se estableció como tratamiento control. El proceso de incubación se llevó a cabo en una cámara de incubación controlada a 25 °C en condiciones aeróbicas y sin lixiviación durante 120 días, manteniendo el contenido de humedad de las mezclas suelo-residuo al 50% de la capacidad de retención hídrica del suelo durante todo el experimento. El análisis de las emisiones de gases se realizó en los días 0, 2, 8, 10, 15, 22, 29, 37, 43, 51, 57, 67, 73, 78, 86, 92, 99, 106, 115 y 120 días, con el analizador de gases Gasera One Multi-gas (Turku, Finlandia). Los resultados mostraron un aumento de las emisiones acumuladas de CO₂ tras 120 días de experimentación en todos los suelos enmendados objeto de estudio, que puede atribuirse a la respiración de los microorganismos responsables de la mineralización de este tipo de materiales. Sin embargo, el N₂O presentó valores acumulados finales negativos en algunos casos, lo que puede estar asociado al grado de estabilización de estos materiales. En cuanto al CH₄, aunque se observó un aumento de las emisiones acumuladas, se obtuvieron flujos negativos en mediciones puntuales, lo que puede estar asociado a la posible presencia de bacterias metanotróficas. La realización de este tipo de estudios en futuros experimentos es interesante como complemento para determinar la madurez y estabilidad de este tipo de materiales, así como para garantizar la seguridad ambiental y la ausencia de riesgos para el ser humano y el medioambiente.

Palabras clave: emisiones, mesocosmos, enmienda orgánica, compostaje comunitario, compostaje urbano descentralizado

Soils amended with organic-based compost from decentralised composting: assessment of greenhouse gas emissions

Abstract

In recent times, the European Union has introduced guidelines for the separate management of bio-waste, thereby creating a corresponding need to apply circularity in management models. This has resulted in the advent of novel composting paradigms, including community composting and decentralised urban composting. Composting represents an environmentally sustainable technique for organic waste management, whereby a stable, sanitised, mature and agriculturally compatible final material is produced. However, the greenhouse gas emissions associated with soil organic matter transformations have the potential to cause air pollution and have been the subject of recent research. The objective of this study was to evaluate the greenhouse gas (GHG) emissions, specifically CO₂, CH₄ and N₂O, in an incubation test under controlled humidity and temperature conditions of soils amended with compost from community and decentralised urban composting. For the purposes of this study, 200 grams of soil were mixed with 4.5 grams of each compost (equivalent to 50 tons per hectare in dry weight) in 500 mL polyethylene jars. Each sample of amended soil with compost was tested in triplicate, while the unamended soil was set as the control treatment. The incubation process was conducted in a controlled incubation chamber at 25 °C under aerobic conditions and without leaching for 120 days, maintaining the moisture content of the soil-residue mixtures at 50% of the water holding capacity of the soil throughout the experiment. The analysis of gas emissions was conducted on days 0, 2, 8, 10, 15, 22, 29, 37, 43, 51, 57, 67, 73, 78, 86, 92, 99, 106, 115 and 120 days using the Gasera One Multi-gas analyzer (Turku, Finland). The results showed an increase in the cumulative CO₂ emissions following 120 days of experimentation in all amended soils under study, which can be attributed to the respiration of microorganisms responsible for the mineralization of this type of material. However, N₂O showed negative final cumulative values in certain instances, which may be attributable to the degree of stabilization of these materials. Concerning to CH₄, although an increase in cumulative emissions was observed, negative fluxes were obtained in spot measurements, which may be associated with the possible presence of methanotrophic bacteria. It would be beneficial to conduct further studies of this nature in order to ascertain the maturity and stability of the material in question, as well as to guarantee the safety of the environment and the absence of any risks to humans or the natural world.

Keywords: emissions, mesocosms, organic amendment, community composting, decentralised urban composting.

Introducción

La Unión Europea, mediante la Directiva 2008/98/CE y sus posteriores modificaciones, pone énfasis en la necesidad de mejorar la eficiencia en el uso de recursos y, por consiguiente, en la necesidad de valorar los residuos como nuevos recursos con la finalidad de facilitar la transición hacia una economía más sostenible y circular que aporte beneficios al medioambiente (UE, 2018). En este contexto nace la necesidad de gestionar de forma separada un importante flujo de biorresiduos, como son la fracción orgánica de los residuos municipales recogida separadamente y los restos de poda de parque y jardines, dando lugar a la aparición de nuevos modelos de compostaje donde se incluyen el compostaje comunitario y el compostaje urbano descentralizado. Estos nuevos modelos de gestión no solo nos permiten introducir residuos en el mercado transformándolos en nuevos recursos, sino que tienen la capacidad de adaptarse a las peculiaridades de cada zona, como las zonas rurales, donde la gestión de determinados residuos puede representar un grave problema (Álvarez-Alonso et al., 2023). El compostaje representa una técnica medioambientalmente sostenible para la gestión de residuos orgánicos, entre los que se encuentran los biorresiduos, mediante la cual se produce un material final estable, higienizado, maduro y compatible con la agricultura (Policastro et al., 2022). Sin embargo, con el fin de evitar posibles riesgos para la salud humana y el medioambiente, es importante conocer en profundidad no solo las condiciones en las que se da el proceso de compostaje en estos nuevos modelos ni las características agronómicas y de valor añadido de los compost obtenidos, sino las consecuencias ambientales derivadas de la aplicación futura de este tipo de compost en los sistemas agrícolas. En este sentido, es importante destacar que las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a las transformaciones de la materia orgánica en el suelo, como el CO₂, CH₄ y N₂O, tienen el potencial de causar contaminación atmosférica y han sido objeto de investigaciones recientes (Egene et al., 2022).

El objetivo de este estudio fue evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), concretamente de CO₂, CH₄ y N₂O, en un ensayo de incubación en mesocosmos bajo condiciones controladas de humedad y temperatura de suelos enmendados con compost procedente de compostaje urbano comunitario y descentralizado.

Materiales y Métodos

Para la preparación del ensayo de incubación suelo-enmienda orgánica, 200g de suelo franco-arenoso tamizado a 2mm fueron pesados en botes de polietileno de 500 mL de capacidad. Una vez pesado, el suelo se mezcló con 4,5 g de cada enmienda, seca a 105°C y tamizada a 5mm, cantidad equivalente a una dosificación de 50 t en peso seco de enmienda orgánica por hectárea y año (Figura 1).



Figura 1. Botes utilizados en el ensayo de incubación suelo-enmienda orgánica.

Se utilizaron 4 compost obtenidos tras compostar la fracción orgánica de los residuos municipales recogida separadamente, mezclada con restos de podas y gestionada mediante dos modelos de compostaje descentralizado en diferentes municipios: compostaje comunitario (CC1 y CC2, de Carrícola y Fontanars dels Alforins, respectivamente) y compostaje urbano descentralizado (CD1 y CD2, de Lumbier y Sort, respectivamente). Suelos sin enmienda orgánica fueron empleados como tratamiento control y todos los tratamientos se realizaron por triplicado. Las principales características de los materiales utilizados en el experimento se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los materiales utilizados en el ensayo de incubación suelo-enmienda (sobre materia seca)

	CC1	CC2	CD1	CD2
pH	8,6	8,1	7,6	8,0
CE (dS m ⁻¹)	6,1	3,2	1,1	5,2
MO (%)	37,8	38,2	40,8	56,2
COT (%)	25,3	23,5	24,6	31,5
NT (%)	2,1	1,8	1,9	2,8
Relación CN	12,0	13,3	13,0	11,1
P (g kg ⁻¹)	7,5	9,2	6,3	9,6
K (g kg ⁻¹)	20,9	8,9	7,2	11,2
Na (g kg ⁻¹)	7,0	3,3	1,3	5,5

CE: conductividad eléctrica, MO: materia orgánica. COT: carbono orgánico total, NT: nitrógeno total. CC1: compostaje comunitario Carrícola. CC2: compostaje comunitario Fontanars dels Alforins. CD1: compostaje urbano descentralizado Lumbier. CD2: compostaje urbano descentralizado Sort.

El experimento se llevó a cabo en cámara de incubación a 25° C de temperatura, bajo condiciones aerobias y sin lixiviación durante 120 días, manteniendo la humedad de cada bote durante todo el experimento al 50 % de la capacidad de retención hídrica (CRH) del suelo. Para alcanzar tal humedad,

se añadieron inicialmente 28 mL de H₂O y las pérdidas se controlaron mediante pesaje de cada bote individual y semanalmente. La evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero se realizó en 20 ocasiones a los 0, 2, 8, 10, 15, 22, 29, 37, 43, 51, 57, 67, 73, 78, 86, 92, 99, 106, 115 y 120 días de incubación utilizando el analizador Gasera One Multi-gas analyzer (Turku, Finland) y siguiendo el procedimiento modificado descrito por Egene et al., (2022). El muestreo t = 0 se realizó 2,5 h tras añadir la enmienda y el riego correspondiente. El analizador se mantuvo conectado a una campana hermética (Figura 2, derecha) donde se introdujo 1 bote de incubación. Este sistema evita la entrada o salida de gases, permitiendo una purga previa de gases del espacio vacío en el interior del sistema hermético (800 mL min⁻¹), pasando por el analizador y volviendo al sistema-campana en un ciclo cerrado. Así se aseguraba un muestreo no intrusivo y se redujo el riesgo de errores sistemáticos. La concentración de gas en el espacio vacío se midió a los 3, 6, 9 y 12 min después de cerrar el sistema y conectar la GASERA. Durante cada paso de 3 min, el analizador detecta cada cambio de concentración de gases. Los flujos de CO₂, N₂O y CH₄ se calcularon usando los cambios de concentración en el tiempo considerando el volumen de espacio vacío (diferencia entre el volumen de la campana y el volumen suelo+bote), y el área de la superficie del suelo. La concentración de gas medida en ppm se convirtió a flujo de emisiones con la siguiente ecuación:

$$\text{Flujo } (\mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}) = (\Delta\text{gas}/\Delta t) \times (P \times M \times n) / (R \times T) \times (V/A) \quad (1)$$

($\Delta\text{gas}/\Delta t$) = pendiente de la regresión lineal de la concentración de gas (ppm) vs tiempo (h).

P: presión de medida del aparato (0,838 atm)

M: peso atómico del elemento (12 para C y 14 para N)

n: n° de átomos del elemento en el gas (p.ej. 2 para N₂O)

R: cte. gases ideales (0,08206 atm L mol⁻¹ K⁻¹)

T: temperatura atmosférica (296 K)

V: suma del volumen del espacio vacío + tubo + celda de análisis (4,8783 L para 200 g de suelo)

A: área de la superficie de suelo en el bote de incubación (0,00810 m²).



Figura 2. Gasera One Multi-gas analyzer (imagen izquierda). Cámara de acero utilizada para realizar las mediciones (imagen derecha).

Resultados y Discusión

Emisiones puntuales de GEIs

Las emisiones puntuales en todos los suelos enmendados con compost mostraron una dinámica diferente a la observada en los suelos no enmendados utilizados como control. En el caso de las emisiones puntuales de CO₂ (Figura 3a), se observaron valores relativamente altos durante los dos primeros días de incubación asociados a la reactivación de los microorganismos tanto presentes en el propio suelo como los aportados por la enmienda, siendo el tratamiento control y CC2 de Fontanars los que mayores

valores reflejan (Egene et al., 2022). En el día 22 de muestreo, se observó un nuevo aumento en las emisiones de CO_2 en los suelos enmendados con compost, sobre todo con el compost CD2, probablemente asociado a una nueva reactivación de los microorganismos aportados con el compost. Conforme continuó avanzando el tiempo de incubación, observamos una disminución paulatina en la emisión de este gas, hasta valores finales en todos los tratamientos con enmiendas orgánicas superiores al tratamiento control, lo que nos indica que la aplicación de enmiendas orgánicas en el suelo aumenta las emisiones de CO_2 como consecuencia de la reactivación de la microbiota edáfica.

Por otro lado, si observamos las emisiones de CH_4 (Figura 3b) se aprecia que, aunque a lo largo del proceso de incubación existieron variaciones en los flujos de este gas, los valores iniciales y finales fueron bastante similares. Sin embargo, se han podido registrar valores de flujo negativos durante el tiempo de incubación, lo que refleja la probable presencia de bacterias metanotróficas capaces de consumir este gas para utilizarlo como fuente de carbono y energía. La presencia de este tipo de bacterias tras la aplicación de enmiendas orgánicas en suelos desempeñaría un papel importante a la hora de mitigar los efectos del CH_4 sobre el medioambiente, no solo por disminuir la emisión de este gas tras la aplicación en suelo, sino por la capacidad que tiene de capturarlo de la atmósfera y contribuir a la disminución del calentamiento global.

Por último, en el caso de las emisiones de N_2O (Figura 3c) se observaron en todos los casos rangos de emisión inferiores a $0,2 \text{ mg de N-N}_2\text{O m}^{-2}$ y, aunque las condiciones del experimentos eran propicias para favorecer las emisiones de N_2O (pH cercano a la neutralidad y 50% CRH del suelo, Cayuela et al., 2010), no destacó ningún pico de emisión durante el tiempo de incubación, lo que se atribuye probablemente a la homogeneidad de las condiciones entre los tratamientos utilizados. Las mínimas variaciones observadas entre las emisiones de N_2O de los diferentes tratamientos están, probablemente, asociadas a la disponibilidad de N y C orgánico lábil de los materiales (Egene et al., 2022).

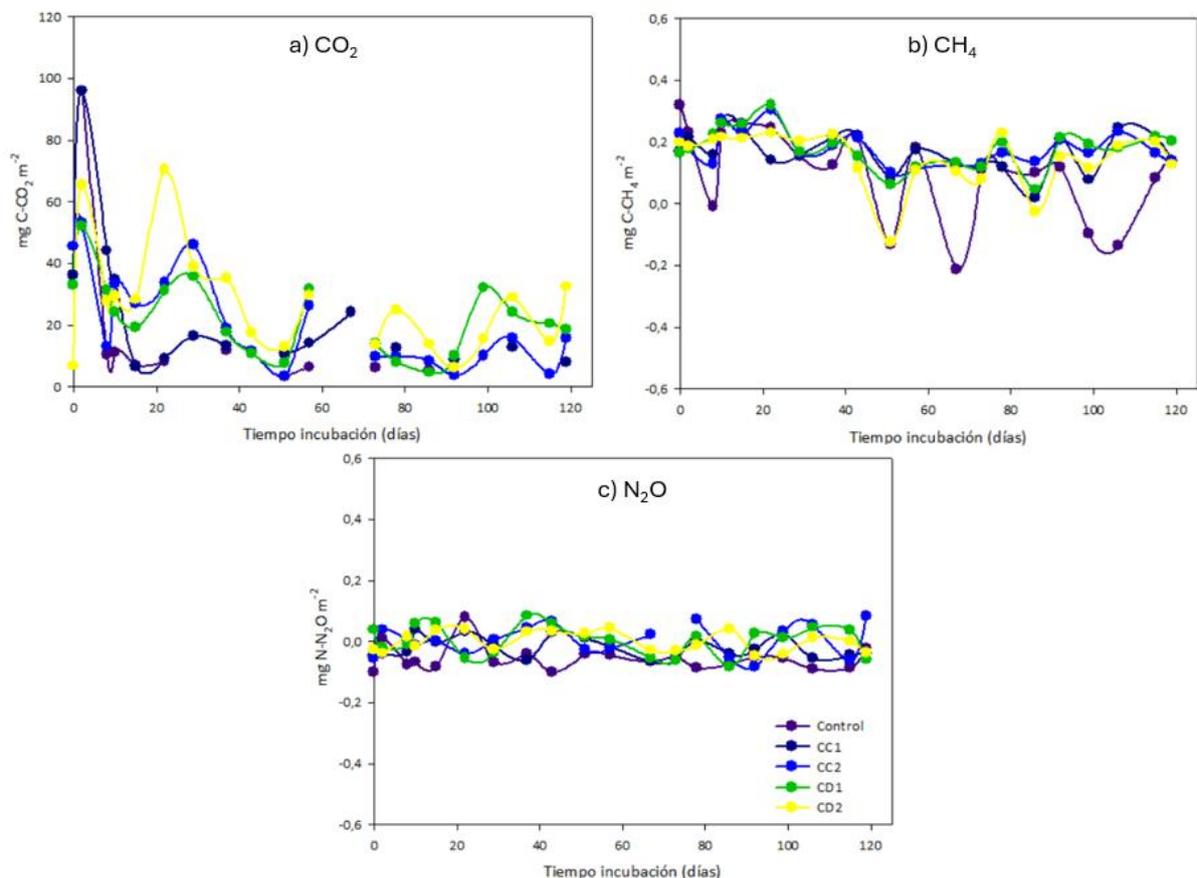


Figura 3. a) Evolución de las emisiones puntuales de CO_2 durante el experimento, b) Evolución de las emisiones puntuales de CH_4 durante el experimento c) Evolución de las emisiones puntuales de N_2O durante el experimento.

Emisiones acumuladas de GEIs

Los resultados obtenidos mostraron un aumento en las emisiones acumuladas de CO₂ (Figura 4a) a los 120 días de experimento en todos los suelos enmendados estudiados, lo que se asocia a la respiración de los microorganismos encargados de la mineralización de este tipo de materiales. Durante el experimento, observamos que en el suelo control, sin enmienda, aumentaron las emisiones de este gas durante los primeros días de incubación y permanecieron prácticamente constante durante el resto del tiempo de incubación. En cambio, los suelos enmendados con compost aumentaron las emisiones de CO₂ hasta el final de la incubación, lo que nos indica una activación de los microorganismos encargados de los procesos de mineralización. Las emisiones acumuladas de CO₂ son superiores en los tratamientos con compost de compostaje urbano descentralizado que con los compost de compostaje comunitarios.

En el caso del CH₄, observamos un aumento de las emisiones acumuladas en todos los casos estudiados al final del experimento, aunque como ya hemos indicado, se obtuvieron flujos negativos en medidas puntuales. Por último, el N₂O aunque no mostró gran variabilidad en la emisiones puntuales, mostró valores acumulados finales negativos en algunos casos, lo que puede estar asociado al uso de materiales con menor grado de estabilidad.

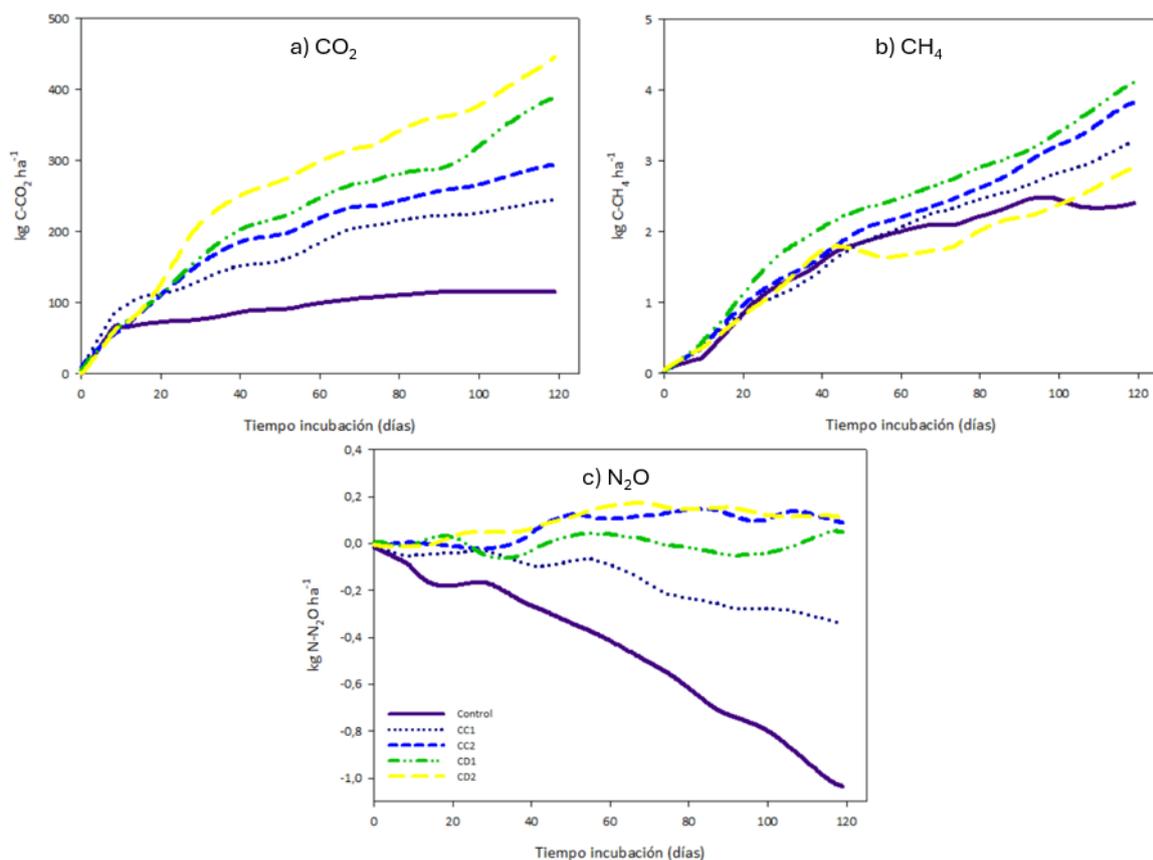


Figura 4. a) Evolución de las emisiones acumuladas de CO₂ durante el experimento, b) Evolución de las emisiones acumuladas de CH₄ durante el experimento c) Evolución de las emisiones acumuladas de N₂O durante el experimento.

Conclusiones

El uso de compost procedentes de compostaje comunitario y compostaje urbano descentralizado como enmienda orgánica de suelos en general, no produjo un aumento desmesurado de las emisiones GEIs tras su aplicación. Sin embargo, es interesante realizar estudios de emisión de GEIs como complemento para determinar la madurez y estabilidad de este tipo de materiales, con el fin de evitar posibles efectos adversos sobre el medioambiente.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido realizada en el marco del proyecto de investigación NEOCOMP (ref. PID2020-113228RB-I00) financiado por MICIU/ AEI /10.13039/501100011033 y, también ha sido apoyada por el Ministerio de Ciencia e Innovación español con un contrato pre-doctoral a la primera autora (FPU21/01207).

Bibliografía

Álvarez-Alonso, C., Pérez-Murcia, M.D., Sánchez-Méndez, S., Martínez-Sabater, E., Irigoyen, I., López, M., Nogues, I., Paredes, C., Orden, L., García-Rández, A., Bustamante, M. A. 2023. Municipal solid waste management in a decentralized composting scenario: assessment of the process reproducibility and quality of the obtained composts. *Agronomy* 2024, 14, 54. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010054>

Cayuela, M. L., Velthof, G. L., Mondini, C., Sinicco, T., & van Groenigen, J. W. 2010. Nitrous oxide and carbon dioxide emissions during initial decomposition of animal by-products applied as fertilisers to soils. *Geoderma*, 157(3–4), 235–242. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.026>

Egene, C. E., Regelink, I., Sigurnjak, I., Adani, F., Tack, F. M. G., & Meers, E. 2022. Greenhouse gas emissions from a sandy loam soil amended with digestate-derived biobased fertilisers – A microcosm study. *Appl Soil Ecol*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104577>

Policastro, G., Cesaro, A. 2022. Composting of Organic Solid Waste of Municipal Origin: The Role of Research in Enhancing Its Sustainability. *Int J Environ Res Public Health*, 20, 312. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010312>

UE, (2018). Directiva 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos. *Diario Oficial de la UE*, L150, p.109.

Análisis del aprovechamiento de las podas del naranjo (*Citrus sinensis*) en la fabricación de tableros de partículas

B.E. Ferrández-García¹, M.T. Ferrández-García¹, T. García-Ortuño y M. Ferrández-García¹

¹ CIAGRO-UMH. Ctra. de Beniel, Km 3,2. 03312, Orihuela (Alicante). E-mail: bferrandez@umh.es

Resumen

El naranjo (*Citrus sinensis*) es un árbol frutal ampliamente cultivado en regiones de clima cálido y subtropical, destacándose países como España, Brasil y Estados Unidos. La poda de los naranjos se realiza dependiendo de la variedad, generalmente en invierno, tras la cosecha, o a inicios de la primavera para fomentar un crecimiento equilibrado y mejorar la producción de frutos. La reutilización de las podas es crucial, ya que estos residuos pueden transformarse, contribuyendo a la salud del ecosistema agrícola y a la reducción de desperdicios. El objetivo de este estudio fue determinar las propiedades físicas y mecánicas de tableros de partículas elaborados a partir de residuos de las ramas del naranjo sin emplear aglutinantes. Se fabricaron tableros aglomerados de tres tamaños de partículas (< 0,25, 0,25-1 y 1-2 mm), con una presión y temperatura de 2,6 MPa y 140°C respectivamente, durante 4 ciclos de prensado (15, 15+15, 15+15+15 y 15+15+15+15 min), por lo que realizaron 12 tipologías. De cada tipología se realizaron 3 probetas resultando un total de 36 tableros. Se estudió la densidad, el hinchamiento en espesor (TS), la absorción de agua (WA), la cohesión interna (IB), la resistencia a flexión (MOR), el módulo de elasticidad (MOE) y el arranque de tornillo (SH). Con partículas de tamaño inferior a 0,25 mm y aplicando 2 y 3 ciclos de 15 minutos en la prensa de platos calientes se obtuvieron paneles que pueden ser clasificados de grado P2 según las normas europeas, por lo que los hacen aptos para su uso en la construcción de edificios.

Palabras clave: residuos vegetales, tableros de partículas, propiedades mecánicas y físicas, *Citrus sinensis*.

Analysis of the utilization of pruning from orange trees (*Citrus sinensis*) in particleboard manufacturing

Abstract

The orange tree (*Citrus sinensis*) is a fruit tree widely cultivated in warm and subtropical regions, notably in countries such as Spain, Brazil, and the United States. Pruning of orange trees is performed depending on the variety, generally in winter after the harvest, or at the beginning of spring to promote balanced growth and improve fruit production. The reuse of pruning is crucial, as these residues can be transformed, contributing to the health of the agricultural ecosystem and waste reduction. The objective of this study was to determine the physical and mechanical properties of particleboards made from orange tree branch residues without using binders. Particleboards were manufactured using three particle sizes (< 0.25, 0.25-1, and 1-2 mm) under a pressure and temperature of 2.6 MPa and 140°C respectively, for 4 pressing cycles (15, 15+15, 15+15+15, and 15+15+15+15 minutes), therefore 12 typologies were made. Three specimens were made for each typology, resulting in a total of 36 particleboards. The density, thickness swelling (TS), water absorption (WA), internal bond strength (IB), modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), and screw holding strength (SH) were studied. Panels made from particles smaller than 0.25 mm and pressed for 2 and 3 cycles of 15 minutes in a hot press met the requirements for P2 grade according to European standards, making them suitable for use in building construction.

Keywords: plant residues, particleboard, physical and mechanical properties, *Citrus sinensis*

Introducción

El naranjo (*Citrus sinensis*) es un árbol frutal perteneciente a la familia Rutaceae, ampliamente cultivada en regiones tropicales y subtropicales de todo el mundo. Originario del sudeste asiático, el naranjo se ha expandido globalmente debido a su valor económico y versatilidad. Su cultivo se centra principalmente en la producción de naranjas, que son una fuente importante de vitamina C, antioxidantes y otros compuestos bioactivos beneficiosos para la salud humana (Liu et al., 2022). Además de su consumo como fruta fresca, el naranjo es valorado por sus derivados, como jugos, aceites esenciales, y extractos utilizados en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica.

Las prácticas de manejo del naranjo incluyen la poda, la cual es fundamental para controlar el crecimiento del árbol, mejorar la calidad de la fruta y aumentar la eficiencia de la recolección. Además, la poda promueve una mejor penetración de la luz solar, lo que favorece la floración, el desarrollo de la fruta y la reducción de problemas de enfermedades fúngicas al permitir que el follaje se seque más rápido después de las lluvias. Sin embargo, estas prácticas generan una cantidad considerable de desechos agrícolas, como ramas y hojas, cuyo manejo adecuado es importante tanto desde un punto de vista económico como ambiental.

El reciclaje y la reutilización de los desechos agrícolas del naranjo, como a través del compostaje, la producción de biocarbón o la generación de energía, son prácticas sostenibles que pueden aportar beneficios significativos. Estas estrategias no solo ayudan a reducir el impacto ambiental, sino que también mejoran la fertilidad del suelo y promueven un ciclo de nutrientes más eficiente. La valorización de los residuos de poda contribuye así a una agricultura más sostenible y refuerza la economía circular en el sector cítrico. Por lo tanto, aprovechar los residuos lignocelulósicos tiene el potencial de impactar positivamente en la bioeconomía al convertirlos en productos de alto valor, como biofertilizantes, ladrillos ecológicos, biocarbón, bioplásticos, papel, biocombustibles, enzimas para uso industrial, y ácidos orgánicos, entre otros (Bhupendra et al., 2022).

En este trabajo se estudia y discute el aprovechamiento de las podas del naranjo en la fabricación de tableros aglomerados, sin ningún tipo de adhesivo, así como su viabilidad como material de construcción y/o en la fabricación de muebles.

Materiales y Métodos

Los materiales empleados en este trabajo fueron las ramas del naranjo y agua. Las ramas del naranjo fueron recolectadas durante el proceso de poda anual obtenidas de una finca aledaña al campus de la Escuela Politécnica Superior de Orihuela. Dichas podas se dejaron secar durante 6 meses al aire libre, posteriormente se trituraron en una desfibriladora de cuchillas y se tamizaron mediante una tamizadora vibradora. De las partículas obtenidas, se seleccionaron tres tamaños: <0,25 mm, entre 0,25 y 1 mm y entre 1 y 2 mm. Con este material se fabricaron tableros aglomerados de los tres tamaños de partículas. El proceso de fabricación consistió en la formación de la manta de las partículas de las ramas del naranjo en un molde de 600 x 400 mm a la cual se le pulverizó agua en una proporción del 10% del peso de las partículas. Seguidamente se introdujo en una prensa de platos calientes con una presión y temperatura de 2,6 MPa y 140°C respectivamente, durante 4 ciclos de prensado (15, 15+15, 15+15+15 y 15+15+15+15 min). Entre ciclo y ciclo, la manta se extrajo de la prensa y se pulverizó agua en una proporción del 10% del peso de las partículas. Posteriormente, los paneles se dejaron enfriar en posición vertical, obteniéndose paneles rígidos de partículas aglomeradas con unas dimensiones aproximadas de 600 x 400 x 5 mm³. Se fabricaron 12 tipologías y de cada una de ellas se realizaron 3 probetas, resultando un total de 36 tableros.



Figura 1. Tableros aglomerados de partículas de naranjo de los tres tamaños

Tabla 1. Tipos de tableros realizados

Tipo	Tamaño de partícula (mm)	Presión (MPa)	Temperatura (°C)	Ciclos de prensado	Nº de tableros
A1	< 0,25	2,6	140	15	3
A2	< 0,25	2,6	140	15 + 15	3
A3	< 0,25	2,6	140	15 + 15 + 15	3
A4	< 0,25	2,6	140	15 + 15 + 15 + 15	3
B1	0,25 - 1	2,6	140	15	3
B2	0,25 - 1	2,6	140	15 + 15	3
B3	0,25 - 1	2,6	140	15 + 15 + 15	3
B4	0,25 - 1	2,6	140	15 + 15 + 15 + 15	3
C1	1 - 2	2,6	140	15	3
C2	1 - 2	2,6	140	15 + 15	3
C3	1 - 2	2,6	140	15 + 15 + 15	3
C4	1 - 2	2,6	140	15 + 15 + 15 + 15	3

Una vez enfriados los tableros, se cortaron en las dimensiones que dictan las normas europeas para proceder a los distintos ensayos. Se determinaron y evaluaron las propiedades de los tableros de partículas del naranjo aplicando las normas europeas vigentes de los tableros de partículas de madera (EN 309, 2005; EN 312: 2010). Se midió la densidad (EN 323: 2010), la absorción de agua y el hinchamiento en espesor tras 2 y 24 horas de inmersión en agua (EN 317: 1993), el módulo de elasticidad a flexión (MOE) y el módulo de ruptura a flexión (MOR) (EN 310: 1993), la cohesión interna o resistencia a tracción (IB) (EN 319: 1993) y el arranque de tornillo (SH) (EN 320:2011).

Los ensayos mecánicos se realizaron en la máquina de ensayos marca IMAL (Italy), que cumple con la velocidad requerida en cada ensayo, según indican las normas europeas aplicables a los ensayos.

Se empleó un medidor de humedad de laboratorio marca Imal (Modelo 200, Modena, Italia) para obtener el contenido de humedad y se utilizó un depósito calefactado a una temperatura del agua de 20°C para realizar la prueba de inmersión en agua.

De los valores medios de los ensayos se obtuvieron las barras de error, la desviación estándar y se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) para un nivel de significancia de $\alpha < 0.05$. El análisis estadístico se realizó con el programa informático SPSS v. 28.0 de IBM.

Resultados y Discusión

Los resultados de las propiedades físicas de los tableros de partículas de podas del naranjo se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 2. Resultados medios de las propiedades físicas

Tipo	Espesor (mm)	Densidad (Kg/m ³)	TS2H (%)	TS24H (%)	WA2H (%)	WA24H (%)
A1	4,93 (0,34)	1.158,79 (51,91)	25,42 (7,17)	29,62 (5,04)	51,27 (10,79)	57,27 (8,11)
A2	4,95 (0,11)	1.440,77 (2,51)	26,60 (0,75)	35,26 (1,14)	30,36 (0,98)	44,42 (1,35)
A3	4,88 (0,34)	1.354,59 (50,58)	24,70 (4,12)	28,15 (4,39)	42,24 (1,20)	44,84 (2,30)
A4	4,77 (0,34)	1.353,39 (24,10)	19,33 (2,40)	26,28 (1,25)	26,40 (6,15)	37,45 (2,34)
B1	4,67 (0,34)	1.094,06 (7,31)	60,41 (3,79)	69,30 (3,32)	156,06 (3,49)	174,78 (2,11)
B2	5,05 (0,54)	1.156,47 (56,49)	61,95 (3,63)	63,73 (3,74)	137,89 (12,25)	158,51 (22,88)
B3	5,28 (0,20)	1.247,46 (25,81)	68,46 (2,28)	83,10 (2,31)	149,63 (1,88)	161,22 (5,29)
B4	4,62 (0,46)	1.263,44 (18,41)	60,16 (0,72)	67,30 (2,32)	61,97 (8,88)	74,50 (4,45)
C1	6,95 (1,56)	988,15 (42,40)	51,26 (2,06)	49,36 (4,80)	151,09 (6,68)	159,29 (5,74)
C2	6,47 (0,29)	906,67 (14,80)	32,83 (2,58)	89,83 (3,17)	87,97 (3,04)	104,37 (4,18)
C3	5,59 (0,43)	875,96 (19,78)	34,31 (2,30)	42,20 (3,33)	84,50 (16,28)	105,00 (3,83)
C4	6,77 (0,13)	936,76 (3,40)	12,01 (0,41)	20,57 (3,76)	56,84 (12,76)	73,65 (4,86)

TS2H: hinchamiento en espesor a las 2 horas. TS24H: hinchamiento en espesor a las 24 horas. WA2H: absorción de agua a las 2 horas. WA24H: absorción de agua a las 24 horas. (..): desviación estándar.

Los valores medios de la densidad de cada tipología de tablero que se observan en la tabla anterior corresponden a densidades medias-altas, oscilando entre 875,96 y 1.440,77 Kg/m³. Del mismo modo también se puede observar, que cuanto mayor es el tamaño de partícula, las densidades son menores. El análisis estadístico indica que la densidad depende del tamaño de partícula, sin embargo, no depende del número de ciclos.

En el ensayo a las 2 h y 24h de hinchamiento en espesor, los tableros con mejores resultados y menores valores son los tipo C4 con un 12,01% y 20,57% respectivamente. Por otra parte, los tableros con peores resultados y, por consiguiente, un mayor valor de TS a las 2 y a las 24h, son tipo B3 y C2 con un 68,46 % y un 89,86% respectivamente.

Los valores del porcentaje de absorción de agua a las 2 h oscilan entre el tipo A4 con un 26,40 % y el B1 con un 156,06 %, habiendo grandes diferencias entre y otros tipos de tableros. A las 24 h aumenta

la absorción de agua obteniéndose también los mejores resultados los tipo A4 con un valor de 37,45 % y los peores resultados los tipos B1 del 174,78%. Del análisis estadístico realizado podemos destacar que el tamaño de partícula influye en el TS y el WA, mientras que el número de ciclos solo influye en el WA.

Por otra parte, igualmente se determinaron las propiedades mecánicas de los tableros, cuyos resultados se dan en la siguiente tabla 3, donde se observa el valor medio de los ensayos de resistencia a flexión (MOR), el módulo de elasticidad (MOE), la cohesión interna (IB) y el arranque de tornillo (SH) de cada uno de los tipos de tableros.

Tabla 3. Resultados medios de las propiedades mecánicas

Tipo	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	IB (N/mm ²)	SH (N/mm)
A1	6,45 (0,84)	1.904,73 (174,59)	0,18 (0,02)	28,91 (1,91)
A2	12,11 (0,10)	2.243,88 (221,73)	0,50 (0,11)	40,71(1,57)
A3	13,26 (0,69)	3.017,47 (14,71)	0,49 (0,04)	46,55 (1,90)
A4	10,62 (0,40)	2.449,11 (148,08)	0,46 (0,32)	40,23 (1,83)
B1	6,35 (0,52)	1.268,29 (47,20)	0,21 (0,01)	61,49 (2,66)
B2	8,12 (0,10)	1.997,42 (52,37)	0,23 (0,01)	65,71 (4,22)
B3	12,71 (0,33)	1.994,82 (153,12)	0,33 (0,02)	67,71 (8,18)
B4	11,25 (0,56)	1.824,57 (106,98)	0,32 (0,02)	75,76 (2,06)
C1	2,48 (0,50)	247,33 (48,30)	0,05 (0,00)	53,14 (1,92)
C2	4,37 (0,27)	627,66 (40,58)	0,04 (0,01)	92,60 (2,54)
C3	5,12 (0,35)	984,74 (25,69)	0,15 (0,01)	36,44 (4,74)
C4	4,66 (0,37)	637,71 (56,73)	0,21 (0,01)	14,98 (0,77)

MOR: Resistencia a flexión. MOE: Módulo de elasticidad. IB: Cohesión interna. SH: Arranque tornillo. (...): desviación estándar.

En general, las mejores propiedades mecánicas son las de los tableros con menor tamaño de partícula y 3 ciclos de prensado. El análisis estadístico reflejó que todas las propiedades mecánicas dependen del tamaño de partícula, sin embargo, el número de ciclos influye en todas las propiedades excepto en la resistencia a flexión (MOE).

En la tabla 3 se puede observar que el tablero A3 realizado con tamaño de partícula <0,25 mm y aplicando 3 ciclos de 15 minutos es el que mejor resultado proporciona en el MOR, MOE e IB (13,26 N/mm², 3.017,47 N/mm² y 0,49 N/mm²). Mientras que el tablero de peores prestaciones mecánicas es el C1 fabricado con mayor tamaño de partícula (1-2 mm) y sometándolo a un solo ciclo de 15 minutos de prensado (MOR=2,48 N/mm², MOE=247,33 N/mm² e IB=0,05 N/mm²). Sin embargo, también se puede observar que estos resultados no van en concordancia con los del ensayo de arranque de tornillo (SH) cuyo mejor valor es de 92,60 N/mm correspondiendo con el tablero C2 realizado con mayor tamaño de partícula (1 a 2 mm) y 2 ciclos de prensado de 15 minutos.

En la tabla 4 se comparan los resultados obtenidos con los valores necesarios especificados en las normas europeas (EN 312:2010) para determinar la compatibilidad de usos de tableros con espesor de 4 a 6 mm.

Tabla 4. Clasificación de los tableros según las normas europeas (EN 312: 2010)

Tipo	MOR (N/mm ²)	MOE (N/mm ²)	IB (N/mm ²)	Clasificación
A2	12,11 (0,10)	2.243,88 (221,73)	0,50 (0,11)	P2
A3	13,26 (0,69)	3.017,47 (14,71)	0,49 (0,04)	P2
B3	12,71 (0,33)	1.994,82 (153,12)	0,33 (0,02)	P1
Tipo P1 (EN312:2010)	11,5	-	0,31	
Tipo P2 (EN312:2010)	12	1.950	0,45	

Los tableros A2 y A3 pueden ser clasificados como tableros tipo P2, es decir, tableros para aplicaciones de interior (incluyendo mobiliario) en ambiente seco. Mientras que los tableros tipo B3 podrían ser empleados como tableros para utilización general en ambiente seco (P1). El resto de tipologías no entraría en ninguna clasificación debido a que no se cumplen todos los valores mínimos necesarios.

Conclusiones

En este estudio se han evaluado las propiedades físicas y mecánicas del tablero de partículas elaborado a partir de ramas de naranjo, sin utilizar ningún tipo de adhesivo. Los resultados indican que, mediante un proceso de fabricación con baja temperatura de prensado, es posible producir tableros de partículas a partir de materiales biodegradables. Este tipo de tablero podría reemplazar a los materiales de madera tradicionales en la construcción, ayudando así a reducir la deforestación.

Los tableros fabricados con partículas de tamaño <0,25 mm, a 140°C de temperatura, 2,6 MPa de presión y aplicando 2 ó 3 ciclos de 15 minutos (tipos A2 y A3) alcanzan propiedades compatibles para ser empleados en revestimientos interiores y en elementos de mobiliario en ambiente seco.

Se ha conseguido fabricar un tablero ecológico con residuos de podas del naranjo y sin utilizar ninguna sustancia contaminante.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo a la Vicepresidencia Segunda y Consellería de Servicios Sociales, Igualdad y Vivienda de la Generalitat Valenciana a través del Plan Irta, proyecto HBIRT3/2023/1.

Bibliografía

Bhupendra, K., Mohammad, Y., Maulin P. Shah. 2022. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability". Environmental research. Vol 206, 112285. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285>

EN 309. Particleboards. Definitions and classification. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.

EN 310. Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.

EN 312. Particleboards. Specifications. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 2010.

EN 317. Particleboards and fiberboards. Determination of swelling in thickness after immersion in water. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 1993.

EN 319. Particleboards and fiberboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 1993.

EN 320. Particleboards and fibreboards. Determination of resistance to axial withdrawal of screws. Committee for Standardization, Brussels, Belgium. 2011.

EN 323. Wood-based panels. Determination of density. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 1993.

Liu, SX., Lou, Y., Li, YX., Zhang, J., Li, P., Yang, BR., Gu, Q. (2022). Review of phytochemical and nutritional characteristics and food applications of Citrus L. fruits. *Frontiers in Nutrition*, 9:968604. [DOI:10.3389/fnut.2022.968604](https://doi.org/10.3389/fnut.2022.968604)

Valorización de la Pulpa de Café (*Coffea arabica* L.) como Ingrediente Funcional: Una Revisión de su Potencial y Aplicaciones en la República Dominicana

K.A. Alcántara¹, D. Martínez-Romero², M.H. Díaz-Mula², F. De La Rosa¹, J. Castillo¹, M.E. García-Pastor² y D. Valero²

¹ Facultad de Ciencias Agronómicas y Veterinarias UASD

Doctorado en Ciencias agroalimentarias UASD-UMH, Santo Domingo, República Dominicana e-mail:

kalcantara2013@gmail.com, ⁴ fdelarg@gmail.com ⁵ juliadcastillo@gmail.com

² Institute for Agro-food and Agro-environmental Research and Innovation (CIAGRO) - University Miguel Hernández (UMH), Ctra. Beniel km. 3.2, 03312 Orihuela, Alicante, Spain.

Resumen

La producción de café en la República Dominicana genera unas 11,000 t, de pulpa al año, que representa alrededor del 40-50% del peso seco de las cerezas de café. Este subproducto, considerado un desecho, tiene potencial como ingrediente funcional debido a su perfil nutricional y bioactivo, rico en compuestos fenólicos, fibra dietética, vitaminas, y minerales. Esta revisión evalúa la literatura existente sobre las propiedades funcionales y nutricionales de la pulpa de café, así como las oportunidades y desafíos para su aprovechamiento sostenible en el país. La búsqueda de artículos originales se realizó en Scopus, coffee AND pulp AND waste AND nutritional AND value AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) OR LIMIT-TO (LANGUAGE, "Spanish")) AND (LIMIT-TO (OA, "all")) PubMed, y Google Scholar, pulpa de (café) AND nutrición personas AND valor económico. Se formularon los criterios de inclusión y exclusión, se eliminaron los artículos repetidos y sólo 58 artículos cumplieron los requisitos. Los resultados destacan el contenido de ácido clorogénico. Además, la reutilización de la pulpa mejora el impacto ambiental negativo de los residuos del café, contribuyendo a la economía circular. Sin embargo, la implementación de este subproducto enfrenta la falta de tecnología adecuada, los costos y la variabilidad en la composición química. Se concluye que la valorización de la pulpa de café como ingrediente funcional agrega valor económico, ofrece beneficios ambientales. Se recomienda realizar más investigaciones para optimizar los métodos de procesamiento y evaluar la viabilidad económica de estos productos en el mercado local e internacional.

Palabras clave: Valorización de subproductos, Pulpa de café, Ingredientes funcionales, Sostenibilidad agroindustrial, Compuestos bioactivos

Valorization of Coffee Pulp (*Coffea arabica*) as a Functional Ingredient: A Systematic Review of its Potential and Applications in the Dominican Republic

Abstract

Coffee production in the Dominican Republic generates about 11,000 tons of pulp per year, which represents around 40-50% of the dry weight of coffee cherries. This byproduct, considered a waste, has potential as a functional ingredient due to its nutritional and bioactive profile, rich in phenolic compounds, dietary fiber, vitamins, and minerals. This review evaluates the existing literature on the functional and nutritional properties of coffee pulp, as well as the opportunities and challenges for its sustainable use in the country. The search for original articles was carried out in Scopus, coffee AND pulp AND waste AND nutritional AND value AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English ") OR LIMIT-TO (LANGUAGE , "Spanish")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) PubMed, and Google Scholar, pulp of (coffee) AND nutrition people AND economic value. Inclusion and exclusion criteria were formulated, duplicate articles were eliminated, and only 58 articles met the requirements.

The results highlight the chlorogenic acid content. Furthermore, the reuse of the pulp improves the negative environmental impact of coffee waste, contributing to the circular economy. However, the implementation of this byproduct faces the lack of adequate technology, costs and variability in chemical composition. It is concluded that the valorization of coffee pulp as a functional ingredient adds economic value and offers environmental benefits. Further research is recommended to optimize processing methods and evaluate the economic viability of these products in the local and international market.

Keywords: Valorization of by-products, Coffee pulp, Functional ingredients, Agroindustrial sustainability, Bioactive compounds

Objetivo

Evaluar, a través, de una revisión sistemática, las propiedades nutricionales, funcionales y bioactivas de la pulpa de café (*Coffea arabica* L.) y su potencial de valorización en diversas aplicaciones de alto valor añadido, con un enfoque en su aplicabilidad en la República Dominicana.

Introducción

La producción mundial de café (*Coffea arabica*) en 2022/2023 fue aproximadamente de 47,29 millones de toneladas de cerezas de café, se procesaron generando 9,93 millones de toneladas de café verde y 40,68 millones de toneladas de subproductos (86 % del volumen cosechado) (ICO, 2024). Los desechos consisten en cáscaras, pulpa, mucílago, pieles plateadas y posos de café, que se derivan de los diferentes pasos involucrados en el procesamiento incluida la cosecha y el procesamiento (Lee et al., 2023).

En el Caribe, existen iniciativas en marcha para abordar el problema de los residuos de café y convertirlos en un recurso valioso. Por ejemplo, en Jamaica, un proyecto está utilizando los posos de café para producir biocombustible. En Trinidad y Tobago, están utilizando los posos de café para crear abono orgánico. La pulpa es considerada como el principal subproducto del café, representa cerca de 30% del peso seco de la baya entera o alrededor de 40 % en frutos frescos; además, por cada kg de cerezas existe un contenido aproximado de 430 g de pulpa (Heeger et al., 2017; Rodríguez-Durán et al., 2014).

En el caso de la República Dominicana, el café fue introducido hace más de 200 años y se ha convertido en un elemento integral de su paisaje, no solamente en lo económico, comercial y productivo sino también en lo ambiental, social y cultural. El café (*Coffea arábica* L.) es el principal cultivo en las zonas de montaña de la República Dominicana. La producción de café contribuye de manera directa e indirecta a la economía del país y de las comunidades productoras. El área cultivada se estima alrededor de 94,406 hectáreas, de esta actividad dependen alrededor de 28,224 familias, generando cerca de 50.000 empleos directos permanentes y más de 70.000 empleos temporales. El país ocupa el vigésimo séptimo puesto mundial en producción de café, con 24.000 t, producidas durante el periodo 2017-2018 (ICO, 2019; CEPAL, 2020)

El cultivo de café se extiende por las ocho regiones agropecuarias de la República Dominicana, con una mayor concentración en las regiones norte, central, norcentral y sur. Las áreas productoras más relevantes se encuentran en las principales cadenas montañosas, como la Cordillera Septentrional, la Cordillera Central, la Sierra de Neyba y la Sierra de Bahoruco (Jiménez et al., 2007) (Figura 1). La principal zona cafetalera de la República Dominicana se encuentra en las regiones central y sur, al sur de la Cordillera Central y la Sierra de Neyba, representando el 44 % de la superficie cultivada y el 37 % de las fincas. Las variedades predominantes son arábicas, las tradicionales como típica, caturra, Catuaí y catimores, que son materiales introducidos tolerantes a la roya del café (*Hemileia vastatrix* Berk & Br) como Lempira, Castillo, Costa Rica 95, Cuscatleco, Línea T-8667 y recientemente liberadas las variedades locales CATIDIAF 21 y Caribe.

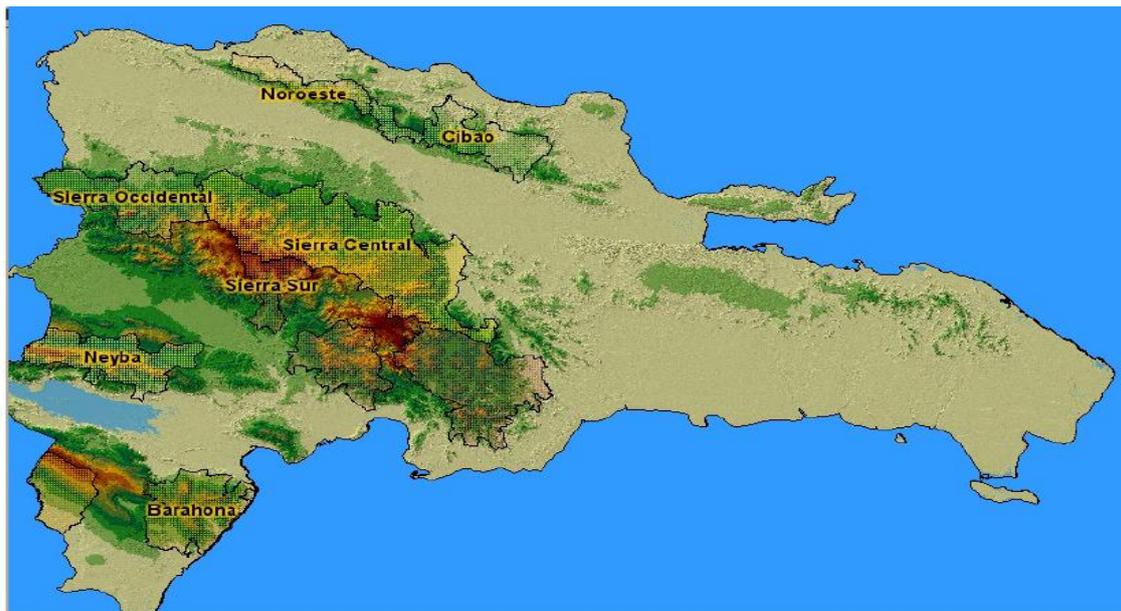


Figura 1. Mapa de las principales zonas productoras de café en la República Dominicana

Fuente: A. Escarramán et al., “Determinación de los atributos de calidad del café en zonas productoras de la República Dominicana”, Publicación del Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF) y del Consejo Dominicano del Café (CODOCAFE), Santo Domingo, República Dominicana, 2007.

La gestión inadecuada de residuos de café en la República Dominicana genera un impacto ambiental y socioeconómico negativo que afecta a la sostenibilidad de la caficultura. La acumulación de desechos en los cafetales y zonas aledañas contamina el suelo y las fuentes de agua, libera gases de efecto invernadero y perjudica la biodiversidad local. Esto provoca pérdidas económicas debido a la baja productividad, el deterioro de la salud pública y debilitamiento de la economía local. La situación se agrava en las pequeñas fincas, por los bajos precios del café, falta de capacitación y las débiles políticas públicas. Es necesario investigar las prácticas actuales de manejo de residuos, sus impactos y estrategias para una gestión sostenible (Pulido, 2020).

Las transformaciones agroalimentarias que mejoren la eficiencia, inclusividad, resiliencia, sostenibilidad, producción, nutrición, ambiente y vida mejor; son claves para la Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible (FAO, 2023). En este contexto, la industria cafetalera es de vital importancia para la economía y el desarrollo de la República Dominicana. Sin embargo, esta actividad genera una cantidad significativa de residuos, unas 11,000 t, principalmente de pulpa de café, que representan alrededor del 50 % del peso seco de la baya entera. La gestión inadecuada de estos residuos ocasiona diversos problemas ambientales, como la contaminación del suelo y el agua, la emisión de gases de efecto invernadero y el impacto negativo en la biodiversidad (Pulido, 2020).

Procesado del café

Los frutos maduros del café son generalmente procesados en los mismos lugares de producción y pasan por una serie de operaciones que tienen por objeto despojar a los granos de su envoltura (pulpa, mucílago y pergamino) para obtener un grano comestible de buena calidad (Figura 2a y 2b). Este proceso inicia con la recolección del fruto del cafeto y continúa con el beneficiado que se realiza en tres etapas. La fase húmeda, que consiste en recolección, recibo, despulpado, desmucilaginado (fermentación), lavado, clasificación y secado de café hasta obtener el 12 % de humedad. La fase seca, que se produce la transformación de café pergamino a café verde (oro). En esta fase se incluye el almacenamiento, descascarado (pilado), trillado, clasificación y envasado del café. Por último, existe una vía semihúmeda (Romero y Camilo, 2019)

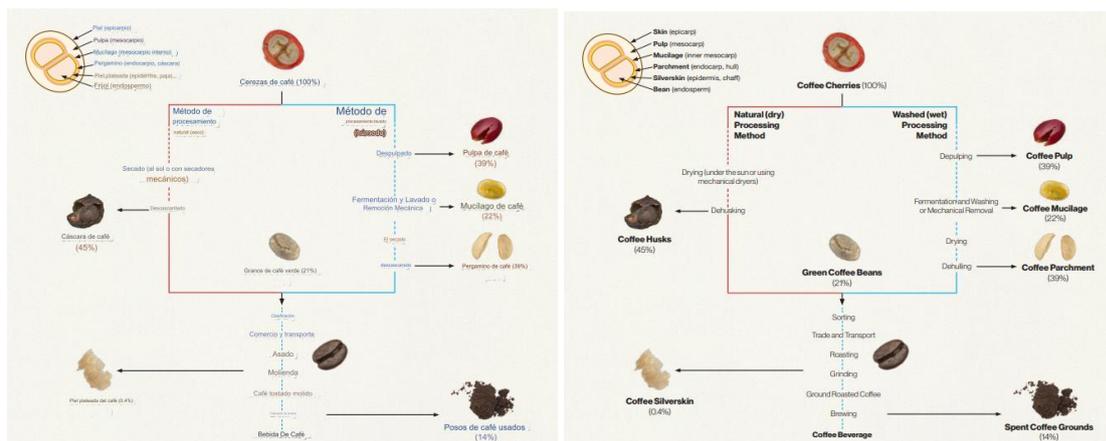


Figura 2a y 2b. Estructura de la cereza del café y subproductos del procesamiento

Fuente: Organización Internacional del café (ICO, 2024) traducida al español

Composición química del café

La composición química de los subproductos del café varía significativamente entre las diferentes partes de la planta, lo que influye en sus posibles aplicaciones industriales y alimentarias.

Los subproductos del café, como la cáscara, pulpa, piel plateada y posos, presentan una variedad de compuestos químicos que los hacen útiles para diversas aplicaciones. La pulpa tiene un alto contenido en fibra (60,50%) y celulosa (63%), mientras que la piel plateada destaca por su nivel de proteínas (20%) (Tabla 1) Los posos de café contienen altos niveles de lípidos (16%) y hemicelulosa (36,70%), lo que resalta su potencial para ser aprovechados en la industria alimentaria y otras aplicaciones sostenibles, promoviendo el aprovechamiento integral de los residuos de café. (ICO.2024)

Los subproductos del café están clasificados en cuatro grupos que difieren tanto en su composición como en su origen.

Tabla 1. Subproductos del café y sus compuestos químicos

Compuestos Químicos de subproductos de café	Cáscara	Pulpa	Piel plateada	Posos de Café
Proteína	8-11%	5-15%	20%	10.32%
Lípidos	0.5-3%	2-7%	3%	16%
Minerales	3-7%	9%	8%	0.82-3.52%
Carbohidrato	58-85%	21-32%	0.25-6.35	-
Celulosa	43%	63%	17.80%	8.60%
Grasa	0.50%	2-7%	2.20%	2.29%
Hemicelulosa	7%	2.30%	13.10%	36.70%
Sustancias Pécicas Totales	1.60%	6.50%	0.02%	0.01%
Lignina	9%	14.3-17.5%	1%	0.05%
Cafeína	1%	1.5%	0.6-1.1%	0.02%
Acido Clorogénico	2.50%	2.40%	3%	2.30%
Tanino	5%	3%	0.02%	0.02%
Fibra Total	24-30.8%	60.50	60%	43%
Humedad	13-15%	82.40%	5-7%	74.72%
Ceniza	5.4%	7.30%	7.34-10.5%	0.47%

Fuente: Organización Internacional del café (ICO, 2024)

La implementación de la pulpa de café como un recurso para producir alimentos funcionales, permitiría aprovechar este residuo de manera sostenible, reduciendo su impacto ambiental y evitando su disposición en vertederos. Al transformar la pulpa de café en un producto de valor, se contribuye a la economía circular y se minimiza la huella ambiental de la industria cafetalera.

En 2022-2023, la producción total de cerezas de café fue de 47,29 millones de toneladas, generando 9,93 millones de toneladas de café verde (21%). Los subproductos ascendieron a 40,68 millones de toneladas (86%), con 14,68 millones provenientes de la cáscara. Los métodos naturales procesaron el 31%, mientras que los lavados/semilavados representaron el 69%. El consumo global fue equivalente a 173 millones de sacos de café. (Tabla 2).

Tabla 2. Resumen de la Producción y Subproductos del Café en la Cosecha 2022-2023

Concepto	Cantidad (millones de toneladas/año)	Porcentaje / Observaciones
Producción total de cerezas de café	47.29	100 %
Producción de café verde	9.93	21 % del peso de las cerezas
Subproductos totales generados	40.68	86 % del volumen de cerezas cosechadas
Métodos de procesamiento		
Métodos naturales (31% de la producción total)	32.63	
Cáscara de café (natural)	14.68	45 % del peso de la cereza
Café verde (natural)	6.92	
Métodos lavados/semilavados (69% de la producción)	14.66	Incluye cáscara, pulpa, mucílago, pergamino y contenido de humedad
Subproductos condensados (lavados/semilavados)	6.80	46 % del peso original de la cereza
Total de material biológico generado	29.34	62 % del peso de las cerezas cosechadas
Consumo global de café (campana 2022-23)	10.38	Equivalente a 173 millones de sacos de café
Cascarilla plateada (producida durante el tostado)	0.20	0.4 % del peso de las cerezas / 1.7 % del peso del café verde
Posos de café usados (después de la infusión)	11.4	Incluyen 61% de contenido de humedad, equivalente a 6.92 millones de toneladas secas

Fuente: Organización Internacional del café (ICO, 2024)

En total, los distintos métodos de procesamiento del café, desde la cereza hasta el café verde (oro) para exportación, produjeron 29,34 millones de toneladas de material biológico, lo que representa aproximadamente el 62 % del peso de las cerezas de café cosechadas en la campaña 2022-23.

Metodología

Esta revisión evalúa la literatura existente sobre las propiedades funcionales y nutricionales de la pulpa de café, así como las oportunidades y desafíos para su aprovechamiento sostenible en el país. La búsqueda de artículos originales se realizó en Scopus, coffee AND pulp AND waste AND nutritional AND value AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE, "Spanish")) AND (LIMIT-TO (OA, "all")) PubMed, y Google Scholar, pulpa de (café) AND nutrición personas AND valor económico. Se formularon los criterios de inclusión y exclusión, se eliminaron los artículos repetidos y sólo 58 artículos cumplieron los requisitos.

Resultados y Discusión

La pulpa de café se produce en grandes cantidades y su eliminación puede contaminar el medio ambiente si no se maneja de forma adecuada (Ameca y Serrilla, 2018); (Delgado et al., 2019); Teniente et al., 2024). Sus atributos son presentados por muchos estudios, destacando la importancia del ácido clorogénico. Así se puede ver que, al ensilarse, aumenta la concentración de ácido clorogénico y no se afecta la capacidad antioxidante (Ameca y Serrilla 2018), de igual manera, aumenta al ser procesada por el aparato digestivo (Cañas y Rebollo-Hernanz, 2023). Por otro lado, la concentración de compuestos bioactivos y la actividad antioxidante de la pulpa de café pueden ser utilizados en la preparación de alimentos funcionales, ya que los valores encontrados son similares o mayores a los encontrados en otras bebidas y frutas consumidas comercialmente (Delgado et al., 2019).

El ácido clorogénico no fue el más abundante en la pulpa, como se ha reportado en estudios previos (Murthy y Naidu, 2012). La cantidad de ácido clorogénico varía con el grado de maduración del fruto (Aertas y Baumann, 1994), la especie y los demás factores asociados a la calidad del café, como la altitud y la presencia o ausencia de sombra, así como la resistencia a algunas enfermedades (Humphrey y Macrae, 1987). Sin embargo, el ácido clorogénico ha sido identificado como un potente inhibidor de la peroxidación lipídica *in vitro* y ha mostrado posible actividad anticancerígena *in vivo* (Kasai y otros, 2000).

Teniente et al, 2024. (2024) evaluaron el contenido fenólico total de extractos de cáscara de granada (PP) y la pulpa de café (CP), mediante cromatografía líquida de alta resolución/ionización por electropulverización/espectrometría de masas. Además, se evaluaron los potenciales anti proliferativos y citotóxicos, mediante MTT (3-(4,5-dimetiltiazol-2-il)-2, bromuro de 5-difenil-2H-tetrazolio) y con ensayos de lactato deshidrogenasa, respectivamente. Los resultados mostraron efectos anti proliferativos y citotóxicos de los polifenoles de PP y CP cuando se administran en diferentes concentraciones o mezclas en células HeLa, A549 y MDA-MB. Por otro lado, el valor nutricional y el contenido de antioxidantes de la pulpa de café la convierten en una buena opción para la alimentación animal (Ameca y Serrilla, 2018).

Se comprobó los efectos antidiabéticos y antioxidantes del extracto acuoso de la pulpa de café en ratas. Potencialmente se mejora la función renal en la diabetes tipo 2 al preservar el transporte renal de cationes orgánicos a través de una vía de estrés oxidativo (Boonphang et al., 2021). De igual manera, en un ensayo realizado para medir parámetros metabólicos en sangre de personas que consumieron jugo de pulpa de café, no se observaron eventos adversos relacionados con el jugo en cuanto a peso corporal, parámetros bioquímicos, función hepática, función renal, hemogramas completos, glucosa en sangre, análisis de orina o electrocardiogramas. Además, el consumo del jugo durante al menos 8 semanas redujo significativamente los niveles de colesterol LDL, y los niveles de glucosa se mantuvieron notablemente mejores que en el grupo placebo (Rungraung et al., 2023). Se concluyó que consumir 28 g/día de concentrado de jugo de pulpa de café durante 12 semanas es seguro para voluntarios sanos.

Se evaluaron los compuestos fenólicos, y se encontró que el ácido 5-O-cafeoilquínico, junto con un hexósido putativo de (epi)catequina, fueron los compuestos fenólicos predominantes entre los 16 detectados en la pulpa y cáscara de los granos de café de diferentes variedades, con un exocarpio de color distinto (Cruzalegui et al., 2021). Además, se indica que la Xantona mangiferina, un agente quimiopreventivo del cáncer, se encontró en todas las muestras.

Los análisis de extracto de posos de café gastados (SCG) mostraron 15 ácidos fenólicos y 8 flavonoides. Los ácidos rosmarínico y siríngico fueron los ácidos fenólicos más abundantes, mientras que la apigenina-7-glucósido, la naringina, la epicatequina y la catequina fueron los flavonoides predominantes. Los resultados reflejaron la eficiencia de degradación del extracto frente al crecimiento de cepas de *Aspergillus*. Los SCG registraron la desintoxicación en medios líquidos para aflatoxinas (AF) y ocratoxina A (OCA). (Badr et al., 2022)

Se investigó el efecto de la digestión *in vitro* sobre compuestos bioactivos, las actividades biológicas del extracto de pulpa de café (CPE) contra patógenos y un probiótico (*Lactobacillus acidophilus* TISTR 1338). Los fenoles totales (TPC), el ácido clorogénico (CGA), la cafeína (CF), las antocianinas monoméricas totales (TMA), las actividades antioxidantes y antimicrobianas del CPE se determinaron antes y después de la digestión.

Después de la digestión *in vitro*, el TPC, CGA y CF disminuyeron 7,9, 31,7 y 50,0 %, peso seco (ps), respectivamente. La actividad antioxidante disminuyó un 22,6 % (DPPH) y un 12,4 % (FRAP). La CPE inhibió *Escherichia coli* TISTR 780 y *Staphylococcus aureus* TISTR 1466 a 150 y 200 mg/ml, respectivamente. Tanto el CPE como el CPE digerido no tuvieron ningún efecto sobre los probióticos probados. Estos resultados sugieren que los compuestos bioactivos del CPE pueden degradarse durante la digestión *in vitro* y, en consecuencia, las propiedades antioxidantes y antimicrobianas. Por tanto, el extracto de pulpa de café podría ser un potencial antimicrobiano natural para la industria alimentaria sin efecto sobre los probióticos (Khochapong et al., 2021).

Mediante el secado por atomización de pulpa de cereza de café permite producir polvos solubles con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, siendo más eficiente energéticamente que la liofilización. Este método es beneficioso para la salud por su alta concentración de compuestos bioactivos, como los fenoles y las metilxantinas, detectados en la bebida a dosis de 10 mg/mL. Según el análisis de ciclo de vida, el impacto ambiental del secado por atomización es de 750 kg de CO₂ equivalente por kg de producto en España, ligeramente mayor que los 720 kg de CO₂ para la liofilización, pero más sostenible. (López-Parra et al., 2024)

Un estudio sobre determinación de los atributos de calidad del café en zonas productoras de la República Dominicana (Tabla 2) indica las diferencias significativas entre grupos granulométricos asociados con las variables químicas. Las clases «muy pequeños» y «pequeños» tienen menos cafeína y más trigonelina que los «grandes» y «muy grandes». Los «muy grandes» y «grandes» tienen menos materia grasa que los «muy pequeños». Los «muy grandes» tienen más sacarosa y ácidos clorogénicos que los «muy pequeños».

Tabla 3. Promedios y diferencias significativas entre grupos granulométricos para las variables químicas.

Clases de granulometría	Muy pequeño	Pequeño	Grande	Muy grande
Número de muestras	24	186	230	193
% de Materia seca	89,1	89,4	89,3	89,3
	=	=	=	=
Cafeína (% ms)	1,2	1,3	1,4	1,4
	-	-	+	+
Trigonelina (% ms)	1,0	1,0	0,9	0,9
	+	+	-	-
Materia grasa (% ms)	15,1	13,9	13,4	13,2
	+	=	-	-
Sacarosa (% ms)	6,7	6,9	7,3	7,7
	-	- =	+ =	+
Ácidos clorogénicos (% ms)	8,5	8,6	8,7	8,8
	-	-	=	+

Fuente: A. Escaramán et al., “Determinación de los atributos de calidad del café en zonas productoras de la República Dominicana”, Publicación del Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF) y del Consejo Dominicano del Café (CODOCAFE), Santo Domingo, República Dominicana, 2007.

En la República Dominicana el residuo de café (pulpa y mucilago) se usa en la elaboración de abonos orgánicos (Pérez et al., 2008) la construcción de una fosa techada para la descomposición de la pulpa evita el 74 % de la contaminación hídrica (Romero y Camilo, 2019), disminuyendo el impacto negativo sobre el ambiente. En una comunicación personal con César Ros, productor de café y propietario de la empresa Dulcikafe, ubicada en la Sierra de Barahona, República Dominicana, se destaca el enfoque sostenible en la producción de café. Además, de cultivar café de alta calidad, Ros aprovecha los subproductos generados, como la cáscara y la pulpa de café. Estos residuos son procesados mediante deshidratación para su exportación y también se utilizan en la elaboración de compost, que luego es aplicado en sus plantaciones, cerrando el ciclo de producción de manera más ecológica y eficiente. (Café Maguana. 2024) En red social Facebook hay una reseña de la empresa Café Maguana que resalta el uso de la pulpa de café deshidratada para la preparación de infusiones y como abono orgánico.

Conclusiones

El estudio revela que la pulpa de café es rica en compuestos bioactivos como los ácidos fenólicos, lo que la convierte en una fuente prometedora para la producción de alimentos funcionales y nutraceuticos. Además, la reutilización de este residuo no solo añade valor económico, sino que también reduce el impacto ambiental negativo de los residuos de café, contribuyendo a la economía circular y a la sostenibilidad agroindustrial. Sin embargo, para una implementación efectiva, es necesario superar desafíos tecnológicos y económicos relacionados con la variabilidad en su composición química y los costos de procesamiento. Se recomienda realizar más investigaciones para optimizar los métodos de extracción y evaluar la viabilidad comercial tanto a nivel local como internacional.

Bibliografía

Ameca, GM; Cerrilla, MEO; Córdoba, PZ; Cruz, AD; Hernández, MS; Haro, JH. 2018. Chemical composition and antioxidant capacity of coffee pulp (en línea). *Ciência e Agrotecnologia* 42(3):307-313. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542018423000818>.

Badr, Ahmed Noah, Marwa M. El-Attar, Hatem S. Ali, Manal F. Elkhadragey, Hany M. Yehia, and Amr Farouk. 2022. "Spent Coffee Grounds Valorization as Bioactive Phenolic Source Acquired Antifungal, Anti-Mycotoxigenic, and Anti-Cytotoxic Activities" *Toxins* 14, no. 2: 109. <https://doi.org/10.3390/toxins14020109>

Boonphang, O; Ontawong, A; Pasachan, T; Phatsara, M; Duangjai, A; Amornlerdpison, D; Jinakote, M; Srimaroeng, C. 2021. Antidiabetic and Renoprotective Effects of Coffea arabica Pulp Aqueous Extract through Preserving Organic Cation Transport System Mediated Oxidative Stress Pathway in Experimental Type 2 Diabetic Rats (en línea). *Molecules* 26(7):1907. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26071907>.

Café Maguana. 2024. Reseña sobre el uso de la pulpa de café deshidratada para la preparación de infusiones. Publicación en <https://www.facebook.com/cafemaguana/photos/a.1539562132947935/2211186502452158/?type=3>. Facebook. (Consultado el 15 septiembre 2024)

Cañas, S; Rebollo-Hernández, M; Martín-Trueba, M; Braojos, C; Gil-Ramírez, A; Benítez, V; Martín-Cabrejas, MA; Aguilera, Y. 2023. Exploring the potential of phenolic compounds from the coffee pulp in preventing cellular oxidative stress after in vitro digestion (en línea). *Food Research International* 172:113116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113116>.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Instituto Dominicano del Café (INDOCAFE)/

Consejo Nacional para el Cambio Climático y Mecanismo de Desarrollo Limpio (CNCCMDL). 2020. Fortalecimiento de la cadena de valor de café en la República Dominicana: en respuesta al cambio climático (LC/MEX/TS.2020/39), Ciudad de México.

Cruzalegui, RJ; Güivin, O; Fernández-Jeri, AB; Cruz, R. 2021. Caracterización de compuestos fenólicos y actividad antioxidante de pulpa de café (*Coffea arabica* L.) deshidratada de tres fincas cafeteras de la región Amazonas (Perú) (en línea). *Información tecnológica* 32(5):157-166. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000500157>.

Delgado, SR; Arbelaez, AFA; Rojano, B. 2019. Antioxidant capacity, bioactive compounds in coffee pulp and implementation in the production of infusions (en línea). *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria* 18(3):235-248. DOI: <https://doi.org/10.17306/J.AFS.0663>.

Escarramán, A., Romero, J. M., Almonte, I., Ribeyre, F., Aguilar, P., Jiménez, H., ... & Ceballos, F. 2008. Determinación de los atributos de calidad del café en zonas productoras de la República Dominicana, Santo Domingo, República Dominicana, Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF)/Consejo Dominicano del Café (CODOCAFE).

FAO. 2023. El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2023 (en línea). Roma, FAO. 166 p. DOI: <https://doi.org/10.4060/cc7724es>.

Heeger A., Kosińska-Cagnazzo A., Cantergiani E., Andlauer W. 2017. Bioactives of coffee cherry pulp and its utilisation for production of Cascara beverage. *Food Chem.* 221:969–975. doi: [10.1016/j.foodchem.2016.11.067](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.067).

International Coffee Organization (ICO). 2019. Países por producción de café. Ed. Data, H. (Statistics).

International Coffee Organization (ICO). 2024. Beyond coffee Towards a Circular Coffee Economy Overview. Coffee Development Report 2022-23 A

Jiménez, H., Galtier, F., Del Rosario, P. J., López, J. H., & Valverde, L.. 2007. Mercado interno del café en la República Dominicana, Santo Domingo, República Dominicana, Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF).

Khochapong, W; Ketnawa, S; Ogawa, Y; Punbusayakul, N. 2021. Effect of in vitro digestion on bioactive compounds, antioxidant and antimicrobial activities of coffee (*Coffea arabica* L.) pulp aqueous extract (en línea). *Food Chemistry* 348:129094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129094>.

Lee, Y.-G.; Cho, E.-J.; Maskey, S.; Nguyen, D.-T.; Bae, H.-J. 2023. Productos de valor añadido a partir de residuos de café: una revisión. *Molecules*, 28, 3562. <https://doi.org/10.3390/molecules28083562>

López-Parra, M.B.; Gómez-Domínguez, I.; IriondoDeHond, M.; Villamediana Merino, E.; Sánchez-Martín, V.; Mendiola, J.A.; Iriondo-DeHond, A.; del Castillo, M.D. The Impact of the Drying Process on the Antioxidant and Anti-Inflammatory Potential of Dried Ripe Coffee Cherry Pulp Soluble Powder. *Foods* 2024, 13, 1114. <https://doi.org/10.3390/foods13071114>

Murthy, PS, Naidu, MM. 2012. Recuperación de antioxidantes fenólicos y compuestos funcionales de subproductos de la industria del café. *Food Bioprocess Technol* 5, 897–903. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0363-z>

Pérez, A; Céspedes, C; Núñez, P. 2008. Caracterización física-química y biológica de enmiendas orgánicas aplicadas en la producción de cultivos en República Dominicana. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal* 8(3):10-29.

Pulido, V. C. (2020). Análisis del potencial de aprovechamiento de la bioeconomía en la cadena de café de la República Dominicana.

Rodríguez-Durán L.V., Ramírez-Coronel, M.A., Aranda-Delgado E., Nampoothiri K.M., Favela-Torres E., Aguilar C.N., Saucedo-Castañeda G. 2014. Soluble and bound hydroxycinnamates in coffee pulp (*Coffea arabica*) from seven cultivars at three ripening stages. *J. Agric. Food Chem.*;62:7869–7876. doi: [10.1021/jf5014956](https://doi.org/10.1021/jf5014956).

Romero, J; Camilo, J. 2019. Manual de producción sostenible de café. IICA: Santo Domingo, The Dominican Republic.



Rungraung, N; Muangpracha, N; Trachootham, D. 2023. Twelve-Week Safety and Potential Lipid Control Efficacy of Coffee Cherry Pulp Juice Concentrate in Healthy Volunteers (en línea). *Nutrients* 15(7):1602. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15071602>.

Teniente, SL; Esparza-González, SC; Ascacio-Valdés, JA; Campos-Múzquiz, LG; Nery-Flores, SD; Onofre-Rentería, K; Rodríguez-Herrera, R. 2024. Antiproliferative and cytotoxic effects of polyphenols from pomegranate peel and coffee pulp on cancer cells (en línea). *Natural Product Research* :1-7. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786419.2024.2310669>.

Producción, Bienestar, Genética y Calidad en la Producción Animal

Valorización de subproductos de granada Mollar de Elche y Wonderful ensilado para su uso en alimentación de rumiantes.

M. Cutillas, M. Gálvez-López, I. M. Ilea, A. Navarro, G. Romero, J. R. Diaz

Instituto de Investigación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Universidad Miguel Hernández de Elche. Carretera de Beniel, km 3.2, 03312 Orihuela (Alicante). España
e-mail: maria.cutillas04@goumh.umh.es

Resumen

La valorización de subproductos agroindustriales para su aprovechamiento en alimentación animal supone una reducción de insumos que crea la oportunidad de optimizar la sostenibilidad de la cadena agroalimentaria, prioridad de la estrategia ODS 2030, y un abaratamiento de los costes de producción. El objetivo de este trabajo fue estudiar los cambios que se producen durante el proceso de ensilado de granada, variedades Mollar de Elche (DOP) y Wonderful, sobre sus características nutricionales y organolépticas para su posterior uso en alimentación de rumiantes. Se fabricaron microsilos con el subproducto de dos variedades distintas de granada, Mollar de Elche y Wonderful, a los que se realizó un seguimiento a día 0 (materia prima), 14, 35, 60 y 180. Las variables estudiadas incluían, pH, materia seca (MS), macrocomposición, evolución microbiológica, contenido en ácidos orgánicos y azúcares, y actividad antioxidante. Las variables se analizaron utilizando un modelo lineal (Proc. GLM, SAS v9.4), considerando los efectos fijos día de muestreo (5 niveles), variedad (2 niveles) y su interacción (10 niveles). Los resultados muestran cómo para ambas variedades el proceso de ensilado se dio de forma correcta determinando la estabilidad del proceso de fermentación hacia el día 35 y asegurando su viabilidad durante un periodo mínimo de 6 meses. Además, las características nutricionales de la materia prima se conservan en el producto ensilado. La valoración de la capacidad antioxidante (ABTS) se mantiene durante todo el seguimiento a pesar de que los compuestos bioactivos (fenoles totales) disminuyen al final del periodo de estudio. En conclusión, el ensilado es un método eficaz de conservación para el subproducto de las variedades Mollar de Elche y Wonderful de granada y su resultado presenta un valioso potencial como recurso nutricional en rumiantes. Estudios futuros de ofrecimiento del subproducto de granada ensilado ayudarían a conocer el grado de aceptación de esta materia prima por parte de los animales.

Palabras clave: economía circular, sostenibilidad, alimentación animal, fermentación, antioxidantes.

Valorization of silaged pomegranate by-products Mollar de Elche and Wonderful for use in ruminant feed

Abstract

The valorization of agro-industrial by-products for their use in animal feed leads to a reduction in inputs, creating the opportunity to optimize the sustainability of the agri-food chain, a priority of the SDG 2030 strategy, and a reduction in production costs. The objective of this study was to examine the changes that occur during the silage process of pomegranate, varieties Mollar de Elche (PDO) and Wonderful, on their nutritional and organoleptic characteristics for subsequent use in ruminant feed. Microsilos were made with the by-product of two different pomegranate varieties, Mollar de Elche and Wonderful, and were monitored on days 0 (raw material), 14, 35, 60, and 180. The variables studied included pH, dry matter (DM), macronutrient composition, microbiological evolution, content of organic acids and sugars, and antioxidant activity. The variables were analyzed using a general linear model (Proc. GLM, SAS v9.4), considering the fixed effects of sampling day (5 levels), variety (2 levels), and their interaction (10 levels). The results show that for both varieties, the silage process was successful, determining the stability of the fermentation process by day 35 and ensuring its viability for a minimum period of 6 months. Furthermore, the nutritional characteristics of the raw material are preserved in the ensiled product. The evaluation of antioxidant capacity (ABTS) remains stable throughout the monitoring period, despite the decrease in bioactive compounds (total phenols) at the end of the study period. It was concluded that silage is an effective preservation method for the by-products of Mollar de Elche and Wonderful pomegranate varieties, and its outcome

presents valuable potential as a nutritional resource for ruminants. Future studies offering ensiled pomegranate by-products would help determine the acceptance of this raw material by animals.

Keywords: Circular economy, sustainability, animal feed, fermentation, antioxidants.

Introducción

La valorización de subproductos agroindustriales para la alimentación animal representa una estrategia útil que optimiza la sostenibilidad de la cadena agroalimentaria mediante la recirculación de nutrientes. Esta práctica no solo reduce el impacto ambiental del sector agropecuario, sino que también disminuye los costos de producción y aporta compuestos bioactivos a los animales, generando alimentos de alta calidad y valor biológico para el consumo humano, fomentando la economía circular al reutilizar subproductos agroindustriales, alineándose con los objetivos de sostenibilidad de la ODS 2030. Este enfoque, permite el abastecimiento de personas y animales con recursos de kilómetro cero y con un uso eficiente de los recursos y de la energía.

Los subproductos vegetales, por su naturaleza perecedera, requieren tratamientos de conservación que mantengan sus características organolépticas y nutricionales a lo largo del tiempo y faciliten su inclusión desestacionalizada en las raciones animales. El ensilado es un método de conservación ampliamente utilizado para estas materias primas, ofreciendo un bioprocesado limpio y de bajo costo que genera alimentos con valor añadido y ricos en compuestos bioactivos. En la industria de la granada, los principales subproductos incluyen pieles, restos de pulpa, semillas y membranas carpelares, que retienen muchas de las sustancias bioactivas beneficiosas de la fruta, a menudo desaprovechadas durante su industrialización.

La granada (*Punica granatum L.*), perteneciente a la familia Punicaceae, es un cultivo de gran relevancia en España, que ocupa el segundo puesto mundial en producción con más de 6,000 hectáreas plantadas y una producción anual superior a 6,000 toneladas, de las cuales el 75% se localizan en la Comunidad Valenciana (MAPAMA, 2019). Aunque nativa de Asia, su cultivo está ampliamente extendido en regiones tropicales, subtropicales y del Mediterráneo (Gullón *et al.*, 2016; Viuda-Martos *et al.*, 2010). El consumo de granada ha crecido significativamente en las últimas décadas debido a su reconocimiento como alimento funcional y los diversos beneficios para la salud asociados a su contenido en compuestos bioactivos. Estos compuestos están presentes en diferentes partes del fruto, como la piel, las semillas y los arilos, y la fruta se comercializa tanto entera como procesada en productos industriales como mermeladas, zumos, leches fermentadas y gelatinas (Cano-Lamadrid *et al.*, 2020). Las partes comestibles representan aproximadamente el 50-52% del peso total del fruto, de las cuales el 78% es zumo y el 10-22% son semillas (El-Nemr *et al.*, 1990; Viuda-Martos *et al.*, 2012). Esto deja un 48-50% en subproductos, principalmente pieles y bagazo (Gullón *et al.*, 2015), cuyo aprovechamiento es limitado y genera un problema medioambiental.

Una solución para evitar este problema ambiental y fomentar la bioeconomía circular es la reutilización de estos subproductos, pudiendo además aprovechar su gran potencial. La piel de la granada, que constituye aproximadamente el 50% del peso total del fruto, es rica en compuestos bioactivos como fenoles y tocoferoles, siendo el ácido elágico y sus derivados los fenoles más abundantes (incluyendo punicalina y punicalagina). Estos compuestos bioactivos han demostrado tener efectos beneficiosos para la salud como actividad antiinflamatoria, mejora de la presión arterial, reducción de los niveles de triglicéridos (Correddu *et al.*, 2020). Por su parte, las semillas contienen una elevada proporción de lípidos insaturados con propiedades funcionales, además de proteínas y fibra, y presentan un bajo contenido en azúcares.

En el actual escenario de cambio climático y con la creciente restricción en el uso de antibióticos, el empleo de aditivos de origen natural ofrece una vía prometedora para reducir el estrés oxidativo, las infecciones microbianas y los desórdenes metabólicos en el ganado (Hassan *et al.*, 2020). En este contexto, el subproducto de la granada emerge como una fuente valiosa de compuestos fenólicos con potencial antioxidante, que puede beneficiar la salud y la calidad de los productos derivados de los rumiantes.

El objetivo de este trabajo fue estudiar los cambios que se producen durante el proceso de ensilado de granada, variedades Mollar de Elche (DOP) y Wonderful, sobre sus características nutricionales y organolépticas para su posterior uso en alimentación de rumiantes.

Materiales y Métodos

Se planteó un diseño experimental en el que comparar el subproducto de dos variedades de granada (*Punica granatum L*), Mollar de Elche (DOP) y Wonderful. Para ello se fabricaron microsilos en formato bala comercial (300 kg) con cada uno de estos subproductos en una proporción del 80%. El método de fabricación seguido se encuentra recogido en la patente de Díaz *et al.* (2015).

Se estableció un calendario de recolección de muestras, donde las primeras semanas los controles serían más frecuentes debido a mayor actividad biológica y cambios físico-químicos que tienen lugar en el proceso de ensilado. Los tiempos de muestreo fijados fueron: 0 (materia prima), 14, 35, 60 y 180 días posteriores a la realización de dichos silos.

Las variables que se estudiaron incluyeron características físico-químicas como pH (GLP 21, Crison, L'Hospitalet de Llobregat, España), materia seca (MS, %, AOAC 1990, 948.12), proteína bruta (PB, %, AOAC 1990, 988.05), grasa bruta (GB, %, AOAC 1990, 920.39), fibra neutro detergente (FND, %, Van Soest *et al.*, 1991), azúcares (%), AOAC 1990, 974.06). Seguimiento microbiológico de colonias ácido lácticas, enterobacterias, mohos y levaduras mediante cultivo en placas Petrifilm (3MTM Microbiology, EEUU). Metabolitos de la fermentación como azúcares y ácidos orgánicos extraídos mediante la metodología descrita por Feng-Xia *et al.* (2013) y determinados mediante cromatografía líquida HPLC (Agilent 1200, EEUU) (g/kg MS). La capacidad antioxidante se estudió mediante el método ABTS descrito por Re *et al.* (1998) (mg trolox eq/g MS) y la determinación de compuestos fenólicos totales (mg ácido gálico eq/g MS) (Folin-Ciocalteu descrito en Kim, Jeong y Lee (2003)). La respuesta de estas reacciones se midió por espectrofotometría con un espectrofotómetro UV-VISIBLE (Zuzi 4255/50). Los resultados obtenidos se analizaron mediante un modelo lineal, considerando los efectos del tratamiento, los días de muestreo y la interacción entre ambos (Proc. GLM, SAS v9.4).

Resultados y Discusión

El efecto del tratamiento no fue significativo para ninguna de las variables fisicoquímicas medidas, excepto para el pH. El efecto del tiempo fue significativo para el pH, MS, PB y azúcares, en cambio no lo fue para las variables GB y FND. La interacción entre el tratamiento y el tiempo de ensilado solo fue significativa sobre el pH (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados del análisis estadístico de las variables fisicoquímicas.

VARIABLES	TRAT		DIA		TRAT*DIA		MODELO	
	F	Pr	F	Pr	F	Pr	F	Pr
pH	10,96	0,0079	22,12	0,001	6,34	0,008	13,87	0,0002
MS 60*	0,93	0,3583	19,13	0,0001	1,56	0,2587	9,30	0,0009
PROTEÍNA BRUTA	0,04	0,8539	11,06	0,0011	0,30	0,8691	5,06	0,0092
MATERIA GRASA	1,19	0,3008	3,26	0,0589	0,83	0,5339	1,95	0,1559
FIBRA NEUTRA DETERG	0,00	0,9897	1,80	0,2054	1,58	0,253	1,50	0,2666
AZÚCARES	0,77	0,3997	138,01	0,0001	1,51	0,2722	62,09	0,0001

El pH se mantuvo en un rango de 4 a 4,5 a lo largo de todo el estudio. Aunque mostró diferencias significativas entre los dos tratamientos en el periodo de mayor actividad biológica del proceso de ensilado (15-30 días) estas no fueron relevantes (Figura 1).

La MS descendió de forma significativa en ambos tratamientos durante las dos primeras semanas de conservación. A partir de este punto se mantuvo estable durante todo el periodo de estudio y sin cambios significativos entre tratamientos (Figura 2).

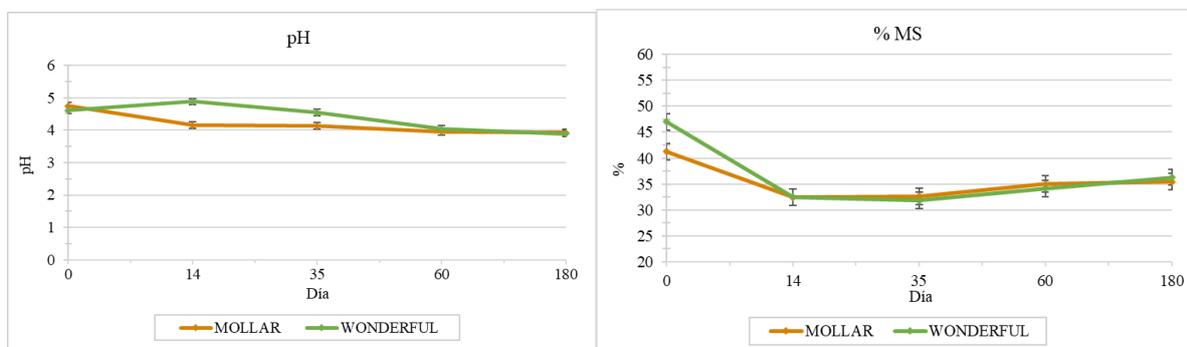


Figura 1. Evolución del pH a lo largo de los días de conservación de las diferentes granadas. Figura 2. Cambios del porcentaje total de materia seca (MS).

El porcentaje de PB no mostró cambios significativos entre tratamientos ni con el transcurso del periodo de conservación durante el estudio (Figura 3).

El porcentaje de GB mostró leves variaciones significativas entre tratamientos y una tendencia al aumento durante el estudio, aunque sin relevancia (0,75-1%) (Figura 4).

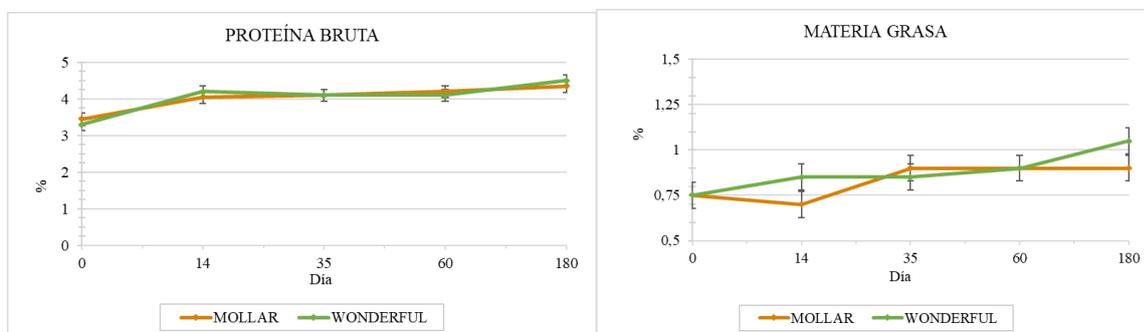


Figura 3. Evolución de la proteína bruta a lo largo de los días de conservación de los silos. Figura 4. Evolución de la materia grasa a lo largo de los días de conservación de las diferentes granadas.

El % FND del tratamiento Mollar no mostró cambios significativos durante todo el periodo de estudio. El tratamiento Wonderful mostró menor estabilidad para esta variable a lo largo de los 180 días de estudio. Se observaron diferencias significativas puntualmente entre el tratamiento Mollar y Wonderful, pero estas no tienen relevancia práctica (Figura 5).

El porcentaje de azúcares solubles disminuyó significativamente hasta el día 35, resultado de las reacciones fermentativas que tienen lugar en el proceso de ensilado durante este periodo. Desde este momento su valor se estabilizó hasta el final del periodo de estudio. No se observaron cambios significativos en tres tratamientos (Figura 6).

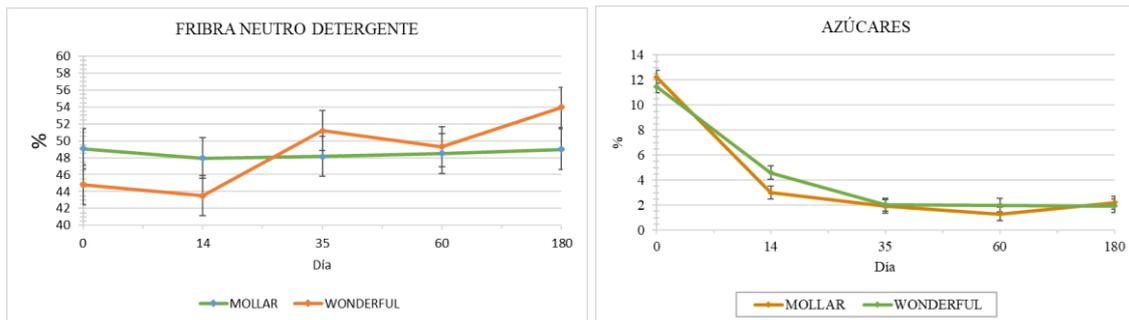


Figura 5. Evolución de la fibra neutro detergente a lo largo de los días de conservación de las diferentes granadas. Figura 6. Evolución de los azúcares a lo largo de los días de conservación de las diferentes granadas.

En el estudio microbiológico, el efecto del tratamiento sólo resultó significativo sobre el crecimiento de mohos ($p < 0,05$). El paso del tiempo sobre el ensilado resultó significativo para el crecimiento de todos los microorganismos estudiados ($p < 0,05$). La interacción entre el tratamiento y el tiempo resultó significativa ($p < 0,05$) en el crecimiento de enterobacterias, pero no para el resto de microorganismos (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados del análisis estadístico del estudio microbiológico.

VARIABLES	TRAT		DIA		TRAT*DIA		MODELO	
	F	Pr	F	Pr	F	Pr	F	Pr
LACTICAS	0,27	0,6121	8,54	0,0029	0,04	0,9967	3,84	0,0237
ENTEROB	4,59	0,0579	217,39	0,0001	16,38	0,0002	104,41	0,0001
MOHOS	16,12	0,0025	7,57	0,0045	0,33	0,8492	5,30	0,0078
LEVAD	0,20	0,6633	8,98	0,0024	2,83	0,083	5,27	0,0079

Las colonias de bacterias ácido-lácticas se multiplicaron exponencialmente de forma significativa durante las dos primeras semanas de estudio. El resto del período las colonias se mantuvieron constantes. No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 7).

Las poblaciones de enterobacterias mostraron una tendencia similar, aunque observándose una reducción más rápida en la variedad Mollar, causante de la interacción significativa observada del tratamiento con el día. El recuento de estos microorganismos resultó despreciable a partir del día 35 (Figura 8) en ambos tratamientos.

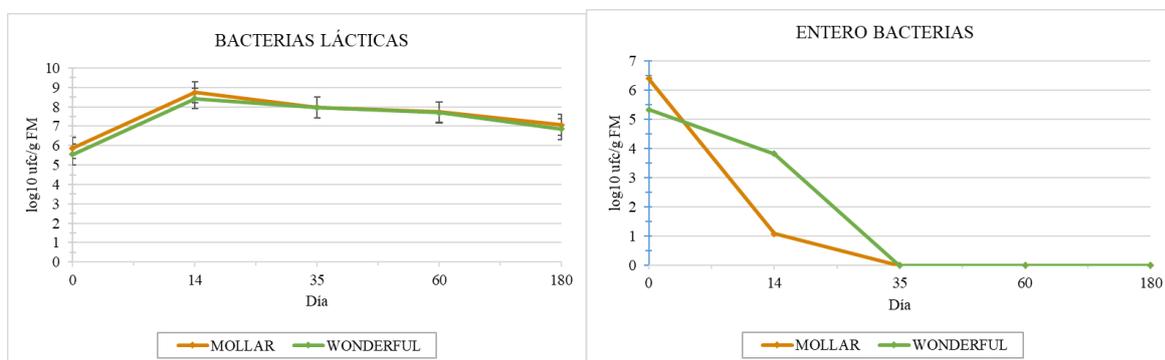


Figura 7 y Figura 8. Evolución de la población de bacterias lácticas y enterobacterias a lo largo de la conservación de los silos.

Las diferencias significativas en el recuento de mohos observadas en la materia prima de ambos tratamientos se mantuvieron durante los 180 días. Cuando concluyó el periodo de estudio el recuento de estos microorganismos había disminuido significativamente en relación a su presencia en la materia prima inicial (Figura 9).

La tendencia que siguieron las poblaciones de levaduras fue similar en ambos tratamientos, aunque presentaron diferencias significativas puntualmente. Al final del periodo de conservación de ambos tratamientos el recuento de levaduras fue significativamente menor que al principio del mismo (Figura 10).

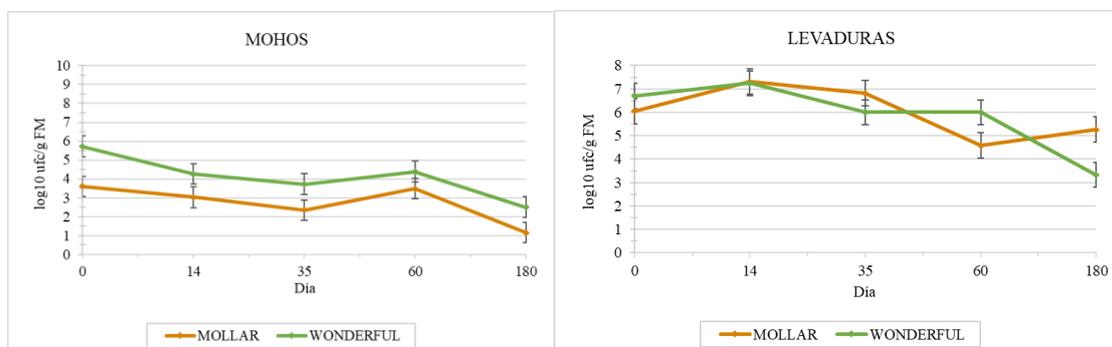


Figura 9 y Figura 10. Evolución de la población de mohos y levaduras a lo largo de la conservación de los silos.

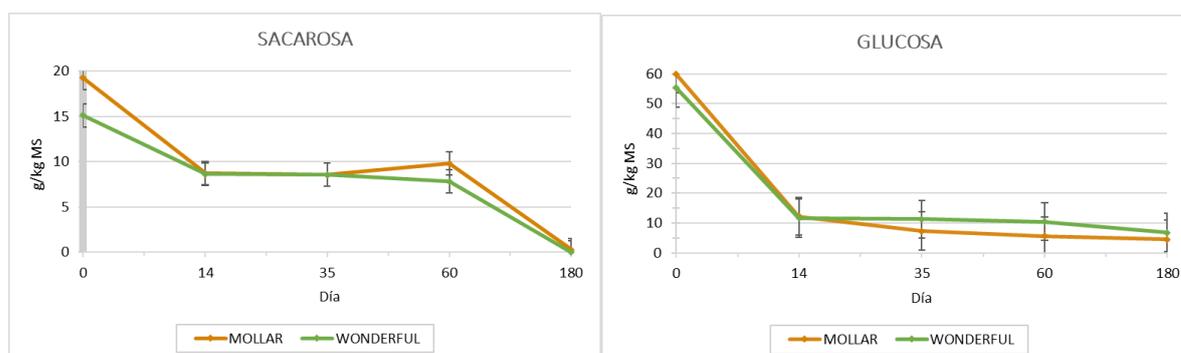
El efecto del tratamiento no resultó significativo sobre la concentración de los azúcares sacarosa, glucosa y fructosa determinados mediante HPLC. En cambio, el efecto del tiempo sí resultó significativo en la concentración de todos ellos ($p < 0,05$). La interacción del tratamiento y el tiempo no resultó significativa en ningún caso ($p > 0,05$).

En el caso de los ácidos orgánicos (láctico y acético), producto del proceso fermentativo, el tratamiento no resultó significativo para su concentración ($p > 0,05$). El tiempo del proceso fermentativo sí fue significativo en la concentración de ambos ácidos ($p < 0,05$). La interacción tratamiento-tiempo fue significativa en la concentración de ácido láctico ($p < 0,05$), pero no para la de ácido acético (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados del análisis estadístico de los metabolitos de la fermentación.

VARIABLES	TRAT		DIA		TRAT*DIA		MODELO	
	F	Pr	F	Pr	F	Pr	F	Pr
SACAROSA	2,60	0,138	44,72	0,0001	0,98	0,4615	20,60	0,0001
GLUCOSA	0,09	0,7749	23,66	0,0001	0,18	0,9423	10,60	0,005
FRUCTOSA	0,11	0,7495	22,49	0,0001	0,16	0,9534	10,08	0,0006
LACTICO	2,07	0,1805	50,92	0,0001	4,96	0,0183	25,07	0,0001
ACETICO	2,68	0,1328	10,23	0,0015	2,64	0,0975	6,02	0,0048

La concentración de azúcares fermentables (sacarosa, glucosa, fructosa) presentes en el subproducto de granada (materia prima) mostró un acusado descenso significativo durante las dos primeras semanas del proceso de ensilado. Las diferencias entre tratamientos no fueron significativas.



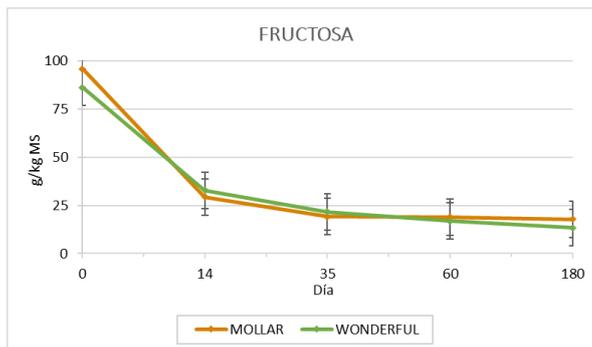


Figura 11, Figura 12 y Figura 13. Evolución de la concentración de azúcares fermentables, (media y error estándar) a lo largo del tiempo de conservación de ambas variedades.

Los ácidos orgánicos metabolitos de la fermentación (ácido láctico y ácido acético) aumentaron de forma estadísticamente significativa a medida que avanzó el periodo de conservación. Durante el estudio se observaron diferencias significativas entre tratamientos en la concentración de ambos metabolitos, pero su presencia siguió una tendencia similar (Figura 14 y 15).

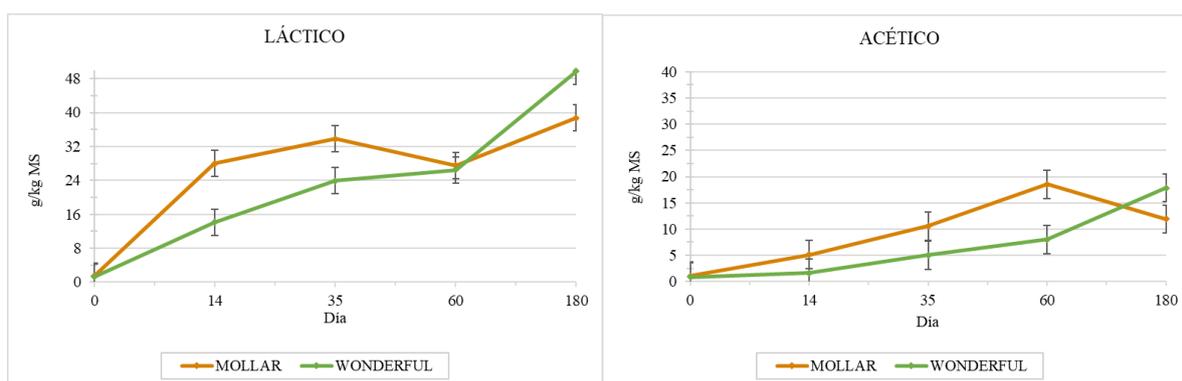


Figura 14 y Figura 15. Evolución de ácidos orgánicos metabolitos de la fermentación.

El efecto del tratamiento sobre la actividad antioxidante del ensilado estudiado no resultó significativo en las determinaciones de ABTS y fenoles totales ($p > 0,05$). El paso del tiempo resultó significativo en la determinación de fenoles totales ($p < 0,05$). La interacción entre el tratamiento y el tiempo resultó significativa para la variable ABTS ($p < 0,05$) (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados del análisis estadístico de las variables relacionadas con la actividad antioxidante.

VARIABLES	TRAT		DIA		TRAT*DIA		MODELO	
	F	Pr	F	Pr	F	Pr	F	Pr
ABTS	0,08	0,7884	2,18	0,1444	4,05	0,0332	2,78	0,0636
FOLIN	2,77	0,12	5,27	0,0152	1,15	0,38	3,16	0,043

La actividad antioxidante determinada mediante ABTS mostró diferencias significativas entre tratamientos, sin embargo, estas concentraciones permanecieron sin cambios significativos durante el periodo de conservación (Figura 16).

La concentración de compuestos fenólicos totales fue significativamente mayor en el tratamiento Wonderful durante gran parte del experimento. La concentración de estos compuestos se mostró sin cambios significativos en ambos tratamientos hasta el último tercio del periodo de estudio a partir de cuando se observó un descenso significativo (Figura 17).

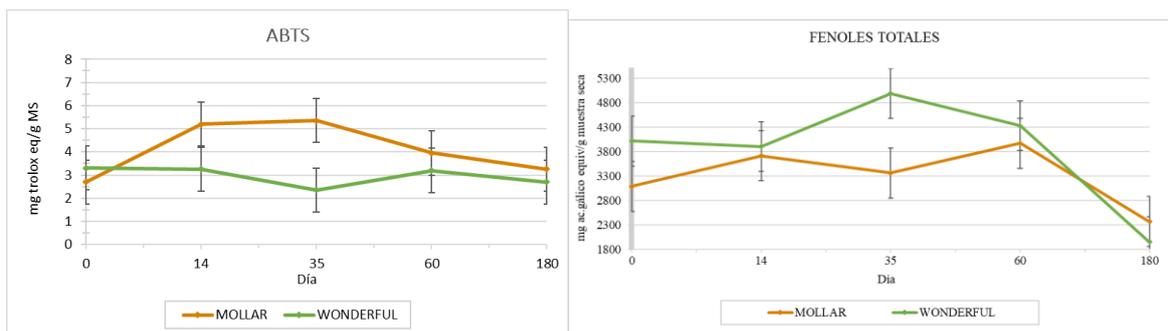


Figura 16. Evolución de la actividad antioxidante mediante el método ABTS (media y error estándar).

Figura 17. Evolución de los fenoles totales mediante la reacción de Folin-Ciocalteu (media y error estándar).

Los análisis muestran cómo el proceso de ensilado conserva la composición macro nutricional de los subproductos de granada asegurando la retención de los nutrientes esenciales necesarios para la alimentación de los rumiantes. Resultados similares para la caracterización de este subproducto para ensilar reportaron Khorsandi *et al.* (2018). Una evolución similar de las poblaciones bacterianas presentes en el ensilado de granada observaron De Bellis *et al.* (2022) quienes en su estudio concluyen que la presencia de bacterias fermentadoras ácido-lácticas crea condiciones microambientales que resultan adversas para microorganismos de carácter patógeno como las enterobacterias. La capacidad antioxidante determinada mediante la reacción ABTS se mantiene constante durante el periodo de estudio, a pesar de la disminución de los compuestos fenólicos totales observada en el último tercio del experimento. Esto sugiere que la preservación del subproducto de granada mediante ensilado favorece el efecto de los compuestos antioxidantes más estables a pesar de la pérdida de algunos fenoles (Fitri *et al.*, 2021), lo que resultaría beneficioso para reducir el estrés oxidativo en los animales que consumen este ensilado.

Conclusiones

Los resultados del estudio demuestran que el ensilado de subproductos de granada es una técnica viable para conservar sus propiedades nutricionales y organolépticas y su capacidad antioxidante, manteniendo una calidad adecuada para su uso en la alimentación de rumiantes. La estabilidad del pH y la actividad antioxidante a lo largo del tiempo sugieren que los subproductos de granada, incluso con la disminución de algunos compuestos bioactivos, pueden seguir aportando beneficios funcionales en la dieta animal. Los futuros estudios deberían centrarse en la aceptación por parte de los animales y en los efectos a largo plazo de la inclusión regular de estos subproductos en la dieta de los rumiantes, así como en la optimización del proceso de ensilado para maximizar la retención de compuestos bioactivos durante el almacenamiento.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por la Generalitat Valenciana (Consellería de Educación, universidades y Empleo) CIAICO/2021/301.

Bibliografía

Correddu F., Lunesu M.F., Buffa G., Atzori A.S., Nudda A., Battacone G., Pulina G. 2020. Can Agro-Industrial By-Products Rich in Polyphenols be Advantageously Used in the Feeding and Nutrition of Dairy Small Ruminants?. *Animals*. 10, 131.

Cano-Lamadrid M., Calín-Sánchez Á., Clemente-Villalba J. 2020. Quality Parameters and Consumer Acceptance of Jelly Candies Based on Pomegranate Juice "Mollar de Elche". *Foods*, 9(4). DOI: [10.3390/foods9040516](https://doi.org/10.3390/foods9040516).

De Bellis, P., Maggiolino, A., Albano, C., De Palo, P., & Blando, F. (2022). Ensiling Grape Pomace With and Without Addition of a *Lactiplantibacillus plantarum* Strain: Effect on Polyphenols and Microbiological Characteristics, *in vitro* Nutrient Apparent Digestibility, and Gas Emission. *Frontiers in veterinary science*, 9, 808293.

El-Nemr S. E., I. A. Ismail, M. Ragab. 1990. Chemical composition of juice and seeds of pomegranate fruit. *Molecular nutrition food research*, 34 (7): 601-606.

Fitri, A., Obitsu, T., & Sugino, T. (2021). Effect of ensiling persimmon peel and grape pomace as tannin-rich byproduct feeds on their chemical composition and *in vitro* rumen fermentation. *Animal Science Journal = Nihon Chikusan Gakkaiho*, 92(1), e13524.

Gullon, B., Manuela E. Pintado, José A. Pérez-Álvarez, Manuel Viuda-Martos. 2016. Assessment of polyphenolic profile and antibacterial activity of pomegranate peel (*Punica granatum*) flour obtained from co-product of juice extraction. *Food Control*, 59: 94-98. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.05.025>.

Gullon, B., Manuela E. Pintado, Juana Fernández-López, José A. Pérez-Álvarez, Manuel Viuda-Martos. 2015. *In vitro* gastrointestinal digestion of pomegranate peel (*Punica granatum*) flour obtained from co-products: Changes in the antioxidant potential and bioactive compounds stability. *Journal of Functional Foods*, 19: 617-628.

Hassan F., Arshad M. A., Ebeid H.M., Rehman M.S., Khan M.S., Shahid S., Yang C. 2020. Phytogetic Additives Can Modulate Rumen Microbiome to Mediate Fermentation Kinetics and Methanogenesis Through Exploiting Diet-Microbe Interaction. *Front. Vet. Sci.*, 12.

Khorsandi, S., Riasi, A., & Khorvash, M. (2018). Evaluating Chemical Composition, Fatty Acid Profiles, Antioxidant Activity and Nutritive Value of Pomegranate By-Product using *in Vitro* Gas Production Technique. *Research on Animal*

Viuda-Martos M, Ruiz-Navajas Y, Martín-Sánchez A, *et al.* 2012. Chemical, physico-chemical and functional properties of pomegranate (*Punica granatum* L.) bagasses powder co-product *Journal of Food engineering*, 110(2):220-224. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2011.05.029](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.029).

Viuda-Martos M., J. Fernández-López, J.A. Pérez-Álvarez. 2010. Pomegranate and its Many Functional Components as Related to Human Health: A Review. *Comprehensive reviews in Food Science and Food Safety*. 9 (6): 600-694.

La inclusión de hasta un 15% de subproducto de granada ensilado en la ración de cabras lecheras mantiene la producción y macro-composición de leche

A. Navarro¹, G. Romero¹, M. Gálvez-López¹, A. Roca¹, M. Ramón¹, C. Peris², J. R. Díaz¹

¹Instituto de Investigación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Universidad Miguel Hernández de Elche. Carretera de Beniel, km 3.2, 03312 Orihuela (Alicante). España.

²Instituto de Ciencia y Tecnología Animal. Universidad Politécnica de Valencia. C/ Vera s/n. Valencia. España.
e-mail: alejandro.navarro07@goumh.umh.es

Resumen

El objetivo de este experimento fue evaluar el efecto de la inclusión de diferentes proporciones del subproducto de granada (*Punica granatum* L., var. Wonderful) ensilado en la dieta del ganado caprino sobre la producción diaria individual de leche, su macro-composición y el recuento de células somáticas (RCS).

Se seleccionaron 80 cabras y se dividieron en 8 grupos de 10 animales cada uno (4 tratamientos x 2 lotes), con características fisiológicas homogéneas. Tras una semana de adaptación al lote se realizó un muestreo para obtener los valores pre-experimentales. A continuación comenzaron los tratamientos, los cuales tuvieron una duración de 8 semanas, incluyendo 2 semanas de adaptación a los tratamientos antes del inicio de los muestreos. Los tratamientos consistieron en la inclusión de 5%, 10% y 15% de materia seca (MS) del subproducto de granada en dietas isoenergéticas e isoproteicas, en comparación con una dieta sin subproducto (0%). Se determinó quincenalmente la evolución de la producción de leche (Lactocorder, WMB AG, Suiza) y la composición de la leche (grasa, proteína bruta, lactosa, extracto quesero (EQ), urea) mediante MilkoScan FT6000 (Foss, Dinamarca), así como RCS utilizando Fossomatic 5000 (Foss, Dinamarca). Las variables se analizaron mediante un modelo lineal mixto (Proc. Glimmix, SAS v9.4), considerando el efecto de la covariable en el muestreo pre-experimental, el tratamiento (4 niveles), el muestreo experimental (4 niveles), su interacción (16 niveles), así como el lote(trat) y el efecto aleatorio del animal.

Se observó que la covariable ($P < 0.001$) y el muestreo ($P < 0.001$) tuvieron efectos significativos, mientras que el tratamiento, la interacción tratamiento*muestreo y el lote(trat) no mostraron efectos significativos ($P > 0.05$). La producción de leche mostró un descenso significativo con el avance del experimento en todos los tratamientos. Las variables grasa, proteína bruta y extracto quesero aumentaron, mientras que la lactosa y la urea disminuyeron. En cuanto al RCS, se observó un menor recuento en los animales con tratamientos de mayor inclusión de subproducto en su dieta hacia el final del experimento.

Se concluyó que el ensilado de granada puede ser incluido en la dieta de las cabras lecheras hasta en un 15% MS manteniendo sus índices productivos y macro-composición de la leche a corto plazo, por lo que es una materia prima de bajo coste a considerar en la formulación de dietas. Sería oportuno realizar más estudios en esta línea de investigación a largo plazo y así completar el estudio de estas y otras variables y conocer los efectos que pueden aparecer durante una lactación completa.

Este estudio fue financiado por la Generalitat Valenciana (Consellería de Educación, universidades y Empleo) CIAICO/2021/301.

Palabras clave: Economía circular, sostenibilidad, nutrición animal, ganadería, rumiantes.

The inclusion of up to 15% pomegranate silage by-product in the diet of dairy goats does not affect milk production and macro-composition

Abstract

The objective of this experiment was to evaluate the effect of including different proportions of pomegranate by-product (*Punica granatum* L., var. Wonderful) silage in the diet of goats on individual daily milk production, its macro-composition, and and somatic cell count (SCC).

The effect of including 5%, 10%, and 15% dry matter (DM) of pomegranate by-product in isoenergetic and isoproteic diets was investigated, compared to a diet without the by-product (0%). Eighty goats were selected and divided into 8 groups of 10 animals each (4 treatments x 2 batches), with homogeneous physiological characteristics. After a one-week adaptation period, a pre-experimental sampling was conducted to obtain baseline values. The treatments then began, lasting 8 weeks, including 2 weeks of adaptation to the treatments before the start of sampling. The evolution of milk production (Lactocorder, WMB AG, Switzerland) and milk composition (fat, crude protein, lactose, UDM, urea) were determined biweekly using MilkoScan FT6000 (Foss, Denmark), as well as SCC using Fossomatic 5000 (Foss, Denmark). Variables were analyzed using a mixed linear model (Proc. Glimmix, SAS v9.4), considering the effect of the covariate in the pre-experimental sampling, treatment (4 levels), experimental sampling (4 levels) and their interactions (16 levels), as well as batch (treatment) and the random effect of the animal.

It was observed that sampling ($P < 0.001$) and the covariate ($P < 0.001$) had significant effects, while treatment, treatment*sampling, and batch(treatment) did not show significant effects ($P > 0.05$). A decrease in milk production was evident as the experiment progressed in all treatments. The variables fat, crude protein, and cheese extract increased, while lactose and urea decreased. It was observed a lower SCC in animals with higher inclusion treatments of the by-product towards the end of the experiment.

It was concluded that pomegranate silage can be included in the diet of dairy goats up to 15% DM, maintaining production index and macro-composition in the short term, making it a low-cost raw material to consider in goat diet formulation. Further studies are needed to understand long-term effects and to complete the study of these and other variables, as well as to determine the effects that may appear during a complete lactation.

This study was funded by the Generalitat Valenciana (Consellería de Educación, Universidades y Empleo) CIAICO/2021/301.

Keywords: Circular economy, sustainability, animal feed, livestock farming, ruminants.

Introducción

La valorización de subproductos agroindustriales para su uso en la alimentación animal es una estrategia clave para optimizar la sostenibilidad de la cadena agroalimentaria, promoviendo la recirculación de nutrientes y reduciendo el impacto ambiental (Monllor *et al.*, 2020). Este enfoque contribuye significativamente a la reducción de los costes de producción, además que algunos subproductos pueden ofrecer compuestos bioactivos que mejoran la salud y el bienestar animal (Correddu *et al.*, 2020). En un contexto global donde las prácticas de desarrollo sostenible son cada vez más relevantes, la economía circular se posiciona como una solución esencial para maximizar el aprovechamiento de recursos locales y optimizar el consumo energético.

La creciente escasez de recursos energéticos, junto con la volatilidad de los precios de los insumos agrícolas ha afectado considerablemente a la producción ganadera, especialmente a los sistemas que dependen de cultivos forrajeros y cereales. Esta situación ha puesto de manifiesto la necesidad de explorar alternativas más sostenibles y económicas. En este contexto, el uso de subproductos agroindustriales ha ganado popularidad por sus beneficios nutricionales y ser una posible solución para mejorar la eficiencia de la práctica ganadera y reducir el impacto ambiental.

La granada (*Punica granatum* L.) es ampliamente valorada por sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias (Gullón *et al.*, 2016). España se ha consolidado como uno de los mayores productores de granada en Europa, con las regiones de Murcia y la Comunidad Valenciana liderando esta producción. La Comunidad Valenciana produce más del 75% de las granadas españolas, mientras que Murcia es conocida por la alta calidad de su producción (MAPA, 2019). Sin embargo, el procesamiento industrial de la granada genera una cantidad significativa de subproductos, como la cáscara y los restos de pulpa, que representan alrededor del 48-50% del peso total de la fruta (El-Nemr *et al.*, 1990). Estos subproductos, que anteriormente se desechaban, se han reconocido como una fuente valiosa de nutrientes y compuestos bioactivos que pueden ser utilizados en la alimentación animal (Benoit y Mottet, 2023).

El ensilado permite conservar el subproducto durante todo el año, garantizando una oferta constante en el tiempo que posibilita la estabilidad en la formulación de raciones con repercusión positiva sobre la producción y la economía de las explotaciones ganaderas que lo utilizan (Bordiga *et al.*, 2015). Además, estudios han mostrado que el uso de cáscara de granada en la dieta de rumiantes puede mejorar la salud digestiva, reducir el estrés oxidativo y, en consecuencia, mejorar la calidad de la leche producida.

El sector caprino lechero en España ha sido un pilar clave en la adopción de este tipo de prácticas sostenibles. Con una producción anual de aproximadamente 535 mil toneladas de leche, España es el segundo mayor productor de leche de cabra en Europa, representando el 22% de la producción europea total (MAPA, 2019). La Región de Murcia y la Comunidad Valenciana juegan un papel destacado en esta industria, particularmente por la alta productividad de la raza Murciano-Granadina, que es la principal responsable de la producción lechera caprina en estas regiones.

La leche de cabra es altamente valorada por su perfil nutricional, que incluye un alto contenido de sólidos totales, proteínas de alta calidad y grasas saludables. Estos atributos han favorecido el crecimiento de la demanda de productos lácteos caprinos tanto en mercados locales como internacionales. Además, la leche de cabra destaca por ser una excelente materia prima para la producción de derivados lácteos como quesos y yogures debido a su alto rendimiento en la elaboración del queso.

El uso de subproductos como la cáscara de granada en la alimentación caprina no solo mejora la calidad de la leche producida, sino que también contribuye a la reducción de la huella de carbono del sector. Al aprovechar estos subproductos, se reduce la necesidad de cultivos tradicionales, lo que disminuye el uso de fertilizantes y agua, reduciendo así el impacto ambiental (Benton *et al.*, 2022).

El objetivo de este estudio es analizar el efecto de la inclusión de diferentes proporciones de ensilado de granada en la dieta del ganado caprino sobre la producción diaria de leche, la composición de macronutrientes, el recuento de células somáticas y el peso vivo de los animales.

Materiales y Métodos

Se testó la inclusión del subproducto de granada ensilado en la dieta del ganado caprino en las siguientes proporciones: 5, 10, 15% MS de la dieta. Las dietas fueron isoenergéticas e isoproteicas y se compararon con una dieta testigo convencional que no incluía subproducto (0% subproducto). Ocho semanas después del parto, se realizó un muestreo pre-experimental en un lote de 100 animales que estaban alimentados con la dieta convencional de las que se seleccionaron 80 cabras que fueron divididas en 8 grupos de 10 animales cada uno (4 tratamientos x 2 lotes) de características homogéneas en cuanto a n° parto, peso vivo, producción de leche, y recuento de células somáticas (RCS). Los animales tuvieron un periodo de 1 semana de adaptación al lote, y seguidamente comenzaron los tratamientos con una duración de 8 semanas. Tras 2 semanas de adaptación al tratamiento, comenzó la fase experimental durante la que se determinó quincenalmente la evolución del peso vivo (kg); producción de leche diaria (kg/día) (Lactocorder®, WMB AG, Suiza), su composición (grasa bruta, proteína bruta, lactosa, extracto seco magro (ESM), extracto quesero (EQ), concentración de urea (mg/L), y el recuento de células somáticas (LRCS log 10³ cel/ml) (CombiFoss™ 7 DC, Foss, Dinamarca). Las variables se analizaron mediante un modelo lineal mixto (Proc. Glimmix, SAS v9.4), considerando el efecto de la covariable en el muestreo pre-experimental, el tratamiento (4 niveles: 0, 5, 10 y 15%), muestreo experimental (4 niveles) y su interacción (16 niveles) y el lote(trat). El animal fue considerado como efecto aleatorio, considerando una estructura de covarianza de simetría compuesta, para considerar la correlación de las medidas repetidas (menor AIC y BIC).

Resultados y Discusión

El efecto de la covariable fue significativo en todas las variables excepto para la grasa bruta. El muestreo fue significativo en todas las variables; mientras que el tratamiento y la interacción del tratamiento con el muestreo no fueron significativos para ninguna de las variables. Por último, el efecto lote anidado al tratamiento no resultó significativo en ningún caso excepto para el extracto quesero (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados del análisis estadístico de las variables estudiadas.

VARIABLE	MUESTREO		TRATAMIENTO		TRATAMIENTO * MUESTREO		LOTE (TRAT)		COVARIABLE	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
PESO VIVO	75,61	<0,001	0,75	0,524	1,53	0,140	0,38	0,824	1364,1	<0,001
PRODUCCION	30,42	<0,001	0,74	0,534	0,6	0,799	0,56	0,695	173,57	<0,001
GRASA BRUTA	45,55	<0,001	0,17	0,914	1,08	0,377	2,17	0,082	2,17	0,082
PROTEINA BRUTA	156,14	<0,001	0,49	0,691	0,61	0,786	0,74	0,571	92,54	<0,001
LACTOSA	9,39	<0,001	0,53	0,665	1,02	0,429	0,16	0,957	32,02	<0,001
EXTRACTO SECO MAGRO	135,45	<0,001	0,71	0,548	0,95	0,479	1,38	0,251	145,08	<0,001
EXTRACTO QUESERO	82,98	<0,001	0,07	0,974	1,06	0,397	2,53	0,049	69,92	<0,001
UREA	50,27	<0,001	0,59	0,624	0,61	0,792	1,21	0,316	112,32	<0,001
L RCS	8,86	<0,001	0,58	0,632	1,46	0,163	0,35	0,845	35,09	<0,001

Se observaron cambios significativos debido a un aumento de peso de todos los tratamientos desde el inicio hasta el final del experimento. La diferencia significativa de peso entre el tratamiento 15% y el resto de tratamientos observada en el muestreo 1, desaparece con el transcurso del experimento ($p > 0,05$) (Figura 1).

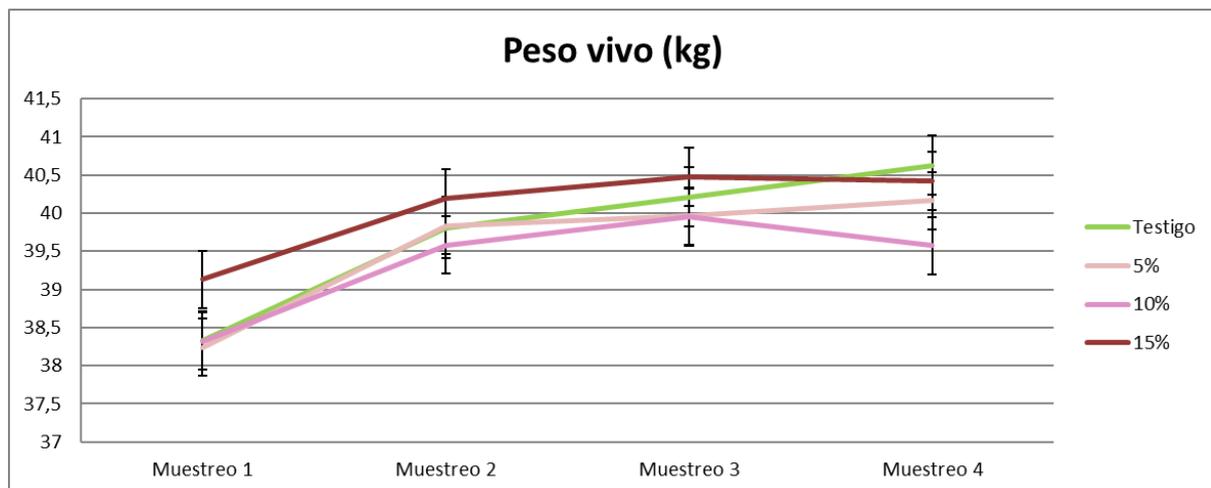


Figura 1. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable peso vivo (kg) (Ismeans \pm SE).

La producción de leche (kg/día) tuvo una caída constante y significativa a lo largo del experimento en todos los tratamientos. En el muestreo 1 se observó una diferencia significativa entre la producción de leche de los animales del tratamiento 15% de inclusión y los del 10% que se vuelve significativa y casi inexistente posteriormente. Al final del experimento la producción de todos los tratamientos se igualó ($p > 0,05$) (Figura 2).

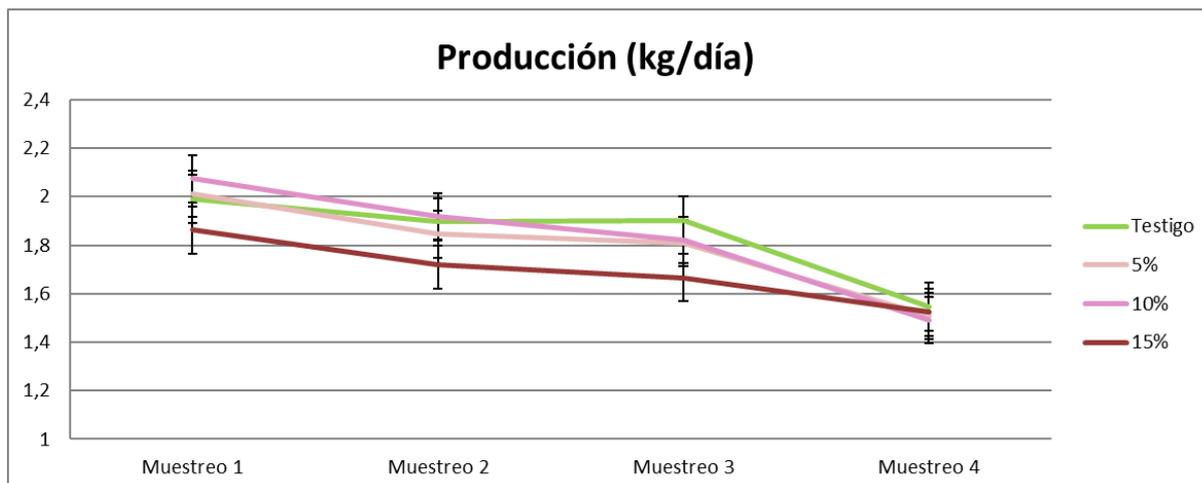


Figura 2. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable producción (kg/día) (Ismeans \pm SE).

El porcentaje de grasa en la leche aumentó de manera significativa en todos los tratamientos desde el inicio hasta el final del experimento. Las diferencias entre tratamientos no fueron significativas (Figura 3).

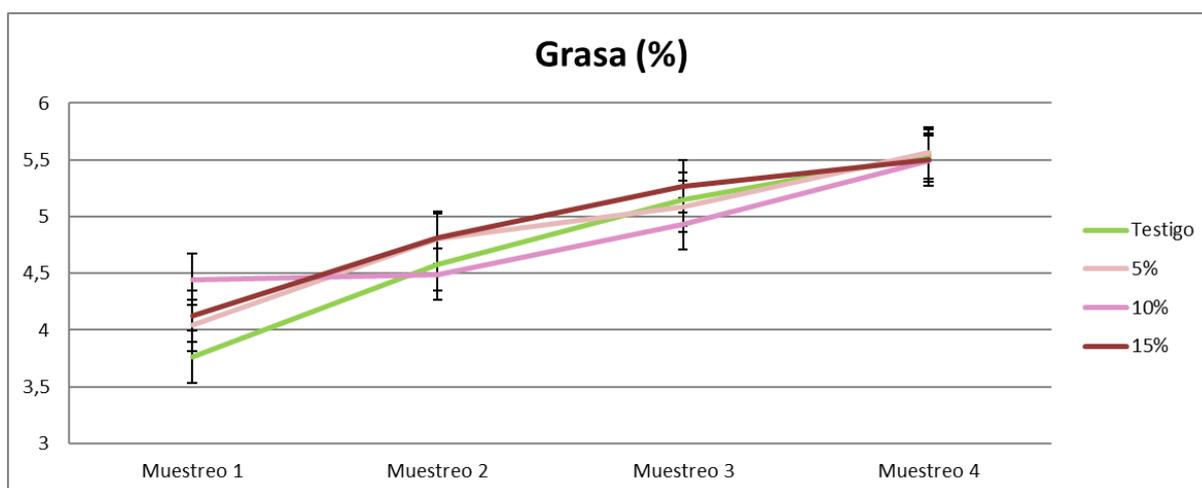


Figura 3. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable grasa (%) (Ismeans \pm SE).

Los porcentajes de proteína bruta obtenidos en los análisis de la leche tuvieron un aumento constante durante todo el experimento. En el muestreo 4, este aumento resultó significativo respecto a muestreos los muestreos anteriores. La diferencia entre tratamientos no fue significativa ($p > 0,05$) (Figura 4).

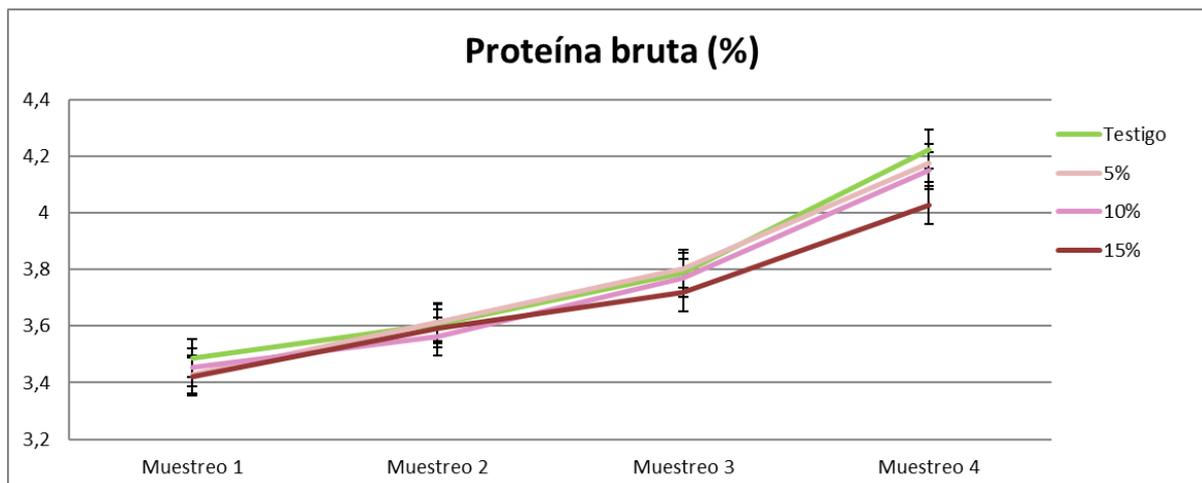


Figura 4. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable proteína bruta (%) (Ismeans \pm SE).

El porcentaje de lactosa en la leche no mostró cambios significativos entre tratamientos ($p>0,05$). La tendencia de esta variable a lo largo del experimento fue descendente, resultando esta disminución significativa en los tratamientos testigo y 15% (Figura 5).

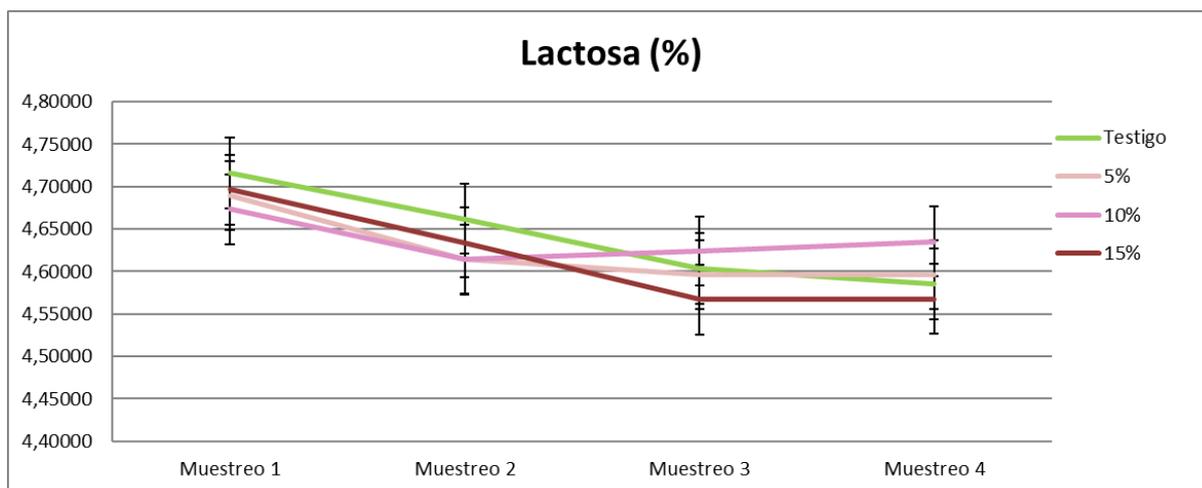


Figura 5. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable lactosa (%) (Ismeans \pm SE).

El ESM (%) de la leche fue significativamente mayor al final del experimento respecto al inicio en la producción de todos los tratamientos. No se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($p>0,05$) (Figura 6).

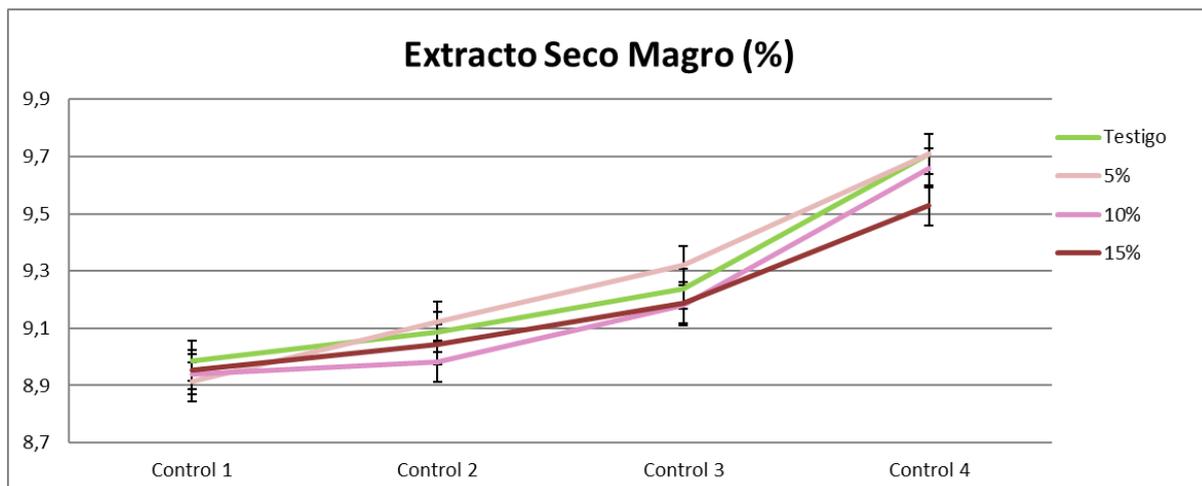


Figura 6. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable ESM (%) (lsmeans \pm SE).

El extracto quesero de la leche aumentó en el transcurso del experimento con un valor final significativamente mayor que al inicio del mismo. Las diferencias entre tratamientos no fueron significativas ($p > 0,05$) (Figura 7).

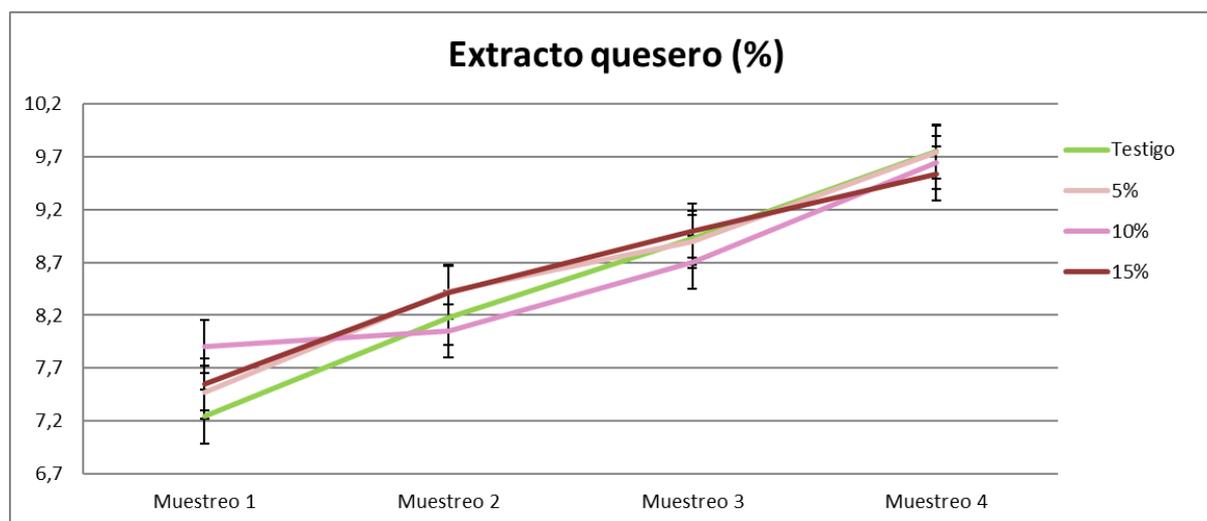


Figura 7. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable EQ (%) (lsmeans \pm SE).

El contenido de urea en leche (mg/L) tuvo fluctuaciones entre muestreos sólo significativas ($p < 0,05$) en el muestreo final. Entre tratamientos, las diferencias no fueron significativas ($p > 0,05$) (Figura 8).

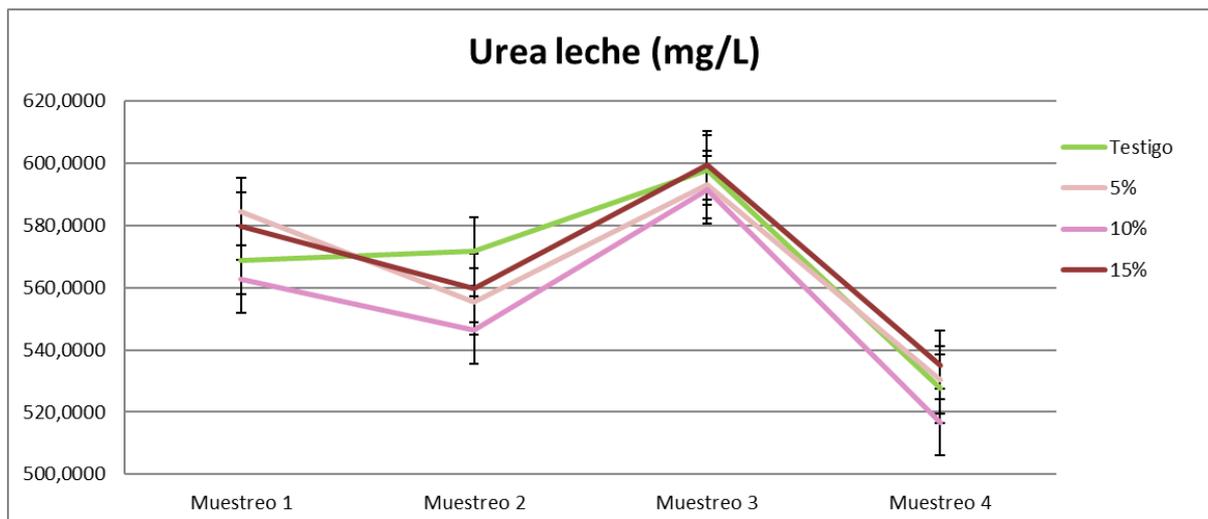


Figura 8. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable urea (mg/l) (Ismeans \pm SE).

El RCS (\log_{10}^3 cel/ml) mostró un aumento significativo entre el inicio y el final del experimento en los tratamientos testigo y 5%. Por su parte los tratamientos 10% y 15% no variaron significativamente a lo largo del experimento, siendo en el final significativamente menores a los otros tratamientos (Figura 9).

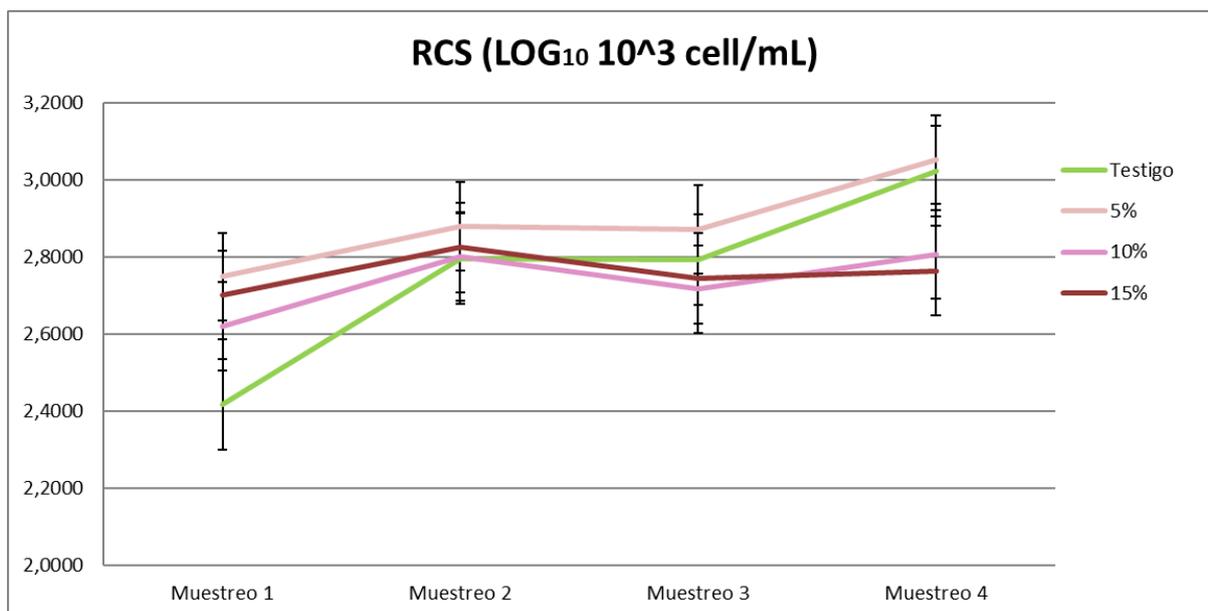


Figura 9. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable RCS (\log_{10}^3 cel/ml) (Ismeans \pm SE).

Los resultados de estudios realizados en los últimos años sobre la inclusión de subproductos ricos en polifenoles, como el subproducto de granada, en la dieta de rumiantes ya demuestran que no reduce la producción de leche ni la calidad de esta, ni de sus productos derivados (Vasta *et al.*, 2008) cuando se formula en cantidades adecuadas. Valenti *et al.* (2019) concluyeron que en ovejas de aptitud lechera la producción de leche o la condición corporal de las hembras en lactación no se ve afectada cuando ofrecían a estos animales un concentrado (50% de la ración) que incluía un 64% de subproducto de granada. Además estos mismos autores reportan una mejora en el perfil lipídico de la producción láctea

con mayor porcentaje de PUFA. Shaani *et al.* (2015) ofrecieron hasta un 8% de subproducto de granada a vacas Holstein observando mejoras en el rendimiento ECM (rendimiento de la leche corregida energéticamente), sin embargo, este porcentaje resultó excesivo para otros parámetros como el consumo de MS, y la digestibilidad proteica y de la FND. Nuestro estudio demostró que la inclusión de hasta 15% no afectó la producción de leche, el peso vivo ni la composición. Estos resultados resaltan la capacidad fisiológica de las cabras para incorporar mayores niveles de compuestos fenólicos en su dieta en comparación con otros rumiantes como reportan Ventura-Cordero *et al.* (2017).

Conclusiones

Se concluye que la inclusión del subproducto de granada ensilado en la dieta de caprino lechero de hasta un 15% de materia seca, no causa diferencias relevantes para producción lechera sobre las variables estudiadas, por lo que es una materia prima de bajo coste a considerar en la formulación de dietas.

Agradecimientos

Este estudio fue financiado por la Generalitat Valenciana (Consellería de Educación, universidades y Empleo) CIAICO/2021/301.

Bibliografía

- Benoit, M., & Mottet, A. (2023). Energy scarcity and rising cost: Towards a paradigm shift for livestock. *Agricultural Systems*, 205, 103585.
- Benton, T. G., Froggatt, A., Wellesley, L., Grafham, O., King, R., Morisetti, N., & Schröder, P. (2022). The Ukraine war and threats to food and energy security. Chatham House International Affairs Think Tank.
- Bordiga, M., Travaglia, F., Locatelli, M., Arlorio, M., & Coïsson, J. D. (2015). Spent grape pomace as a still potential by-product. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(9), 2022-2031.
- Correddu, F., Lunesu, M. F., Buffa, G., Atzori, A. S., Nudda, A., Battacone, G., & Pulina, G. (2020). Can agro-industrial by-products rich in polyphenols be advantageously used in the feeding and nutrition of dairy small ruminants. *Animals*, 10, 131.
- El-Nemr, S. E., Ismail, I. A., & Ragab, M. (1990). Chemical composition of juice and seeds of pomegranate fruit. *Molecular Nutrition Food Research*, 34(7), 601-606.
- Gullon, B., Pintado, M. E., Pérez-Álvarez, J. A., & Viuda-Martos, M. (2016). Assessment of polyphenolic profile and antibacterial activity of pomegranate peel (*Punica granatum*) flour obtained from co-product of juice extraction. *Food Control*, 59, 94-98.
- Monllor, P., Muelas, R., Roca, A., Atzori, A. S., Díaz, J. R., Sendra, E., & Romero, G. (2020). Long-term feeding of dairy goats with broccoli by-product and artichoke silages: Milk yield, quality and composition. *Animals*, 10(9), 1670.
- Shaani, Y., Eliyahu, D., Mizrahi, I., Yosef, E., Ben-Meir, Y., Nikbachat, M., Solomon, R., Mabjeesh, S. J., & Miron, J. (2016). Effect of feeding ensiled mixture of pomegranate pulp and drier feeds on digestibility and milk performance in dairy cows. *The Journal of Dairy Research*, 83(1), 35-41.
- Valenti, B., Luciano, G., Morbidini, L., Rossetti, U., Codini, M., Avondo, M., Priolo, A., Bella, M., Natalello, M., & Pauselli, M. (2019). Dietary pomegranate pulp: Effect on ewe milk quality during late lactation. *Animals*, 9, 283.
- Vasta, V., Nudda, A., Cannas, A., Lanza, M., & Priolo, A. (2008). Alternative feed resources and their effects on the quality of meat and milk from small ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 147(1-3), 223-246.



Ventura-Cordero, J., Sandoval-Castro, C. A., Torres-Acosta, J. F. J., & Capetillo-Leal, C. M. (2017). Do goats have a salivary constitutive response to tannins? *Journal of Applied Animal Research*, 45, 29-34.

La inclusión de hasta un 12% de orujo de uva tinta en la ración, no causa efecto sobre índices productivos, calidad de la leche y RCS en caprino lechero.

M. Gálvez López¹, G. Romero¹, E. Pérez¹, R. Muelas¹, N. Fernández², J. R. Díaz¹

¹Instituto de Investigación Agroalimentaria y Agroambiental (CIAGRO-UMH), Universidad Miguel Hernández de Elche. Carretera de Beniel, km 3.2, 03312 Orihuela (Alicante). España.

²Instituto de Ciencia y Tecnología Animal. Universidad Politécnica de Valencia. C/ Vera s/n. Valencia. España.
e-mail: marinagalvezl@umh.es

Resumen

El objetivo de este experimento fue estudiar el efecto de la inclusión de diferentes proporciones de ensilado de orujo de uva tinta en la dieta de cabras lecheras sobre el peso vivo, la producción diaria individual de leche y su macro-composición y el RCS. Se estudió el efecto de la inclusión de 0 (testigo), 6, 12 y 18% de subproducto (sobre materia seca) en dietas isoenergéticas e isoproteicas. Se seleccionaron 80 cabras las cuales se distribuyeron en 8 grupos de 10 animales cada uno (4 tratamientos x 2 lotes) con características fisiológicas homogéneas. Tras 1 semana de adaptación al lote, se realizó un muestreo para obtener los valores pre-experimentales y comenzaron los tratamientos con una duración de 8 semanas. Después de 2 semanas de adaptación a los tratamientos, se determinó quincenalmente la evolución del peso vivo y la producción diaria de leche (Lactocorder®, WMB AG, Suiza), sobre la que se analizó la composición de la leche (grasa, proteína bruta, extracto seco magro (ESM), extracto quesero (EQ), lactosa, urea) y el RCS (CombiFoss™ 7 DC, Foss, Dinamarca). Las variables se analizaron utilizando un modelo lineal mixto (Proc. Glimmix, SAS v9.4), considerando el efecto de la covariable en el muestreo pre-experimental, el tratamiento (4 niveles), el muestreo experimental (4 niveles) y su interacción (16 niveles), el lote anidado a tratamiento y el efecto aleatorio del animal. Se observó que el efecto de la covariable fue significativo en todas las variables excepto para grasa y EQ ($P>0,05$). El muestreo fue significativo en todas las variables excepto para la producción de leche y la lactosa ($P>0,05$), mientras que el tratamiento solo fue significativo para el contenido de urea ($P<0,05$), donde se observó una reducción en los tratamientos con mayor inclusión de subproducto. Se observó un aumento en el peso vivo y la producción de leche en los lotes de 6% y 12% a medida que avanzaba el experimento, mientras que la grasa, proteína, ESM y EQ disminuyeron con el aumento en la producción. El RCS no varió significativamente a lo largo del experimento. Se observó una tendencia a la disminución de la producción en el lote con 18% de inclusión de subproducto hacia el final del experimento. En conclusión, el orujo de uva tinta puede ser incluido en la dieta de las cabras lecheras hasta un 12% MS sin causar diferencias relevantes en los índices productivos y calidad de su leche a corto plazo, por lo que es una materia prima de bajo coste a considerar en la formulación de dietas. Se necesitan experimentos a largo plazo para completar el estudio de estas y otras variables y conocer los efectos que pueden aparecer durante una lactación completa.

Palabras clave: Economía circular, sostenible, nutrición animal, subproducto, propiedades funcionales.

The inclusion of up to 12% red grape pomace in the diet does not affect productive performance, milk quality, or SCC in dairy goats.

Abstract

This experiment aimed to study the effect of the inclusion of different proportions of the red grape pomace by-product silage in the diet of goats on body weight, individual daily milk production and its macro-composition and SCC. The effect of the inclusion of 0 (control), 6, 12 and 18% of by-product (DM) into isoenergetic and isoproteic diets was studied. 80 goats were selected and distributed into 8 groups of 10 animals each (4 treatments x 2 plots) with homogeneous physiological characteristics. After a 1-week adaptation period to the group, completed with a pre-experimental sampling, the treatments began and lasted for 8 weeks. Following 2 weeks of adaptation to the

treatments were done fortnightly: body weight, daily milk production (Lactocorder®, WMB AG, Switzerland), milk composition (fat, crude protein, non-fat dry matter content (NFDm), useful dry matter content (UDM), lactose, urea) and SCC (CombiFoss™ 7 DC, Foss, Denmark) were analysed using a mixed linear model (Proc. Glimmix, SAS v9.4), considering the effect of the covariate in the pre-experimental sampling, the treatment (4 levels), experimental sampling (4 levels) and their interaction (16 levels), and the flock nested to the treatment. The goat was considered a random effect. It was observed that the covariate effect was significant in all variables except for fat and UDM ($P > 0,05$). Sampling was significant in all variables except for milk production and lactose ($P > 0,05$), while treatment was only significant for urea content ($P < 0,05$) where a reduction was observed in the higher inclusion of by-product treatments. An increase in body weight and milk production was observed in the 6% and 12% plots as the experiment progressed, while fat, protein, NFDm, and UDM decreased with the increase in production. SCC did not vary significantly throughout the experiment. A trend was observed to decrease production at 18% by-product inclusion at the end of the experiment. It was concluded that red grape pomace can be included in the diet of dairy goats at up to 12% DM without causing significant differences in productive indices and milk quality in the short term, making it a low-cost feed ingredient to consider in diet formulation. Long-term experiments are needed to complete the study of these and other variables and to understand the effects that may emerge over an entire lactation period.

Keywords: circular economy, sustainable, animal feed, by-product, functional properties.

Introducción

La valorización de subproductos agroindustriales para su aprovechamiento en alimentación animal supone una alternativa útil que crea la oportunidad de optimizar la sostenibilidad de la cadena agroalimentaria, mediante la recirculación de nutrientes. Esto implica una disminución del impacto ambiental del sector agropecuario a la vez que supone un abaratamiento de los costes de producción y la aportación de compuestos bioactivos a los animales (Benton *et al.*, 2022). Este recurso crea además una solución que cobra gran relevancia en el contexto actual, donde la tendencia hacia un desarrollo sostenible es de obligado cumplimiento, y se apuesta por una economía circular que permita abastecer personas y animales con recursos de kilómetro cero y donde el gasto energético resulte eficiente. La actual escasez mundial de energía está provocando un fuerte aumento de su precio, lo que incide indirectamente en el precio de los piensos. Por tanto, gran parte de la producción animal que depende de cereales, legumbres y forrajes cultivados, está experimentando una fuerte pérdida de competitividad (Benoit y Mottet, 2023).

El papel crucial desempeñado por el sector caprino lechero en la producción de alimentos naturales, de alto valor biológico, calidad y seguros para el consumo humano se destaca en este marco de promoción de la economía circular y mejora medioambiental, dada su capacidad de aprovechar los subproductos fibrosos de la industria agroalimentaria y reducir la huella ambiental. La leche de cabra es un alimento completo y altamente nutritivo, pues es una leche rica en sólidos totales, con la que además se obtiene un alto rendimiento en la fabricación de derivados lácteos (Raynal-Ljutovac *et al.*, 2008). Durante los últimos años en los países desarrollados, la leche de cabra y sus derivados ha ganado una percepción como un alimento funcional con muchos beneficios nutricionales y con una repercusión positiva para la salud por lo que su demanda está en constante aumento. En Europa, se localiza el 16% de la producción mundial, siendo España el segundo productor de leche de cabra generando un 22% de la producción (535,7 miles de toneladas) (Ruiz-Morales *et al.*, 2019), y la raza Murciano-Granadina la que aporta el mayor censo y producción de leche, estando ampliamente distribuida por la geografía nacional.

El principal subproducto que se genera en la elaboración de vino es el orujo de uva, el cual consiste en una mezcla heterogénea de semillas, hollejos, restos de pulpa y raspón, pudiendo representar hasta un 25% del peso total de la uva procesada (Bordiga *et al.*, 2019). Este subproducto es cuantitativamente muy importante tanto en la Comunidad Valenciana (3^{er} CCAA productora de vino) como en toda España (3^{er} productor mundial) donde se generan 1,4 millones de toneladas anuales. El orujo adquiere una relevancia significativa en términos de uso para alimentación animal, dado que muchas de las sustancias bioactivas presentes en la uva con carácter funcional beneficioso, permanecen en este subproducto sin ser transferidas al vino (Bordiga *et al.*, 2015). Su conservación mediante ensilado permite su

disponibilidad entre campañas y su valorización para alimentación animal de forma ininterrumpida a lo largo del año (Mouhssine *et al.*, 2023).

El objetivo de este experimento fue estudiar el efecto de la inclusión de diferentes proporciones del subproducto orujo de uva tinta ensilado en la dieta del ganado caprino sobre la producción diaria de leche individual y su macro-composición, el recuento de células somáticas (RCS), así como el efecto en el peso vivo de los animales.

Materiales y Métodos

Se desarrolló un experimento en el que se testó la inclusión de orujo de uva tinta ensilado en la dieta del ganado caprino en las siguientes proporciones: 6, 12, 18% MS de la dieta. Las dietas fueron isoenergéticas e isoproteicas y se compararon con una dieta testigo convencional que incluía heno de alfalfa y pienso compuesto concentrado (0% subproducto). Ocho semanas después del parto, se realizó un muestreo preexperimental en un lote de 120 animales que estaban alimentados con la dieta convencional de las que se seleccionaron 80 cabras que fueron divididas en 8 grupos de 10 animales cada uno (4 tratamientos x 2 lotes) de características homogéneas en cuanto a número de parto, peso vivo, producción de leche, y recuento de células somáticas (RCS). Los animales tuvieron un periodo de 1 semana de adaptación al lote, y seguidamente comenzaron los tratamientos con una duración de 8 semanas. Tras 2 semanas de adaptación al tratamiento, comenzó la fase experimental durante la que se determinó quincenalmente la evolución del peso vivo (kg); producción de leche diaria (kg/día) (Lactocorder®, WMB AG, Suiza), su composición (grasa bruta, proteína bruta, lactosa, extracto seco magro (ESM), extracto quesero (EQ), concentración de urea (mg/L), y el recuento de células somáticas (LRCS log 10³ cel/ml) (CombiFoss™ 7 DC, Foss, Dinamarca). Las variables se analizaron mediante un modelo lineal mixto (Proc. Glimmix, SAS v9.4), considerando el efecto de la covariable en el muestreo pre-experimental, el tratamiento (4 niveles), muestreo experimental (4 niveles) y su interacción (16 niveles) y el lote anidado a tratamiento. El animal fue considerado como efecto aleatorio, considerando una estructura de covarianza de simetría compuesta, para considerar la correlación de las medidas repetidas (menor AIC y BIC).

Resultados y Discusión

El efecto de la covariable fue significativo en todas las variables excepto para la grasa bruta y el extracto quesero. El muestreo fue significativo en todas las variables, excepto en la producción y el porcentaje de lactosa; mientras que el tratamiento solo fue significativo para la concentración de urea. La interacción del tratamiento con el muestreo sólo resultó significativa para la variable peso vivo, mientras que el efecto lote anidado al tratamiento no resultó significativo en ningún caso (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados del análisis estadístico de las variables estudiadas.

VARIABLE	MUESTREO		TRATAMIENTO		TRATAMIENTO *MUESTREO		LOTE(TRAT)		COVARIABLE	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
PESO VIVO	19,87	0,001	0,57	0,6386	3,37	0,0007	0,61	0,6541	1087,91	0,001
PRODUCCIÓN	2,45	0,0646	0,09	0,9672	0,87	0,5564	0,22	0,9245	191,96	0,001
GRASA BRUTA	9,77	0,001	0,48	0,6963	1,45	0,1732	0,99	0,4186	2,26	0,1378
PROTEÍNA BRUTA	73,42	0,001	1,62	0,1934	0,64	0,759	1,15	0,34	19,38	0,001
LACTOSA	0,44	0,7261	1,52	0,2172	1,23	0,2789	0,98	0,4227	50,56	0,001
ESM	111,1	0,001	0,73	0,5408	0,54	0,8406	0,72	0,5828	37,28	0,001
EQ	24,93	0,001	0,91	0,4409	1,6	0,1209	1,2	0,3185	3,99	0,0502
UREA	34,88	0,001	3,28	0,0266	1,64	0,1066	0,6	0,6665	43,4	0,001
LRCS	2,67	0,0484	2	0,1231	1,14	0,3377	0,21	0,9318	20,39	0,001

El peso vivo de los animales pertenecientes a los tratamientos testigo y con inclusión de 6% de uva tinta no varió significativamente a lo largo del experimento. En los tratamientos con un 12% y 18% de inclusión el peso vivo se vio incrementado significativamente desde el inicio al final del experimento (figura 1).

La producción de leche (kg/día) no mostró cambios significativos entre el inicio y el final del experimento en ninguno de los tratamientos. Se observaron fluctuaciones en la producción a lo largo de los muestreos, y al final del experimento el tratamiento 18% presentó una tendencia al descenso, mientras que en el resto de tratamientos la tendencia fue al incremento, indicado por la interacción significativa (figura 2).

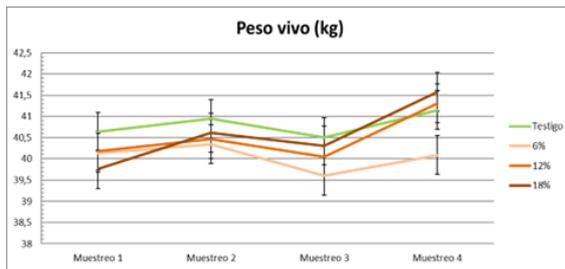


Figura 1. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable peso vivo (kg) (lsmeans \pm SE).

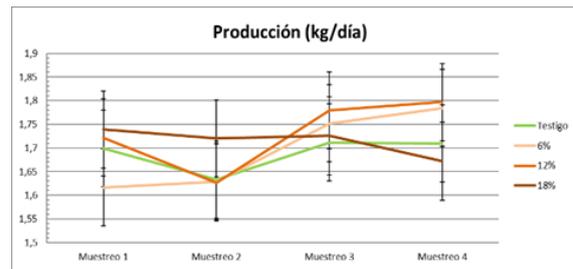


Figura 2. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable producción (kg/día) (lsmeans \pm SE).

El porcentaje de grasa y de proteína de la leche no mostraron diferencias significativas debidas al tratamiento, observándose un descenso significativo con el progreso del experimento en todos los tratamientos (Figuras 3 y 4). Así mismo, se observa que los muestreos con descenso de producción coinciden con incrementos de grasa y viceversa.

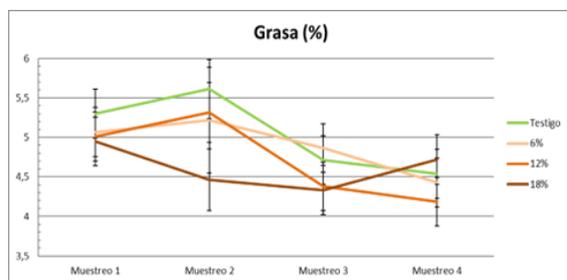


Figura 3. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable grasa (%) (lsmeans \pm SE).

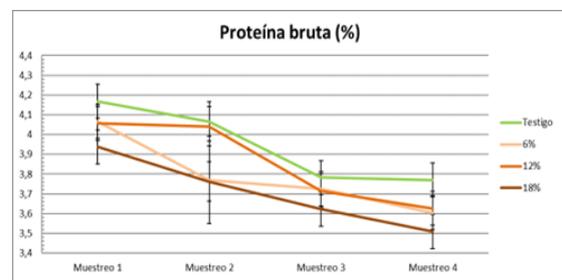


Figura 4. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable proteína bruta (%) (lsmeans \pm SE).

El ESM (%) de la leche fue significativamente menor al final del experimento respecto al inicio en la producción de todos los tratamientos (figura 5).

El EQ de producción tratamiento 18% no presentó cambios significativos entre el inicio y el final del experimento, mientras que el resto de tratamientos presentaron valores significativamente menores al final (figura 6).

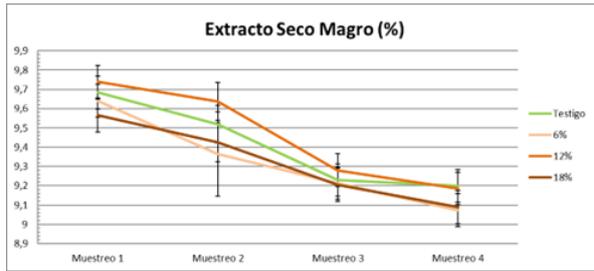


Figura 5. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable ESM (%) (lsmeans \pm SE).

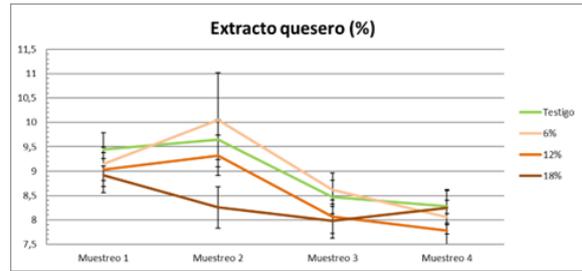


Figura 6. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable EQ (%) (lsmeans \pm SE).

El porcentaje de lactosa no mostró cambios significativos entre el inicio y el final del experimento en la producción de leche de ninguno de los tratamientos. Se observaron fluctuaciones significativas de lactosa en el muestreo 2, con diferencias entre tratamientos, coincidiendo con las variaciones en la producción de leche observadas durante este mismo muestreo (Figura 7).

El contenido de urea en la leche fue significativamente menor al final del experimento respecto al inicio en la producción de todos los tratamientos. Los tratamientos con mayor inclusión de uva tinta (12% y 18%) mostraron valores más bajos (Figura 8) desde el primer muestreo, mientras que no se observaron diferencias significativas en el muestreo pre-experimental (covariable) $p < 0,01$ (Tabla 1).

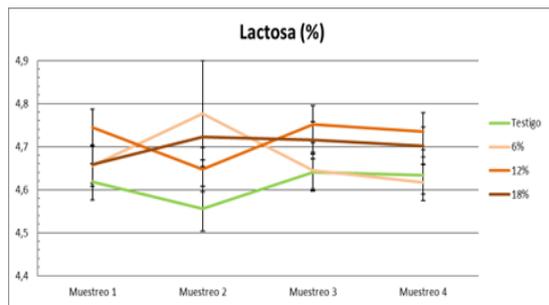


Figura 7. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable lactosa (%) (lsmeans \pm SE).

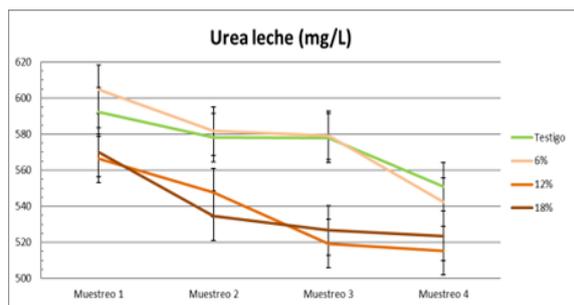


Figura 8. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable urea (mg/l) (lsmeans \pm SE).

El RCS ($\log 10^3$ cel/ml) no mostró cambios significativos entre el inicio y el final del período de estudio, excepto en el tratamiento del 18%, donde disminuyó significativamente al final del experimento (Figura 9). Se observaron valores más bajos en los tratamientos con mayor inclusión del subproducto desde el primer muestreo, mientras que no se observaron diferencias significativas en el muestreo pre-experimental (covariable) $p < 0,01$ (Tabla 1).

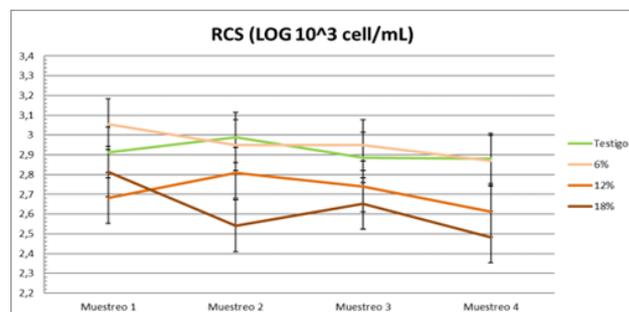


Figura 9. Efecto del tratamiento a lo largo del experimento en la variable RCS ($\log 10^3$ cel/ml) (lsmeans \pm SE).

Los resultados de estudios realizados en los últimos años sobre la inclusión de subproductos ricos en polifenoles, como el orujo de uva, en la dieta de rumiantes ya demuestran que este subproducto no reduce la producción de leche ni la calidad de esta, ni de sus productos derivados (Vasta *et al.*, 2008), cuando se formula en cantidades adecuadas. Manso *et al.* (2016) concluyeron que en ovejas, la especie más estudiada en este sentido, la producción de leche o la condición corporal de las hembras en lactación no se ve afectada cuando la cantidad incluida en su ración es inferior al 5%. Por otro lado, Nudda *et al.* (2019) también informaron que la adición de pequeñas cantidades (5%) de orujo de uva a una dieta estándar en ovejas lecheras resultó en una disminución en la ingesta de materia seca y un aumento en la producción de leche, sin afectar el peso vivo ni la condición corporal. La reducción de urea en la leche concuerda con lo observado por Monllor *et al.* (2020) al incluir subproductos de alcachofa en la dieta de cabras lecheras, lo que se explicó por la alta cantidad de compuestos polifenólicos de esta, que mejora la eficiencia de la absorción proteica (Alipour y Rouzbehan, 2010). Nuestro estudio demostró que la inclusión del 6% y 12% no afectó la producción de leche, el peso vivo ni la composición, mientras que la inclusión del 18% mostró una tendencia hacia una disminución en la producción de leche a lo largo del tiempo, lo que posiblemente indica una dosis excesiva. Estos resultados resaltan la capacidad fisiológica de las cabras para incorporar mayores niveles de compuestos fenólicos en su dieta en comparación con otros rumiantes, como mencionan Makkar (2003), Frutos (2004), y Patra y Saxena (2011).

Conclusiones

Se concluye que la inclusión de ensilado del subproducto de orujo de uva tinta de vinificación en la dieta de caprino lechero de hasta un 12% de materia seca, no causa diferencias relevantes para producción lechera sobre las variables estudiadas, por lo que es una materia prima de bajo coste a considerar en la formulación de dietas. Este trabajo se completará con un estudio durante una lactación completa, con objeto de conocer los efectos que puedan aparecer a largo plazo, tanto productivos como sobre el estado fisiológico del animal y propiedades tecnológicas de la leche.

Agradecimientos

Este estudio es parte del proyecto PID2021-122962OB-C31, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, UE.

Bibliografía

- Alipour, D., Rouzbehan, Y. (2010). Effects of several levels of extracted tannin from grape pomace on intestinal digestibility of soybean meal. *Livestock Science*, 128(1), 87-91.
- Benoit, M., and Mottet, A. (2023). Energy scarcity and rising cost: Towards a paradigm shift for livestock. *Agricultural Systems*, 205, 103585.
- Benton, T. G., Froggatt, A., Wellesley, L., Grafham, O., King, R., Morisetti, N., Schröder, P. (2022). The Ukraine war and threats to food and energy security. Chatham House International Affairs Think Tank, 2022-2004.
- Bordiga, M., Travaglia, F., Arlorio, M. (2019). Valorisation of grape pomace: an approach that is increasingly reaching its maturity - a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(4), 933-942.
- Bordiga, M., Travaglia, F., Locatelli, M., Arlorio, M., Coisson, J. D. (2015). Spent grape pomace as a still potential by-product. *International journal of food science and technology*, 50(9), 2022-2031.
- Frutos P., Hervás G., Giráldez F. J., Mantecón A. R. (2004). Review. Tannins and ruminant nutrition. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2(2), 191-202.
- Makkar, H.P.S. 2003. Effects and fate of tannins in ruminant animals, adaptation to tannins and strategies to overcome detrimental effects of feeding tannin rich feeds. *Small Rumin Res.*, 49.

- Manso, T., Gallardo, B., Salva, A., Guerra-Rivas, C., Mantecón, Á. R., Lavín, P., De La Fuente, M. (2016). Influence of dietary grape pomace combined with linseed oil on fatty acid profile and milk composition. *Journal of Dairy Science*, 99(2), 1111–1120.
- Monllor, P., Romero, G., Sendra, E., Atzori, A. S., & Díaz, J. R. (2020). Short-Term Effect of the Inclusion of Silage Artichoke By-Products in Diets of Dairy Goats on Milk Quality. *Animals*, 10(2), 339.
- Mouhssine, A., Nowicka, M., Gálvez, M., Ilea, M.I.D., Roca, A., Díaz, J.R., Romero, G. (2023) Evolution of red grape pomace quality during ensiling. IV International University Congress on Agri-Food Innovation and Sustainability (CUIISA).
- Nudda, A., Buffa, G., Atzori, A. S., Cappai, M. G., Caboni, P., Fais, G., & Pulina, G. (2019). Small amounts of agro-industrial byproducts in dairy ewes diets affects milk production traits and hematological parameters. *Animal Feed Science and Technology*, 251, 76-85.
- Patra, A.K., Saxena, J. (2011). Exploitation of dietary tannins to improve rumen metabolism and ruminant nutrition. *J. Sci Food Agric.*, 91: 24-37.
- Raynal-Ljutovac, K., Lagriffoul, G., Paccard, P., Guillet, I., & Chilliard, Y. (2008). Composition of goat and sheep milk products: An update. *Small Ruminant Research*, 79(1), 57-72. International University Congress on Agri-Food Innovation and Sustainability, session 2, 2023.
- Ruiz-Morales, F. A., Castel Genís, J. M., y Guerrero, Y. M. (2019). Current status, challenges and the way forward for dairy goat production in Europe. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 32(8), 1256–1265.
- Vasta, V., Nudda, A., Cannas, A., Lanza, M., Priolo, A. (2008). Alternative feed resources and their effects on the quality of meat and milk from small ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 147(1-3), 223-246.

Estudio de Marcadores Plasmáticos Relacionados con el Bienestar Animal en Conejos

F. M. Silfa¹, M.L. García¹, M. J. Argente¹

¹ Instituto Universitario de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental. Universidad Miguel Hernández de Elche. Ctra. de Beniel Km 3,2. 03312. Orihuela. España, e-mail: Fabysilfa@gmail.com

Resumen

Se encuentra en curso un experimento de selección divergente por variabilidad del tamaño de camada en conejo en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH) que en la actualidad se encuentra en la generación diecisiete. Nuestra hipótesis de trabajo es que la línea con menor variabilidad en el tamaño de camada (línea low) tiene una mayor adaptación a los cambios ambientales porque es menos sensible al estrés y a las enfermedades, lo que se traduce en una respuesta inmunitaria superior en comparación con la línea high. Una menor sensibilidad al estrés y a las enfermedades está directamente relacionada con un mayor bienestar del animal; por ello, los animales de la línea low tendrían un mayor bienestar animal. En este estudio se analizaron marcadores plasmáticos relacionados con la respuesta inmunitaria del conejo con el fin de mejorar la comprensión de su estado de bienestar. El objetivo del estudio fue caracterizar los perfiles hematológicos de las dos líneas seleccionadas divergentemente por variabilidad del tamaño de camada (líneas low y high), y evaluar la respuesta inmunitaria de ambas líneas en momentos críticos de su vida reproductiva como es la primera monta y el primer parto. Se realizó una extracción de sangre al inicio de la vida reproductiva (primera monta) a 61 hembras de la línea low y 79 hembras de la línea high, y a 15 machos de la línea low y 12 machos de la línea high. Se pesaron todos los animales y se volvió a realizar una segunda extracción en las hembras tras el primer parto. Los resultados revelaron diferencias significativas entre las líneas. La línea high presentó un mayor recuento de glóbulos blancos y un menor porcentaje de neutrófilos en comparación con la línea low. Después del parto, las hembras experimentaron una reducción en el recuento de glóbulos rojos y un aumento en los glóbulos blancos y neutrófilos. También se observaron diferencias según el sexo, los machos mostrando valores más altos en el recuento de glóbulos rojos, hemoglobina, hematocrito, glóbulos blancos y porcentaje de linfocitos en comparación con las hembras. La toma de datos se llevó a cabo entre el otoño y la primavera. Respecto a la estación, la primavera presentó un menor recuento de glóbulos rojos, hemoglobina y hematocrito fueron menores y un mayor porcentaje de monocitos que el otoño y el invierno. En conclusión, un menor recuento de glóbulos blancos y un mayor porcentaje de neutrófilos en la línea low sugieren que la selección por homogeneidad en el tamaño de la camada se acompaña de cambios en la respuesta inmunológica que ayudan a la hembra a ser menos susceptible a infecciones bacterianas o virales oportunistas, por lo que el porcentaje de neutrófilos podría ser un biomarcador del bienestar del animal.

Palabras clave: Conejos, Respuesta Inmunitaria, Selección Divergente, Bienestar Animal, Variabilidad en Tamaño de Camada.

Study of Plasma Markers Related to Animal Welfare in Rabbits

Abstract

A divergent selection experiment for litter size variability was carried out in rabbits at the Polytechnic School of Orihuela (EPSO) of the Miguel Hernández University of Elche (UMH), which is currently in its seventeenth generation. Our working hypothesis is that the line with less variability in litter size (low line) is more adaptable to environmental changes because it is less sensitive to stress and disease, which translates into a superior immune response compared to the high line. A lower sensitivity to stress and disease is directly related to a higher animal welfare; therefore, animals of the low line have a higher animal welfare. In this study, plasma markers related to the rabbit's immune response will be analyzed to improve the understanding of animal welfare. The aim of the study was to characterize the hematological profiles of the two lines selected divergently for litter size variability in rabbits in our experiment (low and high lines), and to evaluate the immune response of both lines at critical times in their reproductive life such as first mating and first parturition. A blood sample

was taken at the beginning of the reproductive life (first mating) from sixty-one females of the low line and seventy-nine females of the high line, and from fifteen males of the low line and twelve males of the high line. All animals were weighed, and a second extraction was performed again on the females after the first calving. The results revealed significant differences between the lines. The high line had a higher white blood cell count and a lower percentage of neutrophils compared to the low line. After parturition, the females experienced a reduction in red blood cell count and an increase in white blood cells and neutrophils. Sex differences were also observed, with males showing higher values for red blood cell count, hemoglobin, hematocrit, white blood cell and lymphocyte percentage compared to females. Seasonally, spring had lower red blood cell counts, lower hemoglobin and hematocrit and higher monocyte percentage than autumn and winter. In conclusion, a lower white blood cell counts and a higher percentage of neutrophils in the low line suggest that selection for homogeneity in litter size is accompanied by changes in the immune response that help the female to be less susceptible to opportunistic bacterial or viral infections, so that the percentage of neutrophils could be a biomarker of the animal's welfare.

Keywords: Rabbits, Immune Response, Divergent Selection, Animal Welfare, Litter Size Variability.

Introducción

La cría de conejos ha adquirido un creciente desarrollo como especie pecuaria en los últimos años, destacando su versatilidad tanto para la producción de carne de alto valor nutricional y bajo contenido en grasas saturadas (Piles et al. (2017) como para la obtención de piel y pelo o para la repoblación cinegética (García y Argente, 2021), e incluso para su empleo como modelo experimental en una amplia variedad de campos incluyendo la ganadería y la biomedicina (Cunha et al., 2019). Sin embargo, esta especie se utiliza principalmente para la producción de carne. La producción de carne de conejo se basa principalmente en un sistema de producción intensivo con líneas altamente especializadas, y con una organización similar a la producción de carne de cerdo y de aves. El progreso genético conseguido en estas líneas ha ido acompañado de una disminución de la robustez y resiliencia de los animales (Knap, 2009). Esto puede suponer un problema en los sistemas intensivos con animales altamente productivos, que pueden ver mermada su capacidad para regular su equilibrio homeostático, lo que provocaría patologías y reduciría el bienestar animal (Rauw, 2009). En este escenario, la industria ganadera está cada vez más interesada en tener animales resilientes con un mayor bienestar animal (Brito et al., 2020).

Entre los indicadores que se pueden emplear para medir el bienestar animal, los patológicos como la incidencia de enfermedades o lesiones pueden ser útiles y revelar problemas de salud subyacentes (Broom, 1993). Por lo que el sistema inmunológico es esencial para la defensa del animal contra patógenos y clave para mantener su bienestar. En la respuesta inmunológica interviene la inmunidad innata y adquirida. La inmunidad innata es la primera línea de defensa y actúa de manera rápida y no específica. Este sistema incluye células como los macrófagos y neutrófilos, que fagocitan patógenos, y el sistema del complemento, que ayuda a destruir microorganismos invasores (Medzhitov & Janeway, 2000). La inmunidad adquirida es más específica y se desarrolla tras la exposición a un patógeno, creando una memoria inmunológica que mejora la respuesta en exposiciones futuras (Janeway et al., 2001). Esta inmunidad involucra principalmente a los linfocitos T y B, que se encargan de reconocer y neutralizar de manera específica a los patógenos. Los marcadores plasmáticos, como las citocinas y las proteínas de fase aguda, son indicadores clave del estado del sistema inmunológico y de la salud general del conejo, ya que reflejan la activación de la respuesta inmune frente a infecciones o situaciones de estrés (Murphy et al., 2012). Estos marcadores incluyen citocinas proinflamatorias como la Interleucina-1 (IL-1), el Factor de Necrosis Tumoral alfa (TNF- α), y la Interleucina-6 (IL-6) (García de Lorenzo y Mateos et al., 2000). La identificación y monitoreo de estos marcadores permiten una mejor comprensión de cómo los conejos responden al estrés y a las infecciones, y son fundamentales para mejorar las prácticas de manejo y bienestar.

En la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), se está llevado a cabo un experimento de selección divergente en conejos por variabilidad del tamaño de camada (Blasco et al., 2017) que en la actualidad se encuentra en la generación diecisiete. Argente et al. (2019) observaron que la línea seleccionada para reducir la variabilidad en el tamaño de camada (línea low) era más resiliente al estrés, y por tanto tenía un mayor bienestar, que la línea high;

ya que se adaptaba mejor a los cambios ambientales. Nuestra hipótesis de trabajo es que la línea seleccionada para disminuir la variabilidad en el tamaño de la camada (línea low) presenta una mejor respuesta inmunitaria frente a enfermedades, en comparación con la línea seleccionada para aumentar la variabilidad (línea high).

El objetivo del estudio fue caracterizar los perfiles hematológicos de las dos líneas seleccionadas divergentemente por variabilidad del tamaño de camada en conejo de nuestro experimento (líneas low y high), y evaluar la respuesta inmunitaria de ambas líneas en momentos críticos de su vida reproductiva como es la primera monta y el primer parto, con el fin de identificar potenciales mecanismos subyacentes que contribuyan a la variabilidad en el tamaño de la camada.

Materiales y Métodos

Se utilizaron 167 conejos, incluyendo 61 hembras de la línea low, 79 hembras de la línea high, 15 machos de la línea low y 12 machos de la línea high pertenecientes a la decimoséptima generación de nuestro experimento de selección divergente por variabilidad del tamaño de la camada. Las líneas low y high se seleccionaron para disminuir e incrementar la varianza ambiental del tamaño de camada. La varianza ambiental del tamaño se midió como la varianza fenotípica del tamaño de camada dentro de hembra después de corregir éste por el orden de parto-lactación (primer parto, lactante y no lactantes) y el año-estación. Ambas líneas se mantuvieron bajo condiciones idénticas de ambiente, manejo y alimentación, lo que aseguró que las diferencias observadas entre líneas fueran atribuibles diferencias genéticas. Se extrajo una muestra de sangre en todos los animales al inicio de su vida productiva, y en el caso de las hembras, se realizó una segunda extracción después de su primer parto. Las extracciones se efectuaron a través de la vena central de la oreja utilizando una aguja de calibre 18-22 pulgadas. Cada muestra se etiquetó cuidadosamente y fue transportada al laboratorio para su análisis en el analizador automático hematológico (Abacus vet 5).

Las variables analizadas en este trabajo fueron: recuento de glóbulos rojos (RBC, $10^{12}/l$), hemoglobina (HGB, g/dl), hematocrito (HCT, %), recuento de glóbulos blanco (WBC, $10^9/l$), porcentaje de linfocitos (%), porcentaje de monocitos (%), porcentaje de neutrófilos (%), porcentaje de eosinófilos (%), porcentaje de basófilos (%), recuento de plaquetas (PLT, $10^9/l$), ratio neutrófilos/linfocitos, ratio de monocitos/linfocitos, peso (gramos).

El modelo utilizado para analizar las variables objeto de este trabajo fue:

$$Y_{ijklm} = \text{Lin}_i + \text{Mom}_j + \text{Sex}_k + \text{Est}_t + e_{ijklm}$$

Donde:

- Y_{ijklm} : Representa la variable dependiente objeto de estudio.
- Lin_i : Efecto de la línea (con dos niveles: animales de la línea low y de la línea high).
- Mom_j : Efecto del momento de la extracción, con dos niveles: primera monta y primer parto.
- Sex_k : Efecto del sexo, con dos niveles: hembras y machos.
- Est_t : Efecto de la estación, con tres niveles: otoño, primavera e invierno.
- e_{ijklm} error del modelo.

El análisis estadístico se realizó utilizando el programa R (versión 4-2-2).

Resultados y Discusión

La tabla 1 muestra el análisis descriptivo de los parámetros sanguíneos del hemograma y del peso en la población de conejos de nuestro experimento. Los valores medios observados para la población de glóbulos rojos, la hemoglobina, el hematocrito, el recuento de plaquetas, el recuento de glóbulos blancos, y los porcentajes de linfocitos, monocitos, neutrófilos, eosinófilos y basófilos están dentro del rango de valores encontrados en la raza Nueva Zelanda (Weisbroth et al., 1974) y California (Verde Arribas et al., 1986; Giusti et al., 2012). También, el peso promedio es similar a otras líneas sintéticas (Birolo et al., 2022). Respecto al coeficiente de variación, las variables de la serie roja como el recuento de glóbulos rojos, la hemoglobina y el hematocrito, junto con el peso, son las que presentan una menor variación respecto a la media, mientras que las plaquetas y las variables de la serie blanca serían las que muestran una mayor variación. Este resultado también se ha encontrado en los trabajos de Weisbroth et al. (1974), Verde Arribas et al. (1986) y Giusti et al. (2012).

Tabla 1. Análisis descriptivo de los parámetros sanguíneos del hemograma en la población de conejos de nuestro experimento

Variables	Medias	Mínimo	Máximo	SD	CV
Recuento de Glóbulos Rojos (RBC, $10^{12}/l$)	6.52	3.34	8.77	0.734	0.11
Hemoglobina (HGB, g/dl)	11.28	6.30	14.90	1.23	0.11
Hematocrito (HCT, %)	41.85	20.60	53.11	4.29	0.10
Recuento de Plaquetas (PLT, $10^9/l$)	331.3	114.0	772.0	95.49	0.29
Recuento de Glóbulos Blanco (WBC, $10^9/l$)	9.7	4.9	40.69	3.29	0.34
Linfocitos (%)	55.80	14.70	88.76	10.55	0.19
Monocitos (%)	3.73	0.37	9.67	2.02	0.54
Neutrófilos (%)	38.78	17.88	79.58	10.27	0.27
Eosinófilos (%)	1.69	0.00	11.64	1.19	0.70
Basófilos (%)	2.67	0.00	0.98	45.11	1.19
Ratio Neutrófilos / Linfocitos (RNL)	0.78	0.25	5.29	0.56	0.72
Ratio Monocitos/ Linfocitos (RML)	0.07	0.01	0.29	0.63	0.01
Peso (gramos)	3206	2190	4190	385.6	0.12

Efecto de línea

La Tabla 2 presenta las variables que exhibieron diferencias significativas en los parámetros del hemograma y en el peso entre las líneas low y high de nuestro experimento. La línea high mostró un mayor recuento de glóbulos blancos y un menor porcentaje de neutrófilos que la línea low. Estos resultados están de acuerdo con el encontrado por Argente et al. (2019) y Beloumi et al. (2020) en las generaciones ocho y doce de nuestro experimento de selección divergente por resiliencia. Un menor recuento de glóbulos blancos y un mayor porcentaje de neutrófilos en la línea low sugieren que la selección por homogeneidad en el tamaño de la camada se acompaña de cambios en la respuesta inmunológica que ayudan a la hembra a ser menos susceptible a infecciones bacterianas o virales oportunistas.

Tabla 2. Diferencias entre la línea low y la línea high para los parámetros sanguíneos

Variables	Línea low (n=137)	Línea high (N=170)
	Medias (SD)	Medias (SD)
Recuento de Glóbulos Blanco (WBC, $10^9/l$)	8.95 (2.26) a	10.31 (3.8) b
Neutrófilos (%)	39.96 (9.69) a	37.81 (10.65) b
Peso (Gramos)	3098 (329) a	3292 (407) b

SD: desviación estándar. a y b dentro de la misma fila indican diferencias significativas al $p < 0.05$.

Efecto de sexo

La Tabla 3 muestra las diferencias significativas en las variables del hemograma entre hembras y machos. Los machos tienen mayores valores en el recuento de glóbulos rojos, hemoglobina, hematocrito, glóbulos blancos y porcentaje de linfocitos en comparación con las hembras. En otros trabajos también se ha encontrado que los machos presentan valores más altos en el recuento de glóbulos rojos, hemoglobina, recuento de plaquetas y glóbulos blancos que las hembras (Petterino et al., 2010; Trocino et al., 2013). Una mayor concentración de glóbulos rojos, plaquetas y glóbulos blancos en los machos puede estar relacionada con un metabolismo más alto y una mayor movilidad. Los machos generalmente necesitan más oxígeno y nutrientes para mantener su mayor masa muscular y su mayor nivel de actividad física (Kluger et al., 1996; Hoffman et al., 2008). Además, niveles más altos de testosterona en los machos pueden estimular la producción de glóbulos rojos y hemoglobina, lo que mejora el transporte de oxígeno en la sangre (Murphy, 2014). Sin embargo, respecto a las ratios, las hembras tienden a mostrar una mayor ratio de neutrófilos/linfocitos (RNL) y de monocitos/linfocitos (RML) que los machos; esto estaría de acuerdo con un mayor estrés en las hembras. En otros trabajos, también se ha encontrado una respuesta más pronunciada al estrés en las hembras (Dhabhar, 2009).

Tabla 3. Diferencias entre hembras y machos para los parámetros sanguíneos

Variables	Hembra (n=280)	Macho(n=27)
	Medias (SD)	Medias (SD)
Recuento de Glóbulos Rojos (RBC, $10^{12}/l$)	6.45 (0.71) a	7.23 (0.49) b
Hemoglobina (HGB, g/dl)	11.15 (1.19) a	12.50 (0.88) b
Hematocrito (HCT, %)	41.61 (4.35) a	44.25 (2.62) b
Recuento de Glóbulos Blanco (WBC, $10^9/l$)	9.69 (3.38) a	9.89 (2.11) b
Linfocitos (%)	55.30 (10.57) a	60.93 (9.02) b
Ratio Monocitos/ Linfocitos (RML)	0.07 (0.05) a	0.05 (0.03) b
Peso (Gramos)	2955 (349) a	3230 (381) b

SD: desviación estándar. a y b dentro de la misma fila indican diferencias significativas al $p \leq 0.05$.

Efecto del estado fisiológico de la hembra

En la tabla 4, se muestran las diferencias para los valores de los parámetros del hemograma y peso entre dos estados fisiológicos importantes para la hembra, primera monta y primer parto. Tras el parto, se observa una reducción en el recuento de glóbulos rojos, la concentración de hemoglobina y el hematocrito, junto con un incremento en el recuento de glóbulos blancos y porcentaje de neutrófilos. El parto es un estado fisiológico estresante para la madre donde se pierde un nivel importante de fluidos sanguíneos, lo cual está bien documentado en estudios sobre cambios hematológicos postparto (Kusumoto et al., 2015; Van Saun, 2000). Esto concuerda con una menor concentración de glóbulos rojos y un incremento de glóbulos blancos, especialmente en la población de neutrófilos, que son la primera barrera de defensa ante posibles infecciones bacterianas para el animal (Regan et al., 2016; Jain, 1993). El resto de las variables no presentaron diferencias entre la primera monta y el primer parto.

Tabla 4. Diferencias entre la primera monta y el primer parto para los parámetros sanguíneos

Variables	1º monta (n=167)	1º parto (n=140)
	Medias (SD)	Medias (SD)
Recuento de Glóbulos Rojos (RBC, $10^{12}/l$)	6.76 (0.67) a	6.23 (0.70) b
Hemoglobina (HGB, g/dl)	11.68 (1.19) a	10.79 (1.09) b
Hematocrito (HCT, %)	42.91 (3.64) a	40.59 (4.66) b
Recuento de Glóbulos Blanco (WBC, $10^9/l$)	9.05 (2.62) a	10.48 (3.8) a
Neutrófilos (%)	37.00 (9.38) a	40.88 (10.90) b
Eosinófilos (%)	1.88 (0.84) a	1.47 (1.48) b

SD: desviación estándar. a y b dentro de la misma fila indican diferencias significativas al $p \leq 0.05$.

Efecto de estación

La tabla 5 muestra las diferencias entre el otoño, el invierno y la primavera para los valores de los parámetros del hemograma y el peso. Los valores para el recuento de glóbulos rojos, hemoglobina, hematocrito y de plaquetas son menores en primavera que en otoño e invierno. Sin embargo, en relación con la serie blanca, el porcentaje de monocitos es mayor, y por tanto también la ratio de monocitos/linfocitos es mayor, pero el porcentaje de eosinófilos y basófilos es menor. En otros estudios se ha encontrado que las variaciones estacionales en los parámetros hematológicos pueden estar influenciadas por factores ambientales como la temperatura y la humedad, así como por la presencia de patógenos (Nazifi et al., 2003; Mohri et al., 2010).

Tabla 5. Diferencias otoño, invierno y primavera para los parámetros sanguíneos

Variables	Otoño (n=139)	Invierno (n=127)	Primavera (n=41)
	Medias (SD)	Medias (SD)	Medias (SD)
Recuento de Glóbulos Rojos (RBC, $10^{12}/l$)	6.60 (0.67) a	6.53 (0.67) b	6.18 (0.99) c
Hemoglobina (HGB, g/dl)	11.31 (1.23) a	11.42 (1.19) b	10.67 (1.19) c
Hematocrito (HCT, %)	41.89 (3.71) a	42.19 (3.94) b	40.63 (6.52) c
Recuento de Plaquetas (PLT, $10^9/l$)	356.25 (91.14) a	309.32 (99.06) b	314.48 (78.96) c
Monocitos (%)	3.84 (2.10) a	3.46 (1.83) b	4.15 (2.27) c
Eosinófilos (%)	1.53 (0.59) a	2.10 (1.58) b	1.00(0.82) c
Basófilos (%)	0.09 (0.07) a	0.12 (0.07) b	0.03(0.06) c
Ratio Monocitos/ Linfocitos (RML)	0.07 (0.04) a	0.07 (0.04) b	0.09 (0.06) c
Peso (Gramos)	3059 (357) a	3263 (368) b	3527 (284) c

SD: desviación estándar. a, b y c dentro de la misma fila indican diferencias significativas al $p \leq 0.05$

Conclusiones

Este trabajo encontró diferencias significativas en los parámetros hematológicos para los efectos de línea, sexo, estado fisiológico y estación de año. En la línea low se incrementa el porcentaje de neutrófilos lo que sugiere que la selección por homogeneidad en el tamaño de la camada se acompaña de cambios en la respuesta inmunológica y que el porcentaje de neutrófilos podría ser un biomarcador del bienestar del animal. Respecto al sexo, los machos presentan mayores valores para el recuento de glóbulos rojos y blancos en comparación con las hembras. En relación al parto, éste se caracteriza por una reducción en el recuento de glóbulos rojos, junto con un incremento en el recuento de glóbulos blancos y el porcentaje de neutrófilos. Finalmente, respecto a la estación del año, la primavera muestra un menor recuento de glóbulos rojos y un mayor porcentaje de monocitos y una mayor ratio de monocitos-linfocitos, frente al otoño e invierno.

Bibliografía

- Argente, M.J., García, M.L., Zbyňovká, K., Petruška, P., Capcarová, M., Blasco, A. (2019) Correlated response to selection for litter size environmental variability in rabbit's resilience. *Animal*, 13, 2348–2355.
- Beloumi, D., Blasco, A., Muelas, R., Santacreu, M.A., García, M.L., Argente, M.J. (2020). Inflammatory Correlated Response in Two Lines of Rabbit Selected Divergently for Litter Size Environmental Variability. *Animals*, 10, 1540.
- Birolo, M., Xiccato, G., Bordignon, F., Dabbou, S., Zuffellato, A., Trocino, Á. (2022). Rendimiento de crecimiento, eficiencia digestiva y calidad de la carne de dos conejos cruzados comerciales alimentados con dietas que difieren en niveles de energía y proteínas. *Animals*, 12(18), 2427.
- Blasco, A., Martínez-Álvaro, M., García, M. L., Ibáñez-Escriche, N., Argente, M. J. (2017). Selection for environmental variance of litter size in rabbits. *Genetics Selection Evolution*, 49(48).

- Brito, L.F., Oliveira, H.R., McConnell, B.R., Schinckel, A.P., Arrazola, A., Marchant-Forde, J.N., Johnson, J.S. (2020). Large-Scale Phenotyping of Livestock Welfare in Commercial Production Systems: A New Frontier in Animal Breeding. *Frontier Genetics*. 31; 11:793.
- Broom, D. M. (1993). Assessing the welfare of modified or treated animals. *Livestock Production Science*, 36(1), 39-54.
- Cunha, V., Esteves, M., Costa, M. (2019). Rabbit as an animal model for biomedical research. In *Rabbit Biotechnology*. Springer, Cham.
- Dhabhar, F. S. (2009). Enhancing versus suppressive effects of stress on immune function: Implications for immunoprotection and immunopathology. *Neuroimmunomodulation*, 16(5), 300-317.
- García de Lorenzo y Mateos, A., López Martínez, J., & Sánchez Castilla, M. (2000). Respuesta inflamatoria sistémica: fisiopatología y mediadores. *Medicina Intensiva*, 24(8), 353-360.
- García, M.L., Argente, M.J. (2021). The Genetic Improvement in Meat Rabbits. *IntechOpen*. doi: 10.5772/intechopen.93896.
- Giusti, M., Lacchini, R., Farina, O. H., Rule, R. (2012). Parámetros bioquímicos, hematológicos y productividad de conejos alimentados con dietas normo e hipoproteica. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, 46(2), 213-219.
- Hoffman, J. R., Falvo, M. J. (2008). Protein - Which is Best. *Journal of Sports Science and Medicine*, 7(1), 118-130.
- Jain, N. C. (1993). *Essentials of Veterinary Hematology*. Lea and Febiger.
- Janeway, C. A., Travers, P., Walport, M., Shlomchik, M. J. (2001). *Immunobiology: The Immune System in Health and Disease* (5th ed.). Garland Science.
- Kluger, M. J., Kozak, W., Conn, C. A., Leon, L. R., Soszynski, D. (1996). Role of fever in disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 856(1), 224-233
- Knap P.W. (2009). Robustness. In *Resource allocation theory applied to farm animal production*. CABI Publishing, Wallingford, UK.
- Kusumoto, K., Ueda, K., Koyama, H. (2015). Changes in hematological parameters during the peripartum period in cows. *Journal of Veterinary Medical Science*, 77(8), 999-1001.
- Medzhitov, R., Janeway, C. A. (2000). Innate immune recognition: mechanisms and pathways. *Immunological Reviews*, 173, 89-97.
- Mohri, M., Sharifi, K., Eidi, S. (2010). Hematology and serum biochemistry of Holstein dairy calves: Age related changes and comparison with blood composition in adults. *Research in Veterinary Science*, 89, 240-245.
- Morissette, R. (2022). *Manual de diagnóstico veterinario*. Editorial Veterinaria.
- Murphy, K., Weaver, C., Janeway, C. (2012). *Janeway's Immunobiology* (9th ed.). Garland Science.
- Murphy, W. G. (2014). The sex difference in haemoglobin levels in adults - Mechanisms, causes, and consequences. *Blood Reviews*, 28(2), 41-47.
- Nazifi, S., Asadi, N., Karami, A. R. (2003). Seasonal variations of serum tri-iodothyronine, thyroxine and thyroid-stimulating hormone in Iranian fat-tailed sheep. *Journal of Veterinary Medicine Series A*, 50, 343-347.
- Petterino, C., Gallo, M. P., Rossi, F., Pone, E., Arrighi, S. (2010). Blood chemistry and hematological values in New Zealand white rabbits: Variation with age and sex. *Laboratory Animals*, 44(1), 51-56.

Piles, M., Blasco, A., Pascual, M. (2017). The nutritional value of rabbit meat. *World Rabbit Science*, 25(4), 397-404.

Rauw. W.M. (2009). *Resource Allocation Theory Applied to Farm Animal Production*. CABI Publishing

Regan, M. M., Siegle, J. P., Livasy, C. A. (2016). Hematological changes during the postpartum period: A review of the literature. *Journal of Obstetrics and Gynaecology Research*, 42(2), 138-146.

Trocino, A., Zomeño, C., Birolo, M., Zuffellato, A., Xiccato, G. (2013). Effects of genotype, parity order, and physiological status on hematological traits and productive performance of rabbit does. *Animal*, 7(6), 921-928.

Van Saun, R. J. (2000). Peripartum lipid metabolism and metabolic disease risk in the transition dairy cow. *The Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 16(2), 331-348.

Verde Arribas, M. T., Gómez Piquer, J. (1986). Parámetros sanguíneos de interés clínico en conejos normales. Departamento de Patología Médica, Facultad de Veterinaria, Universidad de Zaragoza.

Weisbroth, S. H., Flatt, R. E., Kraus, A. L. (1974). *The Biology of the Laboratory Rabbit*. Academic Press.

Estudio del peso del gazapo al parto

M. Sáez Torregrosa¹, J. Gálvez Lorente¹, M.J. Argente¹

¹ Instituto Universitario de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental. Universidad Miguel Hernández de Elche. Ctra. de Beniel Km 3,2. 03312. Orihuela. España. e-mail: moises.saez@goumh.umh.es

Resumen

La supervivencia neonatal en conejo está estrechamente relacionada con el peso del gazapo al nacimiento. El objetivo del presente trabajo es estudiar el efecto de la línea, del sexo del gazapo, de la ingestión de leche tras el nacimiento, del orden de parto, junto con la covariable del número de gazapos nacidos, sobre la variable del peso del gazapo en las primeras horas de vida. La línea homogénea y heterogénea en tamaño de camada no mostraron diferencias para el peso del gazapo en las primeras horas de vida. Tampoco, se encontraron diferencias entre machos y hembras para el peso del gazapo al nacimiento. Sin embargo, la ingestión de leche en las primeras horas de vida incrementó el peso del gazapo en un 20%. Los gazapos de las hembras adultas (≥ 3 partos) pesaron un 30% menos que los gazapos de hembra jóvenes (≤ 2 partos). El coeficiente de regresión de la covariable del número de gazapos nacidos sobre el peso del gazapo en las primeras horas de vida mostró un valor negativo (-2,31 g/gazapo). Este valor estaría de acuerdo con el menor peso de los gazapos encontrado en las hembras adultas porque estas hembras tienen un mayor número de gazapos al parto (9,17 gazapos) que las hembras jóvenes (4,76 gazapos). Los gazapos que murieron antes de llegar a los cuatro días de edad pesaron la mitad al nacer que los que si sobrevivieron. Conclusión, el peso del gazapo en las primeras horas de vida está relacionado directamente con la ingestión de leche y el número total de gazapos gestados. Un mayor peso al nacer aumenta la probabilidad de sobrevivir del gazapo en sus primeros días de vida.

Palabras claves: ingestión de leche, orden de parto, peso al nacimiento, tamaño de la camada, conejo.

Study of the individual weight of kit at birth

Abstract

Neonatal survival in rabbits is directly related to individual birth weight. The aim of the present work is to study the effects of line, kit's sex, milk intake after birth, parity order, together with the covariate of number of rabbits born, on the variable of weight of the rabbits in the first hours of life. The kit weight was similar between the homogeneous and heterogenous lines for litter size. No differences were found between males and females for birth weight of kits at birth. Milk intake in the first hours of life was observed to increase the kits weight by 20%. Besides, kits of adult female rabbits (≥ 3 parities) weighed 30% less than young female rabbits (≤ 2 parities). The regression coefficient of the covariate of the number of born kits on the kit weight in the first hours of life showed a negative value (-2.31 g/kits). This value would agree with the lower weight of the kits found in the adult females because they have a higher number of rabbits at birth (9.17 kits) than the young females (4.76 kits). The kits that died before reaching four days of age weighed half as much at birth as those that did survive. Conclusion, the weight of the kits in the first hours of life is directly related to milk intake and the total number of born kits. A higher birth weight increases the probability of survival of the rabbit in its first days of life.

Keywords: milk intake, parity order, birth weight, litter size, rabbit.

Introducción

El peso del gazapo en las primeras horas de vida influye directamente sobre su supervivencia y su crecimiento durante la lactación y, por lo tanto, es un carácter importante en cunicultura (Martínez-Paredes et al., 2018; Agea et al., 2019; Szendrő et al., 2019; Belabbas et al., 2023). La bibliografía apunta que el estado fisiológico de la madre (Rashwan y Marai, 2000; Rebollar et al., 2009), la calidad del nido (Matics et al., 2002; González-Redondo y Zamora-Lozano, 2008), la estación del parto (El-Ashram et al., 2020), la ingesta de leche en las primeras horas de vida (Argente et al., 1999; Agea et

al., 2019) y el sexo (Bolet et al., 1996) afectan al peso, y por tanto a la supervivencia del gazapo. La mayor parte de las muertes tiene lugar en la primera semana de vida del gazapo (Kadi et al., 2005; Belabbas et al., 2024).

El objetivo del presente trabajo es estudiar el efecto de la línea, del sexo del gazapo, de la ingestión de leche tras el nacimiento, del orden de parto, junto con la covariable del número de gazapos nacidos, sobre la variable del peso del gazapo en las primeras horas de vida.

Materiales y Métodos

Material animal

Se pesaron 82 gazapos procedentes de 12 conejas (7 hembras pertenecientes a una línea seleccionada para reducir la variabilidad del tamaño de camada al nacimiento y 5 hembras pertenecientes a una línea seleccionada para incrementar la variabilidad del tamaño de camada al nacimiento). Las hembras se montaron por primera vez a las 20 semanas de edad y a los 12 días después de cada parto. Las montas siempre eran entre animales de la misma línea. Si las hembras no aceptaban la monta, se volvían a montar una semana más tarde. Los gazapos fueron pesados individualmente y sexados al nacer. Además, se constató si el gazapo había mamado, mediante la presencia de una mancha de leche en el estómago (Argente et al., 1999). No se realizaron adopciones y, a los 4 días tras el parto, se volvieron a supervisar a los gazapos y confirmar si estaban vivos.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis del peso del gazapo en las primeras horas de vida. El modelo incluyó los efectos de la línea (con 2 niveles: línea homogénea y heterogénea para el tamaño de camada), el sexo del gazapo (con dos niveles), la ingestión de leche en las primeras horas de vida con la presencia de la mancha de leche en el estómago (con dos niveles: presencia y ausencia), el orden de parto (con 2 niveles: hembras con 2 o menos partos y hembras con 3 o más partos), la supervivencia del gazapo a los 4 días de vida (con dos niveles) y el número de gazapos nacido como covariable. Se utilizó el paquete estadístico R para la realización de este análisis.

Todos procedimientos experimentales fueron aprobados por el Comité de Ética de Investigación de la Universidad Miguel Hernández de Elche, según las Directivas del Consejo 98/58/CE y 2010/63/UE (número de referencia TFG.GAA.MJAC.JFPA.221204)

Resultados y Discusión

La tabla 1 muestra el peso del gazapo en las primeras horas de vida en las hembras de la línea homogénea y en la línea heterogénea para el tamaño de camada, en los gazapos machos y hembras, antes y después de ingerir leche materna, en las hembras con 2 o menos partos y en las hembras con 3 o más partos, en los gazapos que han sobrevivido a los 4 días de edad y en los que no han sobrevivido a los 4 días de edad, y el coeficiente de regresión de la covariable número de gazapos nacidos. El peso del gazapo en las primeras horas de vida de nuestro estudio está dentro del rango de valores encontrados por otros autores (Argente et al., 1999; Bolet et al., 1996; Rashwan y Marai, 2000; Matics et al., 2002; González-Redondo y Zamora-Lozano, 2008; Rebollar et al., 2009; Agea et al., 2019; Szendrő et al., 2019; El-Ashram et al., 2020; Belabbas et al., 2023).

Nuestros resultados muestran que los gazapos de la línea homogénea pesaron menos al nacer que los de la línea heterogénea; sin embargo, en un trabajo anterior, Agea et al. (2019) no encontraron diferencias en el peso del gazapo al nacimiento entre líneas. A diferencia del trabajo de Bolet et al. (1986), donde estos autores encontraron un mayor peso de los gazapos machos, nuestro estudio no mostró diferencias para el peso entre los gazapos machos y hembras. Después de mamar, los gazapos incrementaron su peso en un 20% respecto a los gazapos que no habían ingerido leche materna; Argente et al. (1999) encontraron un resultado similar y que los gazapos que habían mamado en las primeras 24 horas de vida tenían una mayor probabilidad de sobrevivir en la primera semana de vida que los que no lo habían hecho. Los gazapos de las hembras adultas (≥ 3 partos) pesaron un 30%

menos que los gazapos de hembra jóvenes (≤ 2 partos). Este menor peso del gazapo en las hembras adultas parece estar relacionado con el mayor número de gazapos que tienen sus camadas al parto frente a las hembras jóvenes ($9,17 \pm 0,42$ gazapos en hembras adultas vs. $4,76 \pm 0,09$ gazapos en hembras jóvenes). Este resultado está de acuerdo con el coeficiente de regresión encontrado para la covariable del número de gazapos nacidos sobre el peso del gazapo en las primeras horas de vida ($-2,31$ g/gazapo), y con que las diferencias entre líneas desaparezcan al incluir la covariable. Finalmente, encontramos que los gazapos que murieron antes de llegar a los cuatro días de edad pesaron la mitad al nacer que los que si sobrevivieron. Concretamente, el peso de los gazapos que no sobrevivieron fue de $38,07$ gramos al nacimiento vs los $59,52$ gramos de los que sí sobrevivieron.

Tabla 1. Media por mínimos cuadrados (MMC) y error estándar (ES) para el peso del gazapo en las primeras horas de vida.

		Peso al nacimiento	
		n	MMC \pm ES
Línea	Homogénea	54	$53,59 \pm 2,24$ a
	Heterogénea	28	$62,66 \pm 2,15$ b
Sexo	Macho	16	$53,05 \pm 4,85$ a
	Hembra	67	$57,54 \pm 1,76$ a
Ingestión de leche	NO	43	$50,82 \pm 2,02$ a
	SI	40	$63,15 \pm 2,41$ b
Orden de parto	Joven (≤ 2 partos)	21	$73,19 \pm 2,36$ a
	Adulta (≥ 3 años)	62	$51,20 \pm 1,61$ b
Estado gazapo a los 4 días	Vivo	72	$59,52 \pm 1,64$ a
	Muerto	11	$38,07 \pm 4,04$ b
Covariables gazapos nacidos			$-2,31 \pm 0,45$

n: número de observaciones. a, b: Diferencias con un nivel de significación al $P \leq 0.05$.

Conclusiones

El peso del gazapo en las primeras horas de vida está relacionado directamente con la ingestión de leche y el número total de gazapos gestados.

Agradecimientos

Este estudio es parte del proyecto de I+D+i Este trabajo es parte del proyecto de I+D+i PID2021-123702OB-100, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033/ y por FEDER Una manera de hacer Europa, UE.

Bibliografía

- Agea I, García ML, Blasco A, Argente MJ. 2019. Litter survival differences between divergently selected lines for environmental sensitivity in rabbits. *Animals*, 9 (9), 603. <https://doi.org/10.3390/ani9090603>
- Argente MJ, Santacreu AM, Climent A, Blasco A. 1999. Phenotypic and genetic parameters of birth weight and weaning weight of rabbits born from unilaterally ovariectomized and intact does. *Livest Prod Sci*, 57, 159-167. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(98\)00166-3](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(98)00166-3)
- Belabbas R, Ezzeroug R, García ML, Berbar A, Zitouni G, Talaziza D, Boudjella Z, Boudahdir N, Dis S, Argente MJ. 2023. Prenatal factors affecting the probability of survival between birth and weaning in rabbits. *World Rabbit Sci.*, 31, 11-20. <https://doi.org/10.4995/wrs.2023.18268>
- Belabbas R, Ezzeroug R, García ML, Feknous N, Talaziza D, Argente MJ. 2024. Genetic and Phenotypic Parameters of Rabbit Individual Body Weight in the Prewaning Period. *Vet. Sci.*, 11, 14. <https://doi.org/10.3390/vetsci11010014>
- Bolet G, Esparbie J, Falieres J. 1996. Relations entre le nombre de foetus par corne uterine, la taille de portee à la naissance et la croissance pondérale des lapereaux. *Ann. Zootech.*, 45, 185-200. <https://doi.org/10.1051/animres:19960207>
- Coureaud G, Fortun-Lamothe L, Langlois D, Schaal B. 2007. The reactivity of neonatal rabbits to the mammary pheromone as a probe for viability. *Animal: an international journal of animal bioscience*, 1(7), 1026-1032. <https://doi.org/10.1017/S1751731107000389>
- El-Ashram S, Aboelhadid SM, Abdel-Kafy EM, Hashem SA, Mahrous LN, Farghly EM, Kamel AA. 2020. Investigation of pre- and post-weaning mortalities in rabbits bred in Egypt, with reference to parasitic and bacterial causes. *Animals*, 10, 537. <https://doi.org/10.3390/ani10030537>
- González-Mariscal G, Caba M, Martínez-Gómez M, Bautista A, Hudson R. 2016. Mothers and offspring: The rabbit as a model system in the study of mammalian maternal behavior and sibling interactions. *Hormones and Behavior*, 77, 30-41. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2015.05.011>
- González-Redondo P, Zamora-Lozano M. 2008. Neonatal cannibalism in cage-bred wild rabbits (*Oryctolagus cuniculus*). *Arch Med Vet* 40(3), 281-287. <http://dx.doi.org/10.4067/S0301-732X2008000300009>
- González-Redondo P. 2016. Preliminary results on reproductive and growing performance of a breeding nucleus of Spanish Common Rabbit breed. En: XLI Symposium de Cunicultura.
- Jimoh AO, Ewuola OE. 2017. Milk yield and kit development of four breeds of rabbit in Ibadan. Nigeria. *J. Anim. Sci. Techn.* 59, 25-32. <https://doi.org/10.1186/s40781-017-0151-7>
- Kadi SA, Zerrouki N, Louchami Y, Dahmani F. 2005. Pre-weaning mortality in rabbits of local Algerian population. En: 4th International Conferences on Rabbit Production in Hot Climate, Sharm El-Sheikh, Egypt, 24-25 February.
- Martínez-Paredes E, Rodenas L, Pascual JJ, Savietto D. 2018. Early development and reproductive lifespan of rabbit females: implications of growth rate, rearing diet and body condition at first mating. *Animal*, 12, 2347-2355. <https://doi.org/10.1017/S1751731118000162>
- Matics Zs, Szendrő Zs, Altbäcker V, Biróné Németh E, Radnai I, Káplár I, Gyovai M, Metzger Sz. 2002. Nest building of domestic rabbits. En: 14th Hungarian Conference on Rabbit Production, Kaposvár, Hungary 22 May.
- Pascual M., Blasco E., Gómez E.A. 2014. Cálculo de índices técnicos en explotaciones cunícolas. En: XXXIX Symposium de Cunicultura de ASESCU. Tudela, 29 y 30 de mayo.
- Rashwan AA, Marai L. 2000. Mortality in young rabbits: a review. *World Rabbit Sci*, 8, 111-124.



Rebollar P, Pérez-Cabal M, Pereda N, Lorenzo PL, Arias-Álvarez M, García-Rebollar P. 2009. Effects of parity order and reproductive management on the efficiency of rabbit productive systems. *Livest Sci*, 121, 227-233. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.06.018>

Szendrő Z, Cullere M, Atkári T, DalleZote A. 2019. The birth weight of rabbits: Influencing factors and effect on behavioural, productive and reproductive traits: A review. *Livestock Sci*. 230, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.103841>

Procesado e Innovación de Productos de Origen Animal

Efecto de la *Moringa oleifera* sobre la calidad de hamburguesas de cerdo

M. Padilla¹, C. Navarro-Rodríguez de Vera¹ y E. Sayas-Barberá¹

¹ Centro de Investigación e Innovación Agroalimentaria y Agroambiental CIAGRO. Universidad Miguel Hernández, Ctra. de Beniel km 3.2, 03312, Orihuela, Alicante. e-mail: marina.padilla@goumh.umh.es

Resumen

La creciente preocupación por la salud y la prevención de enfermedades, ha llevado a utilizar diferentes estrategias para mejorar las propiedades nutricionales y funcionales de los alimentos, además de explorar nuevas fuentes naturales de nutrientes. La *Moringa oleifera* es una planta que presenta importantes macro y micronutrientes de gran importancia en la nutrición humana. En especial, las hojas de Moringa destacan por su perfil nutricional y su composición antioxidante, debido a su contenido en proteínas, fibra, minerales (Ca, K, Mg), vitaminas (A, C y E) y fitoquímicos (carotenoides y tocoferoles). Esta composición ha promovido su aplicación en la fortificación de diferentes alimentos (pan, galletas, yogur, queso y sopas). Este estudio se alinea con la estrategia de la fortificación nutricional, aprovechando los posibles beneficios de la moringa en la mejora en la calidad y la vida útil y explorar el potencial como ingrediente funcional en productos cárnicos. Es por esto, que el objetivo de trabajo es estudiar el efecto de *Moringa oleifera* sobre la calidad de hamburguesas de cerdo y analizar su capacidad como conservante natural. Se elaboraron 4 lotes de hamburguesas (control, 1%, 1,5% y 2% de hoja de moringa), y se estudió su efecto durante su conservación en refrigeración (4 días). La moringa no afectó a las propiedades de cocción, pero sí a las coordenadas de color, reduciendo la luminosidad y la coordenada a*, durante todos los días de conservación. El análisis sensorial indicó que los catadores aceptaron positivamente las muestras con moringa.

Palabras clave: *Moringa oleifera*, ingredientes funcionales, hamburguesas, vida útil

Effect of *Moringa oleifera* on the quality of pork hamburgers

Abstract

The growing concern for health and disease prevention has led to the use of different strategies to improve the nutritional and functional properties of foods, as well as to explore new natural sources of nutrients. *Moringa oleifera* is a plant with important macro- and micronutrients of great importance in human nutrition. In particular, moringa leaves stand out for their nutritional profile and antioxidant composition, due to their protein, fibre, minerals (Ca, K, Mg), vitamins (A, C and E) and phytochemicals (carotenoids and tocopherols). This composition has promoted its application in the fortification of different foods (bread, biscuits, yoghurt, cheese and soups). This study is aligned with the strategy of nutritional fortification, taking advantage of the possible benefits of moringa in improving quality and shelf life and exploring its potential as a functional ingredient in meat products. The aim of this study was to study the effect of *Moringa oleifera* on the quality of pork burgers and to evaluate its capacity as a natural preservative. Four batches of hamburgers (control, 1%, 1.5%, 1.5% and 2% moringa leaf) were prepared, and their effect was studied during their conservation under refrigeration (4 days). Moringa did not affect the cooking properties, but did affect the color coordinates, reducing the lightness and the a* coordinate, during all days of storage. Sensory analysis indicated that tasters positively accepted the samples with moringa.

Keywords: *Moringa oleifera*, functional ingredients, hamburgers, shelf life

Introducción

La sociedad está prestando cada vez más atención a la salud y prevención de enfermedades. La conciencia de una alimentación correcta para prevenir enfermedades está muy arraigada entre los consumidores, por lo que la industria alimentaria está enfocada a mejorar las propiedades nutricionales de los alimentos y a la búsqueda de fuentes naturales ricas en nutrientes y en compuestos bioactivos. Es conocido los enormes beneficios de los productos vegetales por su gran contenido en compuestos

fitoquímicos, con actividad antioxidantes entre otras, que previenen de las especies reactivas de oxígeno, que provocan la oxidación de biomoléculas, formando productos tóxicos y mutagénicos (Jideani *et al.*, 2021). De aquí el auge de los productos a base de vegetales y la disminución del consumo de productos cárnicos.

En la actualidad, la preferencia general de los consumidores se inclina hacia productos cárnicos que prescinden de conservantes químicos, impulsada por inquietudes relacionadas con la seguridad alimentaria. Por esta razón, la aplicación de agentes antioxidantes y antimicrobianos naturales se percibe como una táctica eficaz para sustituir conservantes químicos y retardar la oxidación y la alteración microbiana, contribuyendo a mejorar la durabilidad durante el almacenamiento. Una de las estrategias más interesantes para abordar esta tendencia, en la mejora de la calidad y vida útil en productos cárnicos, es la adición de extractos e ingredientes vegetales, además de aportarle una imagen más saludable (Alirezalu *et al.*, 2020; Munekata *et al.*, 2020). La actividad bioactiva de estos ingredientes, procedente de diferentes partes de las plantas (semillas, hojas, frutos, raíces), se debe principalmente a su contenido en polifenoles (antocianinas, taninos, flavonoles, etc) (Alirezalu *et al.*, 2020; Munekata *et al.*, 2020).

La *Moringa oleifera*, conocida también como el “árbol milagroso” ha atraído la atención debido a su perfil nutricional excepcional (Mora *et al.*, 2015). Todas las partes de este árbol (hojas, flores, semillas y otras) son comestibles, y ricas en macro y micronutrientes y compuestos bioactivos que le aporta propiedades terapéuticas y preventivas de ciertas enfermedades como antidiabéticas, anticancerígenas, antiulcerosas, antimicrobianas y antioxidantes (Islam *et al.*, 2021). En su composición encontramos vitaminas, minerales y compuestos antioxidantes (Chhikara *et al.*, 2021). Se ha demostrado que las hojas de *Moringa oleifera* son ricas en β -caroteno (6-18 mg/100g), proteína (6-10 g/100 g), vitamina C calcio y potasio (Moyo *et al.*, 2011). Además, actúan como fuente natural de aminoácidos azufrados (metionina y cisteína), lo que les aporta actividad antioxidante. (Gil Zanón, 2019). Por tanto, la moringa ofrece un potencial para enriquecer alimentos y elevar su valor nutricional, así como, para actuar como conservante.

Se han estudiado diferentes usos y beneficios de la moringa en la elaboración de productos alimenticios, desde infusiones hasta suplementos dietéticos. La incorporación de moringa (extracto acuoso de hoja seca o fresca, hojas secas, polvo de hojas, extracto de flores y harina de semillas) ha sido ensayada en productos cárnicos por sus efectos antioxidantes y antimicrobianos durante el almacenamiento y, la mayoría de los autores, coinciden en que la gran desventaja es que altas concentraciones dan lugar a sabores y coloraciones no deseados y cambios texturales en el producto final (Trigo *et al.*, 2023).

En los estudios de Swastike *et al.* (2024) sobre el uso de moringa en carne picada de ternera y de Al-Juhaimi *et al.* (2016) en hamburguesas de carne de res obtuvieron resultados positivos relacionados con su capacidad conservante y atributos sensoriales. Abdallah *et al.*, (2023) estudio el efecto antimicrobiano del extracto acuoso de hojas de *Moringa oleifera* a diferentes concentraciones, (0,5 %, 1 % y 2 % en carne picada durante su almacenamiento a 4 °C durante 18 días), concluyendo que el extracto presentó un importante efecto antimicrobiano contra las bacterias de descomposición, y por tanto puede ser utilizado como conservante natural sin efectos negativos en la calidad sensorial. Sin embargo, es necesaria una mayor investigación, para conocer los mecanismos de su actividad y atenuar su impacto sensorial. Por este motivo, el objetivo de este trabajo es estudiar el potencial de la moringa como ingrediente enriquecedor en productos cárnicos y sus posibles efectos en la calidad, en su aceptación sensorial y durante su conservación en refrigeración. Los resultados permitirán conocer los beneficios potenciales de la moringa en la mejora de las propiedades y en la vida útil de las hamburguesas de cerdo enriquecidas con *Moringa oleifera*.

Materiales y Métodos

Material vegetal de Moringa oleifera.

Se utilizaron hojas de moringa procedente de agricultura ecológica, proporcionados por NATURCID (Monforte del Cid, Alicante, España). Las hojas de moringa fueron trituradas en un molino para obtener moringa en polvo (MP) con un tamaño de partícula entre a 0,410 y 0,210 mm. La MP presentó las

siguientes características fisicoquímicas: $A_w = 0,388 \pm 0,003$; $L^* = 4,83 \pm 1,69$; $a^* = -1,99 \pm 0,24$; $b^* = 19,99 \pm 1,17$; $C^* = 20,09 \pm 1,18$; $h = 95,67 \pm 0,35$; y $pH = 5,79 \pm 0,01$ (datos sin publicar).

Preparación de las hamburguesas de cerdo.

Para la elaboración de las hamburguesas se utilizó carne de cerdo (90%), pan rallado (5%), agua (5%), sal (1%), orégano y pimienta, como formulación base. Todos los ingredientes fueron amasados hasta obtener una masa homogénea, que fue dividida en 4 lotes a los que se le añadió diferentes % de MP. Los lotes fueron: L-C (lote control con 0% MP); L-1 (lote con 1% de MP); L-1,5 (lote con 1,5% de MP); y L-2 (lote con 2% de MP). Estas concentraciones de MP se basaron en estudios previos sin publicar. Finalmente, se pesaron porciones de 90g aproximadamente, y se moldearon en una máquina formadora de hamburguesas ($8,5 \pm 0,1$ cm de diámetro y $1,0 \pm 0,1$ cm de grosor). Dos elaboraciones independientes fueron realizadas.

Vida útil.

Las hamburguesas de cada lote se envasaron en bandejas envueltas en *film*, con 4 unidades (3 bandejas por lote) y fueron almacenadas en refrigeración ($4 \pm 1^\circ\text{C}$), simulando las condiciones habituales domésticas, durante 4 días. Se recogieron muestras a diferentes tiempos: 0, 2 y 4 días, y fueron analizadas para pH, color, A_w , propiedades de cocción y análisis microbiológico. Un análisis sensorial fue realizado a tiempo 0.

Determinaciones analíticas.

La determinación del pH se realizó con pH-metro (model 507 Crison, Barcelona, Spain) utilizando un electrodo sobre una disolución de la carne en agua (1:10).

La actividad de agua (A_w) se midió mediante el equipo Novasina TH-500 (Novasina, Axair Ltd., Pfaeffikon, Switzerland) a 25°C .

Las propiedades de cocción determinadas fueron pérdidas por cocción (PC) y reducción de diámetro (RD). Para llevar a cabo estas medidas, se seleccionaron hamburguesas de cada formulación, se pesaron y se midió el diámetro y grosor, antes y después de su cocción (170°C hasta una temperatura en el centro térmico de 70°C). Se usaron las siguientes fórmulas:

$$\% PC = (\text{peso muestra antes del cocinado} - \text{peso muestra cocinada (g)}) / \text{peso muestra antes del cocinado (g)} \times 100;$$

$$\% RD = (\text{diámetro muestra antes cocinado (cm)} - \text{diámetro muestra cocinado (cm)}) / \text{diámetro antes cocinado (cm)} \times 100$$

El color de las hamburguesas de cerdo se determinó sobre la superficie de las hamburguesas mediante un espectrofotómetro Minolta modelo CM-700. La luminosidad (L^*), el rojo-verde (a^*) y amarillo-azul (b^*) se determinaron utilizando el sistema CIELAB, iluminante D65 y observador 10° . Se siguieron las recomendaciones de la American Meat Science Association (AMSA, 2012).

Para el análisis microbiológico, se realizaron recuentos de bacterias aerobias totales y enterobacterias con placas Petrifilm™ (3M España S.A). Se utilizó agua de peptona para hacer las diluciones. Las placas para el recuento de enterobacterias se incubaron durante 24 horas a 37°C y las bacterias aerobias totales (BAM) se incubaron durante 48 horas a 35°C .

El análisis sensorial se realizó a tiempo 0, con 30 panelistas no entrenados procedentes de personal y estudiantes de la Universidad Miguel Hernández. Las muestras, codificadas con números de 3 cifras, de cada lote fueron presentadas en un plato a cada panelista para su evaluación, en una sala de cata homologada. Los panelistas evaluaron las muestras cocinadas para su color, sabor, jugosidad, dureza y aceptación general. La evaluación sensorial se realizó mediante una escala hedónica de siete puntos, con la que se pidió a los panelistas que puntuaran las hamburguesas desde 1 (me disgusta enormemente) a 7 (me gusta enormemente) en seis atributos: la apariencia, el color, el olor, la textura, el sabor, así como una valoración global. Los resultados de los catadores se recogieron en un formulario online al que los catadores accedían a través de un código QR.

Todos los datos fueron analizados en el programa estadístico SPSS (IBM, SPSS Statistical, versión 29.0.0.0). Para todos los datos se obtuvieron medias y desviaciones estándar, correspondientes a 3 repeticiones para todas las determinaciones, excepto para el color que se realizaron 7 repeticiones. Se realizaron análisis de la varianza (ANOVA), con dos factores (tiempo y lote) y test de Tukey ($P < 0,05$).

Resultados y Discusión

La evolución del pH de los diferentes lotes durante el tiempo de almacenamiento se representa en la Figura 1. La incorporación de MP tiempo 0 no afectó al pH de los lotes, pero, a partir del día 2, se observó una disminución en los valores de pH en los lotes con MP ($p < 0,05$). Diversos estudios concuerdan con estos resultados (Jayawardana *et al.*, 2015; Juhaimi *et al.*, 2016; Mashau *et al.*, 2021). Al-Juhaimi *et al.* (2016) obtuvo resultados similares en hamburguesas de ternera en donde aumentó el pH con la concentración de semillas de moringa, pero disminuyó con el tiempo de almacenamiento en las muestras con moringa. Asimismo, Jayawardana *et al.* (2015) mostraron resultados similares en salchichas de pollo. Ambos estudios atribuyen la disminución del pH con el tiempo de almacenamiento avanzado a la acumulación de ácido láctico debido al crecimiento de bacterias ácido-lácticas. Otros autores como Mashau *et al.* (2021), en el estudio sobre la vida útil de hamburguesas de cordero con *Moringa oleífera* observan un aumento del pH a partir del día 10 de almacenamiento. El agotamiento de la glucosa almacenada lleva a las bacterias a utilizar los aminoácidos liberados durante la descomposición de las proteínas, acumulándose amoníaco y aumentando el valor del pH. En el presente estudio no se ha visto este aumento debido a un periodo de almacenamiento más corto (4 días).

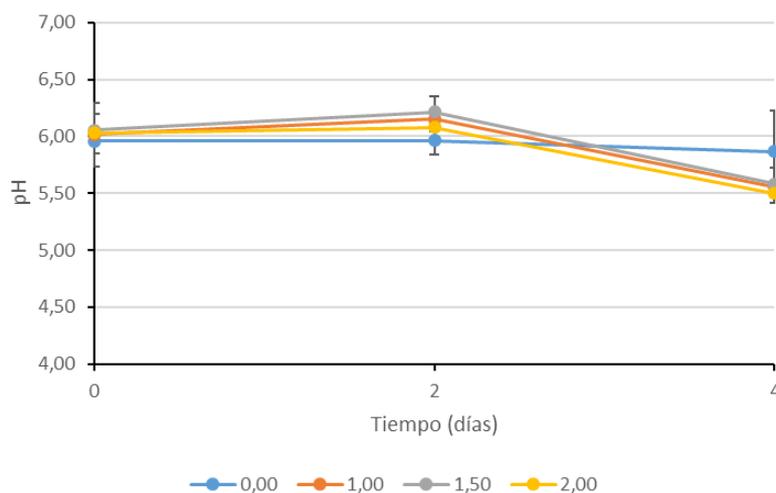


Figura 1. Evolución del pH de hamburguesas de cerdo con diferentes porcentajes de moringa en polvo (0, 1%, 1,5% y 2%) durante su almacenamiento en refrigeración a 0, 2 y 4 días.

Otros autores atribuyen la disminución de pH durante el período de almacenamiento, a un efecto antimicrobiano de los compuestos bioactivos del extracto vegetal y/o una producción de ácidos orgánicos a partir de azúcares presentes en los extractos por microorganismos heterofermentativos (Parafati *et al.*, 2019).

En estudios sobre la interacción de la moringa con las bacterias ácido lácticas se observó que la adición de moringa al yogur promovía un entorno que favorecía la acidificación. Los compuestos presentes en *Moringa oleífera*, como los antioxidantes y ciertos polifenoles, crean un ambiente que estimula la actividad de bacterias lácticas contribuyendo a la producción de ácidos y consecuente disminución del pH (Elkazaz *et al.*, 2024).

Los valores de A_w de lotes estudiados se muestran en la tabla 1. Se observó una disminución ($p < 0,05$) de la A_w con la incorporación de MP, por su menor A_w (A_w de la MP fue de $0,388 \pm 0,003$) y con el tiempo de almacenamiento. Estos resultados son consistentes con otros estudios en donde la adición de

polvo de hojas de moringa en hamburguesas de carne redujo la Aw, aumentando la capacidad de retención de agua, debido a las propiedades higroscópicas de la moringa por su contenido en fibra. (Swastike *et al.*, 2024). La disminución de la Aw durante el almacenamiento podría deberse a las interacciones entre los componentes bioactivos de la moringa y las proteínas de la carne, ya que estos componentes pueden contribuir a estabilizar las estructuras de las proteínas cárnicas, lo que reduce la movilidad del agua libre dentro del producto (Swastike *et al.*, 2024). Otros autores atribuyen los cambios en el Aw a el agua libre dentro de la matriz cárnica durante el almacenamiento (Sayas-Barberá *et al.*, 2021).

Tabla 1. Valores de Aw y propiedades de cocción de hamburguesas de cerdo con diferentes porcentajes de moringa en polvo (0, 1%, 1,5% y 2%) durante su almacenamiento en refrigeración a 0, 2 y 4 días.

Parámetros	Lote	Tiempo (días)		
		0	2	4
Aw	0%	0,965 ± 0,001 ^{Bb}	0,962 ± 0,002 ^{Ab}	0,962 ± 0,001 ^{Aa}
	1 %	0,964 ± 0,001 ^{Bb}	0,964 ± 0,002 ^{Bb}	0,962 ± 0,001 ^{Aa}
	1,5 %	0,965 ± 0,001 ^{Bb}	0,963 ± 0,001 ^{Ab}	0,963 ± 0,001 ^{Aab}
	2%	0,963 ± 0,001 ^{Ba}	0,959 ± 0,001 ^{Ba}	0,960 ± 0,001 ^{Aa}
PC (%)	0%	24,07 ± 0,15 ^{Bb}	25,80 ± 1,12 ^{Bb}	39,39 ± 12,57 ^{Ac}
	1 %	24,17 ± 1,18 ^{Ab}	22,21 ± 3,12 ^{Aa}	31,10 ± 1,08 ^{Bb}
	1,5 %	24,15 ± 1,20 ^{Ab}	21,41 ± 1,99 ^{Aa}	30,76 ± 1,07 ^{Bb}
	2%	22,02 ± 2,24 ^{Aa}	21,74 ± 2,05 ^{Aa}	27,84 ± 0,81 ^{Ba}
RD (%)	0%	22,60 ± 1,87 ^{Aa}	26,26 ± 4,54 ^{Bb}	27,68 ± 4,10 ^{Bb}
	1 %	25,20 ± 0,35 ^{Bb}	22,69 ± 2,39 ^{Aa}	23,22 ± 4,98 ^{Aab}
	1,5 %	26,35 ± 0,68 ^{Bb}	21,85 ± 1,93 ^{Aa}	25,50 ± 1,12 ^{Bb}
	2%	22,41 ± 1,62 ^{Aa}	22,84 ± 3,43 ^{Aa}	21,39 ± 0,97 ^{Aa}

A-B Valores seguidos de letra mayúsculas en la misma línea indica diferencias entre muestreos (tiempos). a-b Valores seguidos de letra minúsculas en la misma columna indica diferencias entre lotes. PC: pérdida por cocción; RD: reducción diámetro

En la tabla 1 se muestran los resultados de las propiedades de cocción obtenidas en los diferentes lotes durante el almacenamiento. La incorporación de MP disminuyó las pérdidas por cocción, aumentando estas diferencias durante el tiempo de almacenamiento ($p < 0,01$), observándose mayores pérdidas por cocción en el lote control (39%) y una menor pérdida en el lote con 2% de MP (27%) a tiempo 4. Como es sabido, la cantidad de agua libre se relaciona con las propiedades de cocción y, en este estudio, la disminución de las pérdidas por cocción con la concentración de moringa podría ser debido a una menor cantidad de agua libre, y por tanto menor Aw, debido a la presencia de fibra en MP que actuaría como retenedor de agua, reduciendo las pérdidas de agua. Al reducirse la PC, aumenta la jugosidad y el rendimiento en las hamburguesas. Por tanto, concentraciones de MP de 2% podrían proteger las hamburguesas de cerdo de la mayor pérdida por cocción. Estos resultados son similares a los encontrados por otros autores en hamburguesas y albóndigas de ternera, en donde concluyeron una disminución de las pérdidas por cocción con la inclusión de *Moringa oleifera* relacionada con la disminución de la Aw (Rasak *et al.*, 2021; Swastike *et al.*, 2024).

Durante el almacenamiento en refrigeración, el color de las hamburguesas se vio afectado significativamente ($p < 0,05$) por la incorporación de MP. Los valores de luminosidad (L^*), de la componente roja-verde (a^*) y amarilla-verde (b^*) disminuyeron con la MP ($p < 0,05$) (tabla 2), como era de esperar al incorporar un ingrediente con propiedades de color muy diferenciadas.

Los valores L^* disminuyeron considerablemente con la incorporación de MP, aunque esta disminución fue similar en las diferentes % MP. La L^* de los productos cárnicos depende de factores como pH, capacidad de retención de agua, contenido en grasa y agua libre de la matriz cárnica, que se ven afectadas al incorporar un ingrediente no cárnico (Sayas-Barberá *et al.*, 2021). En otros estudios con incorporación de ingredientes no cárnicos, atribuyen la disminución de la luminosidad a la formación de una estructura tipo gel entre las proteínas de la carne y el componente no cárnicos, que reflejarían menos la luz. Durante el almacenamiento la L^* disminuyó al igual que los valores de A_w debidos a cambios en la disposición del agua libre durante el almacenamiento.

La disminución de a^* con la incorporación MP, concuerda con otros estudios sobre la adición de hojas de moringa en hamburguesas de cerdo, que atribuyen este descenso a la pérdida de tonalidad roja por la dilución de los pigmentos cárnicos y a un menor valor de a^* de la MP ($a^* = -1,99$) (Al-Juhaimi *et al.*, 2016; Muthukumar *et al.*, 2014). Durante el almacenamiento, se observaron descenso de los valores a^* , relacionados con cambios en los estados de los hemopigmentos, oxidación de mioglobina y formación de metamioglobina (Sayas-Barberá *et al.*, 2021). Asimismo, la disminución de b^* a concentraciones concuerda con los resultados obtenidos en el estudio de Muthukumar *et al.* (2014), aunque en otros estudios se observó un aumento en b^* , lo que puede asociarse a la diferencia en la matriz cárnica (Al-Juhaimi *et al.*, 2016).

Tabla 2. Valores de las coordenadas de color (L^* , a^* y b^*) de hamburguesas de cerdo con diferentes porcentajes de moringa en polvo (0, 1%, 1,5% y 2%) durante su almacenamiento en refrigeración a 0, 2 y 4 días.

Parámetros	Lote	Tiempo (días)		
		0	2	4
L^*	0%	57,32 ± 4,18 ^{Ba}	52,48 ± 2,23 ^{Ac}	52,37 ± 2,32 ^{Ac}
	1 %	48,31 ± 1,20 ^{Ab}	46,54 ± 2,09 ^{Ab}	47,30 ± 1,75 ^{Ab}
	1,5 %	51,05 ± 3,12 ^{Cb}	40,81 ± 3,84 ^{Aa}	45,67 ± 1,89 ^{Bb}
	2%	51,22 ± 2,52 ^{Cb}	42,22 ± 3,38 ^{Bab}	37,90 ± 0,23 ^{Aa}
a^*	0%	7,15 ± 1,43 ^{Ac}	6,00 ± 1,00 ^{Ab}	6,59 ± 1,11 ^{Ab}
	1 %	3,72 ± 0,61 ^{Bb}	0,81 ± 0,67 ^{Aa}	1,24 ± 0,41 ^{Aa}
	1,5 %	1,54 ± 1,10 ^{Ba}	1,11 ± 0,67 ^{ABa}	0,40 ± 0,40 ^{Aa}
	2%	1,94 ± 2,12 ^{Aab}	0,29 ± 0,98 ^{Aa}	0,50 ± 0,06 ^{Aa}
b^*	0%	8,39 ± 1,54 ^{Aa}	11,43 ± 1,09 ^{Ba}	11,71 ± 2,03 ^{Bb}
	1 %	6,94 ± 0,66 ^{Aa}	13,11 ± 1,88 ^{Ba}	14,54 ± 0,57 ^{Bc}
	1,5 %	6,49 ± 2,45 ^{Aa}	11,37 ± 2,80 ^{Ba}	10,86 ± 1,53 ^{Bab}
	2%	6,45 ± 0,92 ^{Aa}	12,09 ± 3,30 ^{Ba}	9,05 ± 0,12 ^{Aa}

A-B Valores seguidos de letra mayúsculas en la misma línea indica diferencias entre muestreos (tiempos). a-c Valores seguidos de letra minúsculas en la misma columna indica diferencias entre lotes

En la figura 2 y 3 se resumen los resultados del análisis microbiológico. Los recuentos totales aumentaron durante el almacenamiento, obteniendo valores por encima de 6,5 log ufc, para todos los lotes. A día 4 en ninguno de los 3 lotes se alcanzan valores superiores a 7 log ufc/g, lo que estaría indicando que se encontraban dentro de los límites microbianos para ser considerado como un producto aceptable. Por encima de 7 log ufc /g en los productos cárnicos comienzan a reflejarse los primeros signos de alteración como son olores anormal y presencia de limo (Fernández-López *et al.*, 2006).

Sólo fue observado un efecto antimicrobiano de MP a tiempo 2 y a una concentración de 2%, pero este efecto no se observó a tiempo 4.

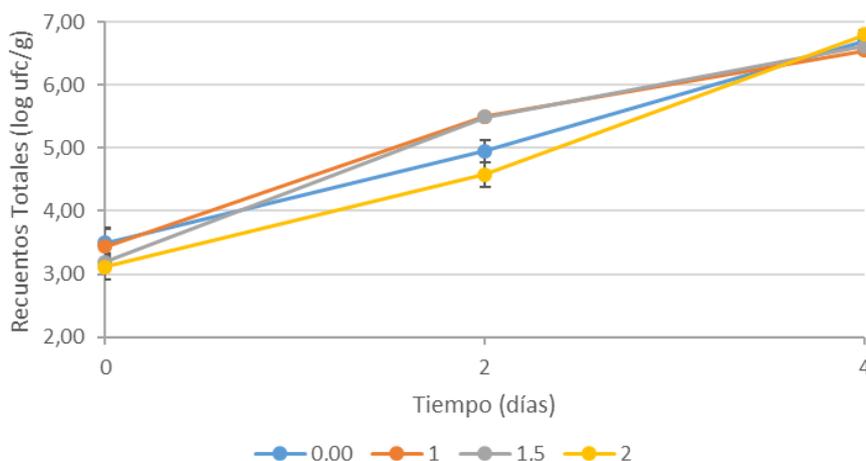


Figura 2. Resultados del análisis microbiológico de recuento totales en hamburguesas de cerdo con diferentes porcentajes de moringa en polvo 0, 1%, 1,5% y 2%, durante su almacenamiento a 0, 2 y 4 días

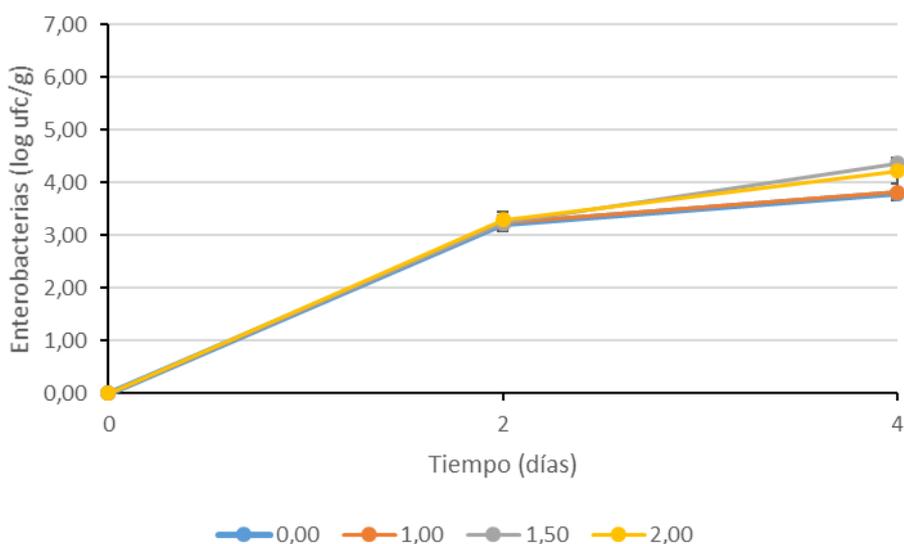


Figura 3. Resultados del análisis microbiológico de enterobacterias en hamburguesas de cerdo con diferentes porcentajes de moringa en polvo (MP) , 0, 1%, 1,5% y 2%, durante su almacenamiento a 0, 2 y 4 días.

A tiempo 0 los recuentos de enterobacterias fue 0, lo que indicaría que tanto la manipulación como el proceso de elaboración se llevaron a cabo en condiciones higiénicas adecuadas. La presencia de enterobacterias en la carne podría deberse a malas condiciones higiénicas durante la manipulación y el procesamiento de la carne y los productos cárnicos. Respecto a los recuentos de enterobacterias durante el almacenamiento, se observó un aumento durante la conservación, aunque no se observó diferencias entre los diferentes lotes.

En otros estudios se ha observado un efecto antimicrobiano de la moringa, pero en estos casos fueron extractos, y por tanto los compuestos con propiedades antimicrobianas, se encontrarían a mayores concentraciones (Ibrahim *et al.*, 2022).

Estudios previos han demostrado que la moringa contiene compuestos bioactivos como flavonoides, isotiocianatos y taninos, que poseen propiedades antimicrobianas y antioxidantes, las cuales pueden contribuir a la reducción del crecimiento microbiano en productos cárnicos. Por ejemplo, Rahman, et al.

(2020) encontraron que la adición de moringa en productos cárnicos redujo significativamente el crecimiento de microorganismos.

En nuestro estudio, las formulaciones con mayores concentraciones de moringa (1,5% y 2%) mostraron un control. La vida útil del producto es de 3 días, por lo que el recuento microbiológico en las muestras con MP aumentaría fuera de su vida útil (European Commission, 2005).

En la figura 4 se representan las características sensoriales de hamburguesas de cerdo con MP. La muestra control obtiene las valoraciones más altas en todos los atributos, seguida de las formulaciones con 1 y 1,5%. Las hamburguesas con 1% y 1,5% resaltan por su olor, con mayores valoraciones. Esto sugiere que esta concentración podría estar optimizando la liberación de compuestos aromáticos agradables sin llegar a un umbral que sea percibido negativamente (Jayawardana *et al.*, 2015). Sin embargo, las hamburguesas con 2% de MP presentan las valoraciones más bajas ($p < 0,05$). Estos resultados coinciden con estudios anteriores (Jayawardana *et al.*, 2015) donde concentraciones de 0,5% y 1% tenían efectos positivos sensorialmente, pero concentraciones superiores afectaban negativamente. El sabor es el atributo en el que más influye la inclusión de MP, afectando negativamente. Las muestras con 2% muestran una clara disminución en la aceptabilidad del sabor, lo que podría atribuirse al amargor o a un sabor astringente que aportan las las hojas de Moringa. Por otro lado, los tratamientos con control, 1% y 1,5% muestran valoraciones superiores, siendo el control el mejor valorado. Este hallazgo concuerda con los resultados del estudio de (Rahman *et al.*, 2020) donde las mejores valoraciones las obtuvo la formulación con un 0,3%. Esto sugiere que concentraciones de 1% o menos de Moringa son más adecuadas para mantener la aceptabilidad del sabor en productos cárnicos, mientras que concentraciones superiores pueden llevar a la generación de sabores no deseados.

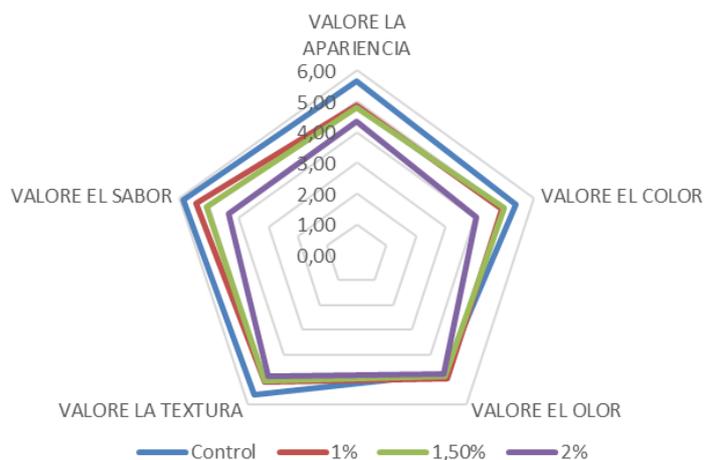


Figura 4. Análisis radial de los atributos sensoriales de hamburguesas de cerdo formuladas con diferentes concentraciones de Moringa oleifera en polvo (MP) , 0, 1%, 1,5% y 2%.

En el análisis del sabor de las hamburguesas con diferentes concentraciones de moringa, se observó que el grupo de control, sin moringa, no presentó un sabor distintivo, lo que indica una falta de características de sabor específicas. Al incorporar un 1% de moringa, los participantes comenzaron a identificar sabores como guisante, espinaca y brócoli. Aumentando la concentración a 1,5%, se observará un incremento notable en las percepciones de espinaca y brócoli. Finalmente, con un 2% de moringa, las respuestas que indicaban "nada" disminuyeron considerablemente, mientras que los sabores de guisante y brócoli se equilibraron, y resaltó el sabor a espinaca. Un 36,6% de los participantes identificaron el sabor a espinaca. Los sabores fueron claramente identificables, lo que sugiere que la moringa en concentraciones más altas proporciona un perfil de sabor más definido. En conclusión, la adición de moringa intensifica la percepción de sabores específicos, en especial el sabor a espinaca.

Conclusiones

Los resultados mostraron que la incorporación de moringa afectó al color, disminuyendo la luminosidad y la componente roja. Por otro lado, mejoró las propiedades de cocción debido a la reducción de la Aw de la matriz cárnica y por tanto disminuyendo el agua libre, lo que resultó en menores pérdidas por cocción. Lo que se relaciona con un mayor rendimiento y mayor jugosidad. Desde el punto de vista sensorial, las hamburguesas con un 1% y 1,5% de moringa fueron bien aceptadas, mientras que concentraciones más altas afectaron negativamente al sabor. El estudio demuestra que la moringa tiene un gran potencial como ingrediente funcional mejorando sus propiedades de cocción, aunque es fundamental optimizar su concentración para mantener la aceptabilidad sensorial. No obstante, concentraciones más altas de moringa podrían tener un mejor efecto antimicrobiano, pero estaría limitada por la disminución de la preferencia de los consumidores. Nuevas líneas de estudio podrían centrarse en la combinación sinérgica de moringa con otro ingrediente natural como una forma de mejorar la estabilidad de la carne sin afectar negativamente los atributos sensoriales, para su posible aplicación en sistemas alimentarios.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto titulado: *Estudio preliminar de la optimización de alimentos para mejorar el bienestar de la mujer mediante la selección de nuevos ingredientes sostenibles (FOOD-WOM)*. Referencia: VIPROY23/28 y ha sido financiado por la Universidad de Miguel Hernández De Elche.

Bibliografía

- AMSA. (2012)- Meat color measurement guidelines. American Meat Science Association. Champaign. IL USA.
- Abdallah, R., Mostafa, N. Y., Kirrella, G. A., Gaballah, I., Imre, K., Morar, A., & Elshebrawy, H. A. (2023). Antimicrobial effect of moringa oleifera leaves extract on foodborne pathogens in ground beef. *Foods*, 12(4), 766.
- Alirezalu, K., Pateiro, M., Yaghoubi, M., Alirezalu, A., Peighambardoust, S. H., & Lorenzo, J. M. (2020). Phytochemical constituents, advanced extraction technologies and techno-functional properties of selected Mediterranean plants for use in meat products. A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 100, 292-306.
- Al-Juhaimi, F., Ghafoor, K., Hawashin, MD, Alsawmahi, ON, y Babiker, EE (2016). Efectos de diferentes niveles de harina de semilla de Moringa (*Moringa oleifera*) en los atributos de calidad de las hamburguesas de carne de res. *CyTA-Journal of Food*, 14 (1), 1-9.
- Sayas-Barberá, E., Valero-Asencio, M. M., Navarro Rodríguez-Vera, C., Fernández-López, J., Haros, C. M., Pérez-Álvarez, J. Á., & Viuda-Martos, M. (2021). Effect of different black quinoa fractions (seed, flour and wet-milling coproducts) upon quality of meat patties during freezing storage. *Foods*, 10(12), 3080.
- Swastike, W., Kartikasari, L. R., Nuhriawangsa, A. M. P., Barido, F. H., & Hertanto, B. S. (2024). The effectiveness of enhanced Moringa oleifera leaves extract powder (MOLEP) in beef patties as a fortification on a well-done cooking method. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1292, No. 1, p. 012024). IOP Publishing.
- Trigo, C., Castelló, M. L., & Ortolá, M. D. (2023). Potentiality of Moringa oleifera as a nutritive ingredient in different food matrices. *Plant Foods for Human Nutrition*, 78(1), 25-37
- Chhikara, N., Kaur, A., Mann, S., Garg, M. K., Sofi, S. A., & Panghal, A. (2021). Bioactive compounds, associated health benefits and safety considerations of Moringa oleifera L.: An updated review. *Nutrition & Food Science*, 51(2), 255-277

Elkazaz, A., Allam, M. A., Ayad, E. H., Darwish, S. M., & Gomaa, M. A. (2024). Viability of Probiotic Strains in Moringa Aqueous Extract-Fortified Low-Fat Yogurt. *Journal of the Advances in Agricultural Researches*, 29(1), 49-63.

European Commission. (2005). Reglamento (CE) No 2073/2005 de la Comisión de 15 de noviembre de 2005 relativo a los criterios microbiológicos aplicables a los productos alimenticios. EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:32005R2073&qid=1493801672092>

Fernández-López, J., Jiménez, S., Sayas-Barberá, E., Sendra, E., & Pérez-Alvarez, J. A. (2006). Quality characteristics of ostrich (*Struthio camelus*) burgers. *Meat science*, 73(2), 295-303.

Gil Zanón, F. (2019). Caracterización de hojas de moringa (*Moringa oleifera* lam.) y optimización del secado por aire caliente.

Ibrahim, M. E. E. D., Alqurashi, R. M., & Alfaraj, F. Y. (2022). Antioxidant activity of Moringa oleifera and olive *Olea europaea* L. leaf powders and extracts on quality and oxidation stability of chicken burgers. *Antioxidants*, 11(3).

Islam, Z., Islam, S. R., Hossen, F., Mahtab-ul-Islam, K., Hasan, M. R., & Karim, R. (2021). Moringa oleifera is a prominent source of nutrients with potential health benefits. *International Journal of Food Science*, 2021(1), 6627265.

Jayawardana, B. C., Liyanage, R., Lalantha, N., Iddamalgoda, S., & Weththasinghe, P. (2015). Antioxidant and antimicrobial activity of drumstick (*Moringa oleifera*) leaves in herbal chicken sausages. *LWT-Food Science and Technology*, 64(2), 1204-1208.

Jideani, A. I., Silungwe, H., Takalani, T., Omolola, A. O., Udeh, H. O., & Anyasi, T. A. (2021). Antioxidant-rich natural fruit and vegetable products and human health. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 41-67.

Mashau, M. E., Munandi, M., & Ramashia, S. E. (2021). Exploring the influence of Moringa oleifera leaves extract on the nutritional properties and shelf life of mutton patties during refrigerated storage. *CyTA-Journal of Food*, 19(1), 389-398.

Mora, J. S., & Gacharná, N. (2015). El árbol milagroso: la moringa oleifera. *Biodiversidad Colombia*, 1(5), 45-58.

Moyo, B., Masika, P. J., Hugo, A., & Muchenje, V. (2011). Nutritional characterization of Moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaves. *African journal of biotechnology*, 10(60), 12925-12933.

Munekata, P. E. S., Rocchetti, G., Pateiro, M., Lucini, L., Domínguez, R., & Lorenzo, J. M. (2020). Addition of plant extracts to meat and meat products to extend shelf-life and health-promoting attributes: An overview. *Current Opinion in Food Science*, 31, 81-87.

Muthukumar, M., Naveena, B. M., Vaithyanathan, S., Sen, A. R., & Sureshkumar, K. (2014). Effect of incorporation of Moringa oleifera leaves extract on quality of ground pork patties. *Journal of food science and technology*, 51(11), 3172-3180.

Parafati, L., Palmeri, R., Trippa, D., Restuccia, C., & Fallico, B. (2019). Quality maintenance of beef burger patties by direct addition or encapsulation of a prickly pear fruit extract. *Frontiers in microbiology*, 10, 1760.

Rahman, M. H., Alam, M. S., Monir, M. M., & Rahman, S. M. E. (2020). Effect of Moringa oleifera leaf extract and synthetic antioxidant on quality and shelf-life of goat meat nuggets at frozen storage. *Int. J. Food Res*, 7(4), 34-45.

Rasak, A. N. M., Hajrawati, H., & Ningrum, E. M. (2021). Physical characteristic and antioxidant activity of beef meatballs with addition of Moringa oleifera (*Lam.*) leaves powder. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 788, No. 1, p. 012111). IOP Publishing.

Influencia de la humedad y condiciones de extrusión en las propiedades de proteínas hidrolizadas de guisante para la fabricación de análogos cárnicos

A. Greco ¹, M.D. Garrido ², I. Peñaranda ²

¹ Universidad de Murcia, 30100, Murcia, España: annamaria.grecog@um.es

² mgarrido@um.es; irene.penaranda@um.es

Resumen

A día de hoy es evidente como están proliferando las dietas basadas en productos vegetales debido a diferentes razones como salud, ética y cuidado del medio ambiente. Esta situación abre las puertas al mercado de los análogos cárnicos proteicos. La tecnología de extrusión de alta humedad permite obtener texturizados ricos en proteínas y con propiedades organolépticas parecidas a las de la carne. Por lo tanto, los objetivos del presente trabajo fueron los siguientes: por un lado, estudiar las características tecnológicas de dos fuentes de proteína de guisante: aislada y texturizada; por otro lado, evaluar el efecto del porcentaje de humedad/hidratación y las condiciones de extrusión en las características tecnológicas de los texturizados proteicos de guisante. A través de análisis de las propiedades de higroscopicidad y humedad, concluimos que a mayor grado de hidratación de la proteína de guisante menor es la energía mecánica necesaria para llevar a cabo el proceso de extrusión, lo que conlleva un menor uso de recursos y que una hidratación previa de la proteína aislada permite obtener directamente un análogo cárnico de alta humedad sin necesidad de una hidratación del texturizado antes de su empleo.

Palabras clave: extrusión de alta humedad, texturizado, análogos cárnicos, proteína de guisante.

Influence of moisture and extrusion conditions on the properties of hydrolyzed pea proteins for the manufacture of meat analogs

Abstract

To date, it is evident how plant-based diets are proliferating due to different reasons such as health, ethics, and environmental care. This situation opens the doors to the market of protein meat analogs. High-moisture extrusion technology allows obtaining textured products that are rich in proteins and have organoleptic properties similar to those of meat. Therefore, the objectives of the present work were as follows: on one side, study the technological characteristics of two sources of pea protein: isolated and textured; on the other hand, evaluate the effect of the percentage of moisture/hydration and the extrusion conditions on the technological characteristics of pea protein texturized. Through the analysis of hygroscopic and moisture properties, we concluded that the higher the degree of hydration of the pea protein, the less mechanical energy is needed to carry out the extrusion process, which leads to a lower use of resources. Moreover, pre-hydration of the isolated protein allows directly to obtain a high-moisture meat analog without the need for texturate hydration before use.

Keywords: high-moisture extrusion, texturized meat analogs, pea protein.

Introducción

Hoy en día, es evidente cómo han proliferado las dietas basadas en productos vegetales, creciendo exponencialmente en el mundo occidental. En los países desarrollados, la alimentación no solo cubre una necesidad, sino que se relaciona con la salud y el placer. Estas dietas alternativas suelen estar fundamentadas en una visión más naturista de la vida, donde la forma de alimentarse es crucial, impulsada por motivos de salud o medioambientales (Gimeno, 2002).

Organizaciones como la ONU (2010) señalan que las dietas basadas en productos animales requieren mayores recursos y generan más emisiones que las dietas basadas en vegetales. Por ello, se concluye

que nuestra dieta actual no es sostenible, y es necesario transitar hacia una dieta basada en plantas, alejándose de los productos de origen animal (Ecozap, 2023).

Con el incremento esperado de la población mundial en más de 2000 millones de personas para 2050, se prevé un aumento en la demanda de alimentos, especialmente de proteínas (United Nations, 2019). Esto plantea la necesidad de asegurar la sostenibilidad en la gestión de recursos mediante procesos más eficientes y el uso de nuevas fuentes proteicas para desarrollar una economía más competitiva, sostenible e integradora (Valverde, 2020). Como respuesta, ha surgido un nuevo segmento de mercado: los análogos cárnicos. Estos productos imitan la estructura fibrosa, color y aroma de la carne fresca y productos cárnicos procesados, siendo la textura uno de los mayores desafíos sensoriales en su desarrollo.

Entre las tecnologías para producir análogos cárnicos, la extrusión a altas temperaturas se destaca como un método clave para lograr texturas y propiedades organolépticas similares a la carne. Este proceso combina calor, presión y cizallamiento mecánico para desnaturalizar y reorganizar las proteínas vegetales, creando una matriz fibrosa que simula la estructura de la carne. Además, mejora el sabor, la textura y el valor nutricional, lo que influye en la aceptación por parte del consumidor.

En este estudio, se ha investigado el uso de la harina de proteína hidrolizada de guisante, analizando cómo el contenido de humedad y distintos parámetros de extrusión influyen en la creación de una materia prima adecuada para la fabricación de análogos cárnicos. A través de experimentos y análisis, se han evaluado las propiedades texturales, sensoriales y nutricionales de los productos obtenidos.

Objetivos

1. Estudiar las características tecnológicas de dos fuentes de proteína de guisante: aislada y texturizada.
2. Evaluar el efecto del porcentaje de humedad/hidratación y las condiciones de extrusión en las características tecnológicas de los texturizados proteicos de guisante.

Revisión bibliográfica

Análisis del sector de análogos cárnicos

Análogos cárnicos

Como se ha mencionado, debido al constante incremento de la población y por lo tanto de necesidad de recursos alimentarios, es imprescindible desarrollar nuevas tecnologías que permitan la fabricación de sustitutos de la carne y su aporte de proteína, para asegurar una dieta equilibrada para la población mundial a través de una alimentación sostenible para el medioambiente.

El gran reto se presenta porque, el consumidor habitual de carne, no está dispuesto a sacrificar la experiencia hedónica que supone el consumo de este tipo de productos por alternativas más sostenibles e incluso saludables, pero de menor calidad sensorial.

Gracias a las avanzadas tecnologías actuales, los análogos cárnicos logran imitar la textura, sabor, aroma y apariencia de la carne, proporcionando una experiencia gastronómica similar a la de los productos cárnicos tradicionales. Estos se pueden clasificar en vegetales texturizados (soja, guisantes,..), celulares (carne cultivada), y microbianos. Sin embargo, el principal ingrediente utilizado para estos productos es la proteína vegetal texturizada (TVP) (Kaleda et al., 2020; Sha & Xiong, 2020).

En este sentido, la tecnología de extrusión para la obtención de estructuras proteicas alternativas a la carne, se presenta como una de las líneas tecnológicas de mayor repercusión y potencial en este campo. Esta tecnología existe desde hace muchos años en la industria alimentaria, puesto que se utiliza, por ejemplo, para producir diferentes pastas, cereales para el desayuno, galletas, alimentos infantiles, productos de confitería, chicles, piensos para mascotas y snacks.

Actualmente, existen dos vías principales para obtener texturizados para análogos cárnicos: por un lado, la extrusión de alta humedad (High Moisture Extrusion Cooking: HMEC), que permite obtener

alimentos proteicos fibrosos con características sensoriales comparables a la del músculo de la carne. En este caso, se utiliza un extrusor de doble husillo co-rotante y entrelazados que permiten trabajar con materia prima con alto contenido de humedad. La boquilla de salida es de mayor distancia que la del método LMEC, lo cual permite el enfriamiento del producto evitando así la expansión. El producto obtenido, debido a su elevado contenido de humedad (50-70%), debe conservarse en refrigeración y tiene una vida útil corta. Son productos intermedios que, tras la aplicación de cocinado final (fritura, horneado, cocción, etc) pueden ser consumidos directamente.

La otra vía para obtener análogos cárnicos es la extrusión a baja humedad: ésta da lugar a texturizados proteicos vegetales con una apariencia fibrosa, seca, heterogénea y expandida. Después de la cocción por extrusión los productos se secan, lo cual permite una fácil conservación y una larga vida útil. Por otro lado, estos productos requieren de un proceso de hidratación antes de su consumo (Berk et al., 1992; Riaz, 2011). Pueden ser consumidos directamente o como ingrediente que aporta textura a análogos cárnicos.

Fuentes vegetales de proteínas

La proteína vegetal es considerada de baja calidad, debido a que las principales fuentes de proteínas, los cereales y las legumbres, no aportan un perfil de aminoácidos completo debido a que carecen de un aminoácido esencial y tienen muy baja cantidad de otros. Por esta razón, para asegurarse el aporte completo de aminoácidos esenciales que constituye una proteína completa y de alta calidad, se aconseja el consumo de estas dos fuentes de proteína simultáneamente. Los cereales con mayor contenido en proteína son avena, kamut y espelta por otro lado, las legumbres con mayor contenido en proteína son soja, altramuces y lentejas.

Otra fuente importante de proteínas vegetales son los frutos secos. En general estos no contienen los 9 aminoácidos esenciales, pero consumidos junto a otras fuentes de proteínas pueden contribuir en la obtención del perfil de proteína completa de alta calidad. Los frutos secos con mayor contenido en proteína son: cacahuets, almendras y pistachos.

En España nos encontramos con que la leguminosa a la que más superficie de cultivo se dedica es al guisante seco (60%). Cabe destacar de este cultivo, que es el único de entre las leguminosas que ha aumentado durante los últimos años (Gonzalez-Bernal y Rubiales, 2016).

El guisante, como la mayoría de las legumbres, es rico en nutrientes como proteínas, hidratos de carbono y ciertos minerales. El macronutriente en mayor proporción son los hidratos de carbono (57,97%), seguidos de proteína (22,36%), fibra total (16,7%), y finalmente un bajo contenido en grasa (2,38%) (Gomez, 2021).

El guisante, presenta un porcentaje algo menor que la soja que es la leguminosa que más proteínas contiene, pero en cuanto a su digestibilidad, las proteínas de guisante (73.5%) (Habiba, 2002) son mejores que las proteínas de soja (61%) (Hoffman, 2013) esto entre otras cosas, debido a que la soja tiene grandes cantidades de unidades inhibidoras de proteasas. Los guisantes poseen suficientes cantidades de aminoácidos esenciales para cumplir con los requisitos de la nutrición humana, pero con la excepción del contenido en aminoácidos sulfurados, lo que provoca que el valor biológico de las proteínas no sea tan bueno como en otros alimentos (Sosulski, 1979). Aunque como en todas las legumbres, los contenidos de aminoácidos azufrados cisteína y metionina, y de triptófano, son muy bajos, cabe destacar de los guisantes que, estos valores, son un poco más altos que en el resto de las legumbres (Evans y Bouter, 1980).

Hace tiempo que se intenta sustituir la proteína de soja por otras proteínas procedentes de legumbres, y la proteína de guisante, gracias a las propiedades funcionales que posee, parece perfecta para ello (O'Kane et al., 2004). Una de las razones por la que se intenta sustituir por el guisante es la baja probabilidad que tienen estos de producir reacciones alérgicas en los humanos.

Texturización

Proceso de extrusión

De acuerdo con Callejo (2002), la extrusión se define como “el moldeado o conformación de una sustancia blanda o plástica mediante tratamientos por calor, fuerza de corte y fricción mecánicas, hasta hacerla pasar por un orificio con forma especial para conseguir una estructura y características del producto terminado”.

Guy (2001) describe a esta tecnología como un proceso térmico de alta temperatura-corto tiempo (HTST) que involucra el flujo forzado de un material a diferentes condiciones controladas de mezclado, cocido, amasado, formado, expansión y secado. Dependiendo de las materias primas y de las características deseadas para el producto final, el extrusor puede operar con baja, media o alta cizalla. Como ejemplos, la pasta y los productos cárnicos procesados son producidos con bajo cizallamiento; análogos de carne y algunos alimentos para mascotas, se producen con mediano nivel de cizallamiento y, cereales para el desayuno y proteínas vegetales texturizadas son producidas con alto cizallamiento. Para realizar una extrusión, se necesita el extrusor, que es una máquina para moldear materiales por el proceso de cambio de presión y calor, y consta de un tornillo de Arquímedes o sin fin con los álabes helicoidales adheridas a su alrededor, con rotación corta, en una estrecha armadura cilíndrica (Mujica et al., 2006).

Como mencionado en el apartado 3.1.1, podemos clasificar la extrusión en dos procesos distintos en función del contenido de humedad del producto: extrusión con baja humedad (LMEC, Low Moisture Extrusion Cooking), extrusión con alta humedad (HMEC, High Moisture Extrusion Cooking).

En todo el proceso de la extrusión y, en función del diseño que se haya adoptado, se pueden diferenciar diversas fases:

En una primera fase en la que la estructura proteica tridimensional se destruye debido a la hidrólisis de los enlaces peptídicos, provocando el despliegue de las cadenas de los aminoácidos, y posteriormente, estas cadenas de aminoácidos desplegadas se reorganizan, gracias a la formación de enlaces cruzados por medio puentes disulfuro y enlaces de hidrógeno, entre las cadenas proteicas desnaturalizadas. Este paso es el que otorga una estructura fibrosa al texturizado final. La mayoría de los estudios concuerdan en que después de un proceso de extrusión se mejora la digestibilidad de las proteínas. La desnaturalización de las proteínas y la exposición de grupos hidrofóbicos proporciona una gran superficie disponible de las proteínas para ser digeridas enzimáticamente (Alonso et al., 2000; Arêas, 2016). No obstante, la digestibilidad de las proteínas está influenciada por los parámetros de la extrusión. Zhang et al., (2017), encontraron en su estudio que la digestibilidad de las proteínas aumentaba cuando se aplican mayores humedades a la extrusión (>30%). Además, la reducción de compuestos antinutricionales, como fitatos o inhibidores de proteasas aumentan la digestibilidad, ya que estos compuestos limitan su biodisponibilidad.

Materiales y Métodos

Materias primas

La proteína de guisante hidrolizada utilizada para la formulación de este trabajo es de la marca BulkTM,(Londres). Se trata de aislado de proteína de guisante, con alto contenido de proteína (78%) y bajo contenido en grasa y azúcar.

Se ensayaron tres porcentajes de humedad: 40/50/60%, obteniendo tres grupos de trabajo (Tratamiento 40%, Tratamiento 50%, Tratamiento 60%).

Proceso de extrusión

Las muestras de harina de guisante descritas en el apartado 4.1 se introdujeron en un extrusor de doble husillo corrotante (TSA de Industriales s.a.s, Italia). Las partes principales del equipo se muestran en la Figura 1. Estas son: el motor, la tolva de alimentación en la parte superior, a la izquierda se encuentran

los dos husillos que giran en sentido paralelo, al final de la zona de husillos está la boquilla con la sonda de control de temperatura y presión de salida.

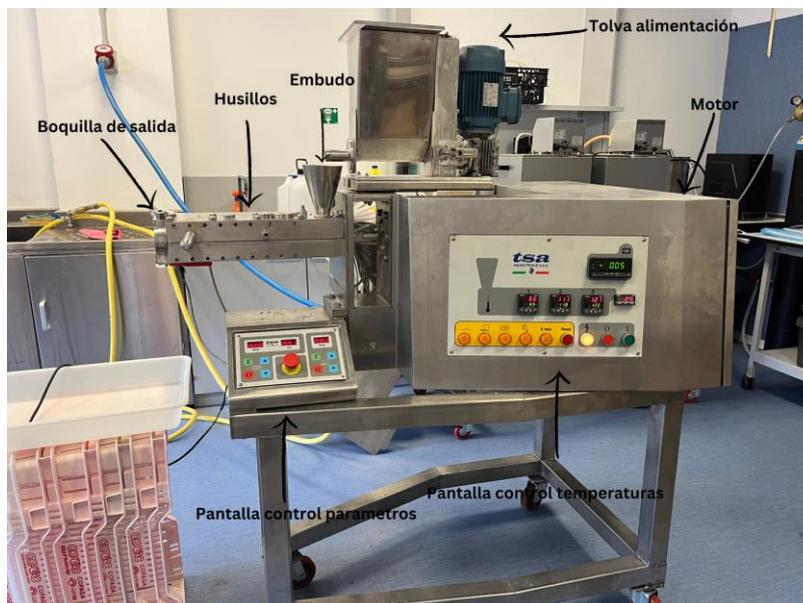


Figura 1. Extrusora

Se realizó un ensayo de extrusión por cada Tratamiento (40,50,60%) utilizando diferentes condiciones de temperaturas y velocidad de tornillo en cada caso (Tabla 1).

Una vez obtenidos los productos texturizados, cada uno de ellos se almacenó en bolsas herméticas a -18°C hasta su análisis.

Tabla 1. Condiciones de extrusión

Tratamiento	rpm	% Humedad	Ta 1	Ta 2	Ta 3	T salida	A%
1	150	40	65°C	110°C	120°C	40°C	25
2	200	50	80°C	130°C	150°C	60°C	15
3	250	60	90°C	160°C	180°C	74°C	13

Análisis propiedades tecnológicas

Se procedió con el análisis de diferentes propiedades tecnológicas de las 6 muestras para poder observar como, por un lado, el contenido de humedad y por otro lado los parámetros de extrusión aplicados, hayan influido en las propiedades tecnológicas de la proteína de guisante. Por lo tanto, los análisis realizados en las 6 muestras han sido: higroscopicidad, humedad, rendimiento y energía mecánica específica (SME).

Resultados y discusión

En la Tabla 2, se recogen los valores medios de presión de torque, temperatura de salida de la boquilla y energía mecánica específica del proceso (SME) de las muestras estudiadas. La energía mecánica específica es el trabajo mecánico que produce el motor del extrusor y se transforma en calor que se acumula en el material. Cuanto más alta sea la energía específica mecánica más calor se genera. Este parámetro influirá en la calidad del producto final, ya que condiciona la expansión, densidad y textura de los productos. (Estrada, 2016).

Los valores de SME se calcularon con la ecuación de Peñaranda et al. (2023), utilizando la presión del torque (C, N m), la velocidad del tornillo medida en rpm (V, rad s⁻¹) y el caudal másico (Q, g s⁻¹). Por lo tanto, la ecuación resultante sería:

$$SME \left(\frac{kg}{h} \right) = \frac{\text{presión torque} \cdot \text{velocidad tornillo}}{\text{caudal masico}}$$

Se observa que, al aumentar la temperatura y la humedad, disminuye el valor de SME. Esto, porque la degradación de los componentes durante el procesado depende de parámetros como la velocidad de tornillo, la temperatura y la humedad.

En concreto, al aumentar la temperatura y la humedad, se reduce la viscosidad del producto, haciendo que la masa fluya mejor, reduciendo las fricciones y la energía mecánica específica (Leonard et al., 2019). Cabe mencionar que, cuando la materia prima tiene alto contenido en proteína, la SME es menor en comparación a la obtenida en la extrusión de cereales. En el presente trabajo, en el que la materia prima es guisante el alto contenido de proteína y bajo contenido de almidón de la mezcla de alimentación dio como resultado menor viscosidad de la masa, y por eso la SME observada en el estudio anterior fue menor.

Tabla 2. Valores medios de presión de torque, temperatura de salida de la boquilla y energía mecánica específica del proceso (SME) de las muestras estudiadas.

Tratamiento	Presión torque (%)	Temperatura salida (°C)	SME
40%	25	40	75
50%	15	60	60
60%	13	74	65

En la Figura 2 se muestran los resultados del rendimiento obtenido durante el proceso de extrusión en relación con los tres tratamientos de hidratación aplicados a la harina de proteína de guisante (40, 50, 60% de humedad).

El rendimiento se midió relacionando el volumen de alimentación con el volumen de producto extrusionado durante un minuto de tiempo, pasando posteriormente el resultado a kg/h. En el histograma, observamos que no hay diferencia significativa ($p \geq 0.05$) entre el rendimiento del texturizado proteico de guisante con 40% de humedad y la de 60% de humedad. Al contrario, si se muestran diferencias significativas ($p > 0.05$) entre estos tratamientos (40-60% humedad) y el rendimiento obtenido para el texturizado proteico con 50% de humedad, donde este último tubo un mayor rendimiento Por lo que, se podría decir que, las condiciones de extrusión (velocidad de los tornillos de 200 rpm y una temperatura de salida de 150°C), fueron más eficientes con proteína de guisante al 50% de hidratación.

El peso a la salida ha variado muy poco con respecto al peso de la alimentación, por lo tanto, cabe la probabilidad que los rpm de la velocidad del tornillo no fueran suficientes para los productos con 40-60% de contenido de humedad.

Observando los resultados de la Tabla 2, y como se puede apreciar en la Figura 3, donde se observa la calidad final de los tres texturizados proteicos (40-50-60% humedad), el texturizado con 50% de humedad presenta una textura más pulverulenta, quebradiza, quedando gran parte de esta proteína sin texturizar por lo que probablemente, las condiciones de extrusión no eran óptimas en el caso de la de proteína de guisante al 50% de humedad para conseguir una textura más fibrosa que imite la carne. De ahí que el rendimiento obtenido del proceso (Figura 2), fuera superior al de los otros dos productos

($P \leq 0.05$), ya que gran parte de la proteína se ha quedado sin texturizar. Por tanto, la energía mecánica del proceso es menor, porque al no formarse el texturizado, la energía necesaria para el paso del producto a través de la boquilla es mínima. (Blanco et. al, 2022)

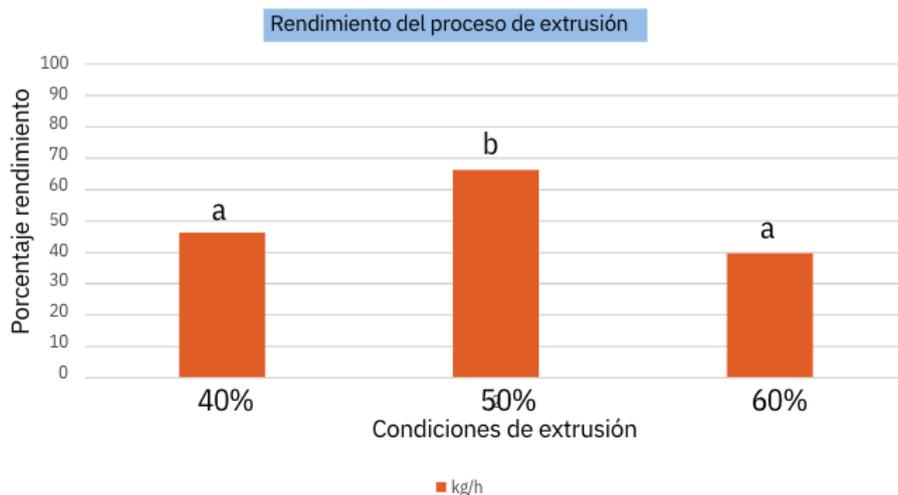


Figura 2. Histograma del rendimiento del proceso.

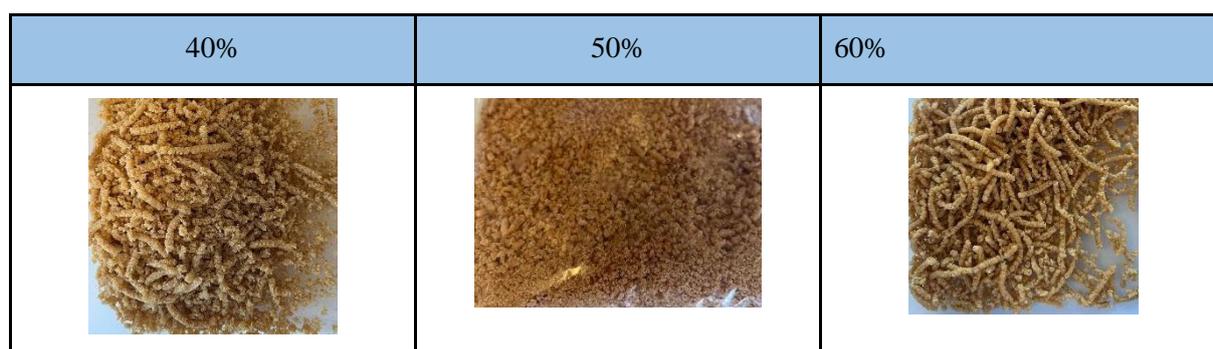


Figura 3. Productos texturizados.

En la Tabla 3, se muestran los resultados obtenidos para la humedad e higroscopicidad a diferentes días de control (2h, 24h, 4d, 7d).

En el análisis de humedad, se observan diferencias significativas ($P > 0.05$) entre los tres tratamientos con diferentes contenidos en humedad (40, 50 y 60%) tanto en la proteína en polvo como en la texturizada, como cabría esperar.

Debido al tratamiento de extrusión se muestran diferencia significativa ($P > 0.05$) en los tres tratamientos de hidratación de la proteína de guisante. Con lo cual, podemos concluir que la temperatura y la presión aplicadas durante la extrusión influyen en el contenido de humedad de la proteína hidrolizada del guisante.

En el estudio de Peñaranda et al. (2023), llevado a cabo con proteína de guisante enriquecida deshidratada, observaron que, a la hora de comparar la higroscopicidad, los productos texturizados absorbieron la mitad de agua del ambiente con respecto a los productos en polvo. Eso se traduce en que los productos texturizados resultaron más estables. Este patrón no se refleja en el presente trabajo, pero hay que tener en cuenta que el texturizado de guisante utilizado en este trabajo es de alta humedad.

En otro estudio llevado a cabo con harina de yuca enriquecida en fibra (Navia et al., 2013), se observó que las muestras texturizadas presentaron alta capacidad de retención de agua. Es posible que sea debido a los cambios estructurales provocados por el proceso de termo-compresión, ocasionando un incremento de los puntos activos de sorción de agua en la fase sólida del material. Aunque seguramente la redistribución estructural haya influido en la absorción de agua en los texturizados de guisante de este estudio, no se aprecia un patrón que pueda relacionar los resultados de higroscopicidad medidos antes y después del proceso de extrusión.

En el caso de la higroscopicidad medida a las 2 horas, en la proteína hidrolizada en polvo no hay diferencia significativa ($p \geq 0.05$) debida a los tratamientos de hidratación (40,50 y 60%), pero sí para la proteína texturizada ($p \leq 0.05$).

En la higroscopicidad medida a las 24 horas en productos con tratamiento de hidratación diferente, no se observa diferencia significativa ($p \geq 0.05$) entre el producto en polvo con 50 y 60% de contenido de humedad, pero sí entre estos dos y el producto en polvo con 40% de humedad tanto en la proteína en polvo como texturizada ($p \leq 0.05$).

Para la higroscopicidad medida a los 4 días y a los 7 días se pueden ver diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los productos en polvo y texturizados debido a los tratamientos de hidratación (40,50,60%).

En cuanto al efecto del tipo de proteína hidrolizada (polvo y texturizada), se aprecia que el proceso de extrusión influye significativamente en la higroscopicidad de las muestras estudiadas ($p > 0.05$), presentando, en general la proteína texturizada, una menor higroscopicidad negativa en todos los días de control, por tanto, la capacidad de los texturizados con alta humedad para perder agua fue menor debido a su menor contenido de humedad.

Destacando algunos resultados de higroscopicidad en los productos en polvo y los texturizados, a las 24h observamos diferencias significativas ($p > 0.05$) solo en el tratamiento 50 y 60% de humedad debido al efecto del proceso de extrusión.

Después de 7 días también se aprecia diferencia significativa ($p > 0.05$) debida al proceso de extrusión entre productos con el mismo contenido de humedad, pero midiendo la higroscopicidad antes y después de la texturización.

Tabla 3. Valores medios y desviación estándar de la humedad (H) e higroscopicidad (Hi 2h, Hi 24h, Hi 4d, Hi 7d) de la proteína hidrolizada en polvo y texturizada. Las medias con letras distintas son significativamente diferentes a $p < 0.05$. *a, b, c: Efecto de tratamiento (40, 50 y 60%). **x, y: Efecto del tipo de proteína hidrolizada (polvo y texturizada).

		H	Hi 2h	Hi 24h	Hi 4d	Hi 7d
POLVO	40%	39.500±0.19 ^{a,x}	-6.898±0.83 ^x	-7.886±2.24 ^b	-11.272±0.48 ^{a,x}	-14.301±0.45 ^{c,x}
	50%	47.560±0.374 ^{b,x}	-5.989±0.57 ^x	-5.989±0.57 ^{a,x}	-18.162±0.51 ^{b,x}	-19.828±0.94 ^{b,y}
	60%	57.014±1.27 ^{c,x}	-6.06±0.21 ^x	-6.062±0.21 ^{a,x}	-30.721±1.35 ^{c,x}	-32.121±1.01 ^{a,y}
TEXTURIZADO	40%	36.115 ±0.67 ^{a,y}	-4.07±0.737 ^{b,y}	-5.574±0.26 ^b	-5.517±0.74 ^{c,y}	-18.289±2.03 ^{b,y}
	50%	44.498± 1.03 ^{b,y}	-10.434±01.93 ^{a,y}	-10.434±1.93 ^{a,y}	-15.432±1.67 ^{b,y}	-9.898±0.46 ^{c,x}
	60%	52.282±0.59 ^{c,y}	-2.103±0.61 ^{b,y}	-11.676±1.83 ^{a,y}	-23.337±1.49 ^{a,y}	-29.876±1.75 ^{a,x}

Conclusiones

1. Las condiciones de extrusión evaluadas han permitido obtener texturizados proteicos de guisante de alta humedad con buenas propiedades tecnológicas.
2. El grado de hidratación de la proteína de guisante ha influido en las características funcionales estudiadas de esta proteína y en la energía mecánica específica (SME) del proceso de extrusión.
3. A mayor grado de hidratación de la proteína de guisante menor es la energía mecánica necesaria para llevar a cabo el proceso de extrusión, lo que conlleva un menor uso de recursos.
4. Cuanto mayor es el contenido en humedad de la proteína de guisante menor mayor la higroscopicidad negativa. Esto demuestra que, una hidratación previa de la proteína aislada permite que durante la extrusión el agua quede retenida en la matriz proteica, consiguiendo de esta manera obtener directamente un análogo cárnico de alta humedad sin necesidad de una hidratación del texturizado antes de su empleo.

Agradecimientos

Agradezco al Departamento de Tecnología de los Alimentos de la Universidad de Murcia para haberme permitido colaborar en este proyecto y desarrollar mi Trabajo de Fin de Grado con ellas.

Bibliografía

Referencias de artículos

- Allende, D. R., Díaz, F. F., & Agüero, S. D. (2017). Ventajas y desventajas nutricionales de ser vegano o vegetariano. *Revista Chilena De Nutrición*, 44(3), 218–225. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182017000300218>
- Alonso, R., Orúe, E., Zabalza, M. J., Grant, G., & Marzo, F. (2000). Effect of extrusion cooking on structure and functional properties of pea and kidney bean proteins. *Wiley Online Library*. [https://doi.org/10.1002/1097-0010\(200002\)80:3](https://doi.org/10.1002/1097-0010(200002)80:3)
- Aznar, B. I. C., Mestres, G. O., Hernando, P. M., Alejandre, M. B., Casao, E. G., & López, C. B. (2022). Consideraciones nutricionales de la dieta vegetariana y vegana. *Artículo monográfico*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8586961>
- Awuchi, C. G., Victory, I., & Echeta, C. K. (2019). The functional properties of foods and flours. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/337403804_The_Functional_Properties_of_Foods_and_Flours
- Blanco Espeso y Acebes Martínez, División de Agroalimentación y Procesos, Centro Tecnológico CARTIF (2022). La importancia de la Energía Mecánica Específica en extrusión. *Interempresas*. <https://www.interempresas.net/Alimentaria/Articulos/394672-La-importancia-de-la-Energia-Mecanica-Especific-a-en-extrusion.html>
- Casamayor, S. M., & Martínez, P. A. (2021). Química de la alimentación vegana relacionada con la salud mental. *Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8553326>
- Espeso, B. B. (2020). Estudio de la tecnología de extrusión para la valorización de subproductos vegetales y nuevas aplicaciones en leguminosas como ingredientes de productos para alimentación humana. <https://doi.org/10.36443/10259/4515>
- F, C. B., Williams, P., Neira, O., V., & Godoy, C. (2013). Correlación entre degradabilidad ruminal de la proteína cruda in situ e in vitro de alimentos proteicos de origen vegetal. *Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6835058>

Jimeno, E. (2002, October 1). Formas alternativas de alimentación. *Offarm*. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-formas-alternativas-alimentacion-13038005>

Guéritte, M., Fratte, E. D., Van De Velde, L., Eeckhout, M., & Debonne, E. (2023). Effect of wheat dextrin on corn flour extrusion characteristics. *Heliyon*, 9(11), e21827. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21827>

Gümüşay, Ö.A., Şeker, M., & Sadıkoğlu, H. (2019). Response Surface Methodology for Evaluation of the Effects of Screw Speed, Feed Moisture and Xanthan Gum Level on Functional and Physical Properties of Corn Half Products. *LWT*, 111, 622–631.

Hernández, C. E. T., Perafán, E. A., Collazos, M. G. E., & Portilla, Y. P. (2017). Evaluación del efecto del proceso de extrusión en harina de quinua (*chenopodium quinoa willd*) normal y germinada. *Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6117935>

Maniñgat, C. C., Jeradechachai, T., & Buttshaw, M. R. (2021). Textured wheat and pea proteins for meat alternative applications. *Cereal Chemistry*, 99(1), 37–66. <https://doi.org/10.1002/cche.10503>

Martínez-Casamayor, S., & Andreo-Martínez, P. (2021). Química de la alimentación vegana relacionada con la salud mental. *Revista Discapacidad, Clínica, Neurociencias*, 8(1), 52–59. <https://doi.org/10.14198/dcn.19780>

María, V. Q. A., & Martín, I. R. (2021). Estudio bibliográfico sobre las proteínas procedentes del guisante para la elaboración de texturizados y análogos cárnicos. Universidad De Salamanca. <https://gedos.usal.es/handle/10366/156711>

Navarro-González, I., García-Valverde, V., García-Alonso, J., Periago, M.J. (2011). Chemical profile, functional and antioxidant properties of tomato peel fibre. *Food Res. Int.*, 44, 1528–1535.

Peñaranda, I., Garrido, M. D. P., García-Segovia, P., Martínez-Monzó, J., & Igual, M. (2023). Enriched pea protein texturing: physicochemical characteristics and application as a substitute for meat in hamburgers. *Foods*, 12(6), 1303. <https://doi.org/10.3390/foods12061303>

Ramírez, B. D. G., & Gutiérrez, A. M. G. (2020). Percepción de los profesionales sanitarios de una región de Colombia sobre las dietas vegetarianas. *Revista Española De Nutrición Humana Y Dietética*, 25(2), 177–188. <https://doi.org/10.14306/renhyd.25.2.1105>

Samard, S., & Ryu, G. (2019). Physicochemical and functional characteristics of plant protein-based meat analogs. *Journal of food processing and preservation*. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14123>

Sha, L., & Xiong, Y. L. (2020). Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.022>

Referencias de libros

Imram, N., Gomez, I., & Soh, V. (2018). *Soya Handbook*. TetraPak Processing System AB.

Riaz, M. (Ed.). (2000). *Extruders in food applications*. CRC press: Taylor and Francis group.

Referencias de base de datos

Análogos cárnicos y proteína texturizada: ¿Qué tecnología hay detrás de estos productos? (n.d.). <https://www.industriaalimentaria.org/blog/contenido/analogs-carnicos-y-proteina-texturizada-que-tecnologia-hay-detras-de-estos-productos>

BulkTM. (n.d.). BulkTM | Proteínas, suplementos deportivos, vitaminas y más. <https://www.bulk.com/es/>

Byça. (2020, March 14). DETERMINACIÓN DE HUMEDAD EN ALIMENTOS POR DIFERENTES MÉTODOS. <https://www.mundotecnologicoalimentario.com/2020/03/determinacion-de-humedad-para.html>

Eurocarne Digital. (n.d.). <https://eurocarne.com/revista?id=305>

Valverde, M. (2022, February 16). Análogos cárnicos y proteína texturizada: ¿Qué tecnología hay detrás de estos productos? *AINIA*. <https://www.ainia.es/ainia-news/analogos-carnicos-proteina-texturizada-tecnologia-productos/>

Referencias de Tesis

Trabajo Fin de Grado, Alvarez (2021). Vegetarianismo y veganismo en el mercado español. *Universidad de Valladolid*.

Trabajo Fin de Grado, Murillo (2020). Aplicación de la tecnología de extrusión en productos con alto contenido en proteína. *Universitat Politècnica de València*.

Trabajo Fin de Máster, Alvarez (2019). Vegetarianismo y veganismo en España. *Universidad de Oviedo*. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/59482/Vegetarianismo%20y%20veganismo%20en%20Espa%C3%B1a.pdf>

Trabajo Fin de Máster, Ivorra (2016). Nutrición y salud en la dieta vegana. *Universidad Oberta de Catalunya*.

Efecto de la inclusión de brácteas de alcachofa en la dieta de cabras Murciano-Granadinas en la calidad de leches fermentadas

J. Galindo-Espinosa¹, E. Sendra-Nadal² y R. Muelas-Domingo²

¹ Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), Ctra. Beniel, km 3,2, 03312 Orihuela, Alicante, España.
jennifer.galindo@goumh.umh.es

² Departamento de Tecnología Agroalimentaria, Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), Ctra. Beniel, km 3,2, 03312 Orihuela, Alicante, España

Resumen

Este estudio investiga el impacto del uso de subproductos ensilados de brácteas de alcachofa en la dieta de cabras Murciano-Granadinas lecheras en la calidad y características de las leches fermentadas. Se llevaron a cabo pruebas utilizando diferentes cultivos lácticos (*YOMIX300*, *MA400*, *Lb paracasei* 277, *Lc lactis lactis* 4042) en dos grupos de muestras: uno con una dieta convencional y otro con el subproducto de brácteas de alcachofa. Se realizaron análisis de varianza considerando dos factores principales: la dieta (control y subproducto de brácteas) y el tiempo de almacenamiento en refrigeración (48 horas y 30 días). Se evaluaron: recuentos microbiológicos en las leches fermentadas, estabilidad del gel (pH, desuerado, grasa y proteína en el suero, lactosa y materia seca del suero), composición general (incluyendo ácidos orgánicos y azúcares) y perfil de ácidos grasos en las leches y leches fermentadas. El estudio tiene como objetivo determinar si la inclusión del subproducto ensilado de brácteas de alcachofa en la dieta afecta significativamente la calidad y características de estos productos lácteos, proporcionando información valiosa sobre su potencial uso como ingrediente en la formulación de dietas de cabras lecheras.

Palabras clave: *YOMIX300*, *MA400*, *Lactobacillus paracasei subsp. paracasei*, *Lactococcus lactis subsp. Lactis*, economía circular.

Effect of artichoke bract inclusion on the diet of Murciano-Granadina goat on the quality of fermented milks

Abstract

This study investigates the impact of using silage of artichoke bract by-products in the diet of Murciano-Granadina dairy goats on the quality and characteristics of fermented milk. Tests were conducted using different starter cultures (*YOMIX300*, *MA400*, *Lb paracasei* 277, *Lc lactis lactis* 4042) in two groups of samples: one with a conventional diet and the other with the artichoke bract by-product. Analysis of variance was performed considering two main factors: diet (control and bract by-product) and storage time (from fermentation to 48 hours and up to 30 days of cold storage). Several parameters were evaluated: microbiological counts in fermented milk, gel stability (pH, whey syneresis, fat and protein in the whey, lactose and dry matter in the whey), general composition (including organic acids and sugars), and fatty acid profile in milk and fermented milk. The study aims to determine whether the inclusion of the artichoke bract by-product in the diet significantly affects the quality and characteristics of these dairy products, providing valuable information on its potential use as an ingredient in dairy goat's diets.

Keywords: *YOMIX300*, *MA400*, *Lactobacillus paracasei subsp. paracasei*, *Lactococcus lactis subsp. Lactis*, sustainable economy.

Introducción

La industria agrícola y alimentaria está en constante búsqueda de estrategias innovadoras que permitan reducir el desperdicio y promover la sostenibilidad mediante el aprovechamiento de subproductos agrícolas. En España, uno de los principales productores de alcachofas (*Cynara cardunculus*) en

Europa, se genera un volumen considerable de residuos de brácteas durante la cosecha y procesamiento de esta hortaliza. Aproximadamente el 30% del peso total de la alcachofa corresponde a estas estructuras foliares (Llorach et al., 2003), lo que representa una oportunidad significativa para explorar su potencial como fuente alternativa de nutrientes y compuestos bioactivos.

Las brácteas de alcachofa son ricas en fibra dietética, antioxidantes y otros compuestos beneficiosos para la salud humana. Estos incluyen polifenoles y flavonoides que han demostrado tener propiedades protectoras contra enfermedades crónicas (Pandino et al., 2011; Sánchez-Moreno et al., 2020). Aunque la investigación sobre el uso de subproductos agrícolas en la alimentación animal está en desarrollo, estudios previos han mostrado resultados prometedores en el aprovechamiento de residuos vegetales como alimento para cabras, con efectos positivos en la calidad de la leche y la salud animal (Monllor y Muellas, 2019).

Además, se ha investigado el impacto del ensilado de estos subproductos en sus propiedades nutricionales, confirmando que el proceso de ensilado no afecta negativamente a sus componentes bioactivos y valor nutricional (Monllor y Muellas, 2020). Este conocimiento respalda la viabilidad de utilizar las brácteas de alcachofa como ingredientes funcionales en la alimentación animal, incluyendo la producción de leche fermentada de cabras.

En este estudio, se emplearon diferentes cultivos bacterianos para la fermentación de las leches de cabras murciano-granadinas, incluyendo YOMIX300, MA400, *Lactobacillus paracasei* 277 y *Lactococcus lactis* 4042. Estas bacterias lácticas son conocidas por sus propiedades probióticas y su capacidad para influir en la textura, sabor y composición de los productos fermentados (Ouweland et al., 2002; Marco et al., 2007). El uso de los cultivos seleccionados permitirá evaluar el efecto del subproducto de brácteas de alcachofa ensilado en la calidad microbiológica y sensorial de las leches fermentadas.

En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, específicamente el ODS 12 sobre Consumo y Producción Responsables, este estudio se propone evaluar el impacto del subproducto de brácteas de alcachofa ensilado en las leches fermentadas de cabras Murciano-Granadinas. El objetivo es contribuir a la reducción del desperdicio alimentario y a la promoción de sistemas alimentarios más sostenibles, al tiempo que se genera conocimiento científico aplicado a la producción agrícola y ganadera.

El presente estudio aborda la necesidad urgente de encontrar soluciones innovadoras para la gestión de residuos agrícolas y la mejora de la eficiencia en la cadena alimentaria. Se espera que los resultados obtenidos no solo beneficien a los productores agrícolas y ganaderos, sino también a los consumidores al promover alimentos más saludables y respetuosos con el medio ambiente (FAO, 2019).

Materiales y Métodos

El estudio se realizó bajo las condiciones descritas por Monllor (2020), con 48 cabras Murciano-Granadinas de la granja de investigación de la Universidad Miguel Hernández de Elche. Los animales se dividieron en dos lotes homogéneos (n=24 cada uno), considerando el peso corporal, la producción de leche y el recuento de células somáticas.

Se realizaron 32 elaboraciones combinando 4 cultivos (YOMIX300, MA400, *Lb. Paracasei*, y *Lc. Lactis*) con 2 dietas (control y ensilado de brácteas de alcachofa), cada combinación se elaboró por cuadruplicado. Las leches fermentadas obtenidas se analizaron a los 2 y 30 días de almacenamiento en frío (4°C) tras la elaboración.

La leche fue pasteurizada a 80°C durante 30 minutos y enfriada rápidamente a 37°C antes de ser distribuida asépticamente en frascos estériles de 100 mL para su inoculación con cultivos bacterianos. Se prepararon frascos para cada cultivo y tipo de leche.

Se utilizaron dos cepas bacterianas: *Lactobacillus paracasei subsp. paracasei* en adelante, CECT277; *Lactococcus lactis subsp. lactis* en adelante, CECT4042; ambos empleados normalmente como cultivos adjuntos. Y dos cultivos comerciales: YOMIX300 (empleado en la elaboración de yogur,

mezcla de *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus*) y MA400 (comúnmente utilizado en la fabricación de queso, mezcla de *Lactococcus lactis subsp. lactis*, *Lactococcus lactis subsp. cremoris* y *Streptococcus thermophilus*), estos últimos cultivos fermentadores o iniciadores. Los cultivos adjuntos liofilizados se reactivaron siguiendo las indicaciones de la Colección Española de Cultivos Tipo (CECT). Se utilizó el segundo pase activo en 50 ml de caldo MRS y M17 con un recuento superior a 8 log UFC/g. Para la elaboración de las leches fermentadas, se añadió 1 ml de cultivo a 80 ml de leche pasteurizada, incubando en condiciones óptimas según la CECT. Por otra parte, los cultivos comerciales se utilizaron a las dosis indicadas por el fabricante (DANISCO).

El pH se midió antes de la inoculación y durante la fermentación, finalizando cuando se alcanzó un pH de aproximadamente 4.8. Posteriormente, las muestras se almacenaron a 4°C. Las leches fermentadas se evaluaron por duplicado a los dos días para determinar la viabilidad microbiana, pH, composición y sinéresis del gel. Las réplicas restantes se congelaron a -20°C para futuros análisis de azúcares, ácidos orgánicos y ácidos grasos.

Posteriormente las réplicas restantes de leche se atemperaron a 40°C y se homogenizaron antes de ser analizadas. Las muestras de suero se obtuvieron por centrifugación mediante la metodología descrita por Morgan et al. (2003) y realizada por Muelas et al. (2017).

La determinación de azúcares (lactosa, glucosa y galactosa) y ácidos se realizó mediante Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC-1100, Agilent, Santa Clara, CA, USA). Para la preparación de la muestra se utilizó la metodología descrita por Trigueros y Sendra (2015).

La extracción de ácidos grasos se llevó a cabo según el método descrito por Romeu-Nadal et al. (2004), A partir de éstos, se calcularon los índices nutricionales, siguiendo las fórmulas descritas en estudios previos de Chen y Liu. (2020) y Andreu-Coll et al. (2019).

Análisis estadístico

Todas las determinaciones se realizaron por triplicado. El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el software SAS, en el que se consideraron los factores dieta y tiempo de almacenamiento. En general no se observaron diferencias significativas debidas a ninguno de los factores evaluados, excepto para algunos parámetros específicos. Los valores se expresan como medias \pm desviaciones estándar.

Resultados y Discusión

Recuentos microbianos

La Figura 1 muestra el crecimiento satisfactorio de *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* en leche fermentada con el cultivo YOMIX300, alcanzando recuentos de 10⁸ UFC/mL, dentro del rango esperado para productos lácteos fermentados. Esto confirma la eficacia del cultivo en la acidificación de la leche. Agar M17 permite estimar los recuentos de lactococos y MRS el de lactobacilos. No se observaron diferencias significativas entre las dietas. Los recuentos de lactococos son superiores a los de lactobacilos como es habitual es yogures y los lactobacilos son más sensibles al almacenamiento en frío pues ven disminuida su población tras 30 días de almacenamiento como suele ser habitual.

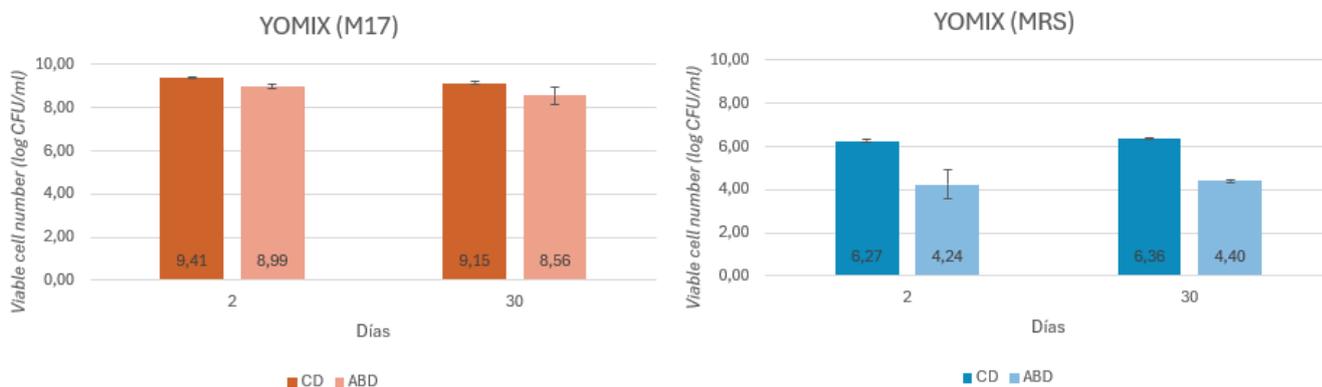


Figura 1. Crecimiento (log UFC/ml) de *Streptococcus thermophilus* en Agar M17 y *Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus* en Agar MRS (YOMIX300) en leches fermentadas tras su almacenamiento en frío (4°C) durante 2 y 30 días. CD corresponde a Dieta control y ABD a dieta con brácteas de alcachofa.

La Figura 2 muestra los recuentos microbianos de leches fermentadas con MA400, CECT 4042 y CECT 277, indicando que la inclusión de ensilado de brácteas de alcachofa en la dieta no afectó significativamente el crecimiento de los cultivos. Estudios previos (González Arrojo, 2016; García Lorente, 2017) sugieren que subproductos de alcachofa en la dieta pueden modificar el perfil lipídico de la leche, lo que podría influir en la fermentación y propiedades sensoriales, aunque no se evaluó el impacto en cultivos iniciadores. Los resultados sugieren que los cultivos fueron robustos y se adaptaron a las variaciones en la leche, alcanzando el recuento mínimo esperado de 10^7 UFC/mL, excepto en CECT 4042, posiblemente debido a los cultivos adjuntos suelen tener menor vigor que los cultivos mixtos iniciadores, que aseguran alta viabilidad y consistencia (Fasoli et al., 2003 y Lahtinen et al., 2011).

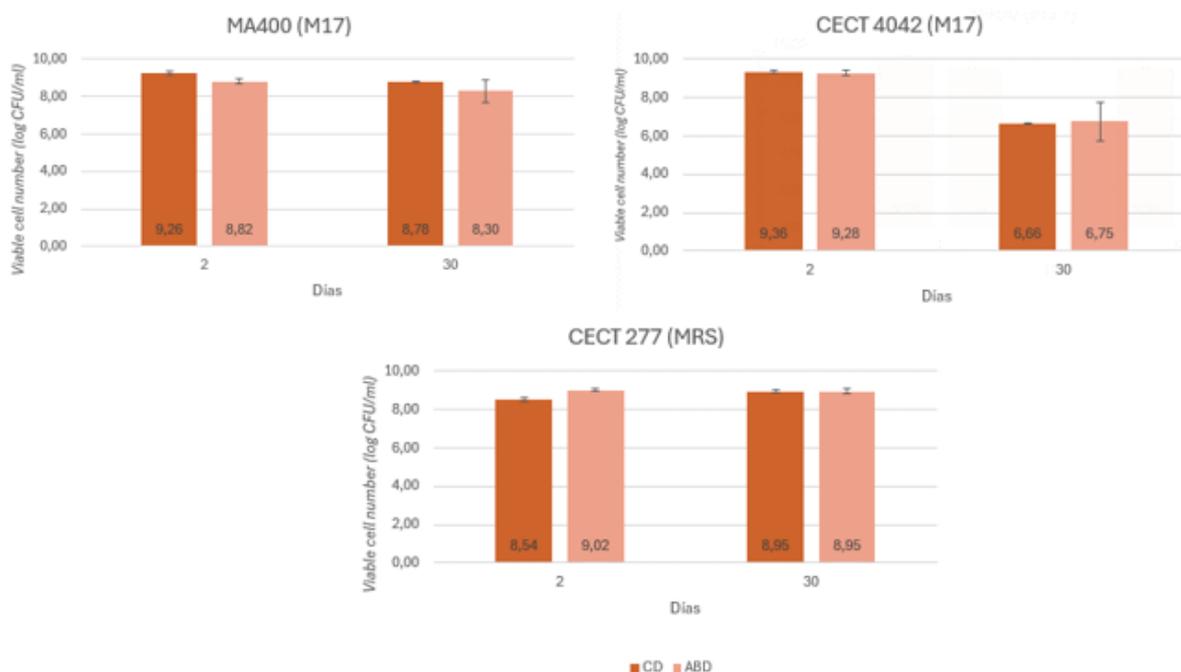


Figura 2. Crecimiento (log UFC/ml) de los cultivos MA400 en Agar M17; CECT 4042 en Agar M17; y CECT 277 en Agar MRS, en leches fermentadas tras su almacenamiento en frío (4°C) durante 2 y 30 días. CD corresponde a Dieta control y ABD a dieta con brácteas de alcachofa.

Parámetros de estabilidad del gel

Para evaluar la estabilidad del gel, es fundamental conocer la composición del suero, especialmente en cuanto a su contenido de grasa, proteína y materia seca. Un suero con un alto contenido de materia seca puede causar pérdidas durante la producción de queso y comprometer la estabilidad del gel, además de influir en el proceso de sinéresis (Figura 3). En la Tabla 1, se muestran estos resultados junto con el pH para las muestras analizadas. En este estudio, la grasa y proteína en el suero disminuyen con el almacenamiento, sugiriendo mejor retención de estos nutrientes en el gel. La adición de ensilado de brácteas de alcachofa (ABD) a la dieta mejora la estabilidad del gel, reflejándose en una menor liberación de grasa y materia seca al suero comparado con la dieta control (CD).

La Figura 3 muestra diferencias en la capacidad de formar coágulos estables entre los cultivos lácticos evaluados, las gráficas reflejan la significación de dicha diferencia. YOMIX300 y MA400 mostraron menor sinéresis, lo que indica una mayor firmeza y cohesión del gel lácteo. Estos resultados coinciden con estudios previos que destacan la importancia de la selección del cultivo iniciador para la textura y estabilidad de productos lácteos fermentados (García y López, 2023). Una baja sinéresis, influenciada por la composición de la leche, condiciones de fermentación y características del cultivo, es clave para lograr una textura cremosa y una mayor aceptación del consumidor. No se encontraron diferencias en la sinéresis entre las dietas control (CD) y la leche de dietas suplementada con brácteas de alcachofa (ABD), lo que sugiere que este factor no afectó la formación del coágulo en este estudio.

Si bien no se evaluó el factor cultivo, es evidente que YOMIX300 y MA400 presentaron menores cantidades de grasa y proteína en el suero que las leches fermentadas con cepas puras, indicando mejor retención y calidad del gel, con menor sinéresis y mejor textura final. Esto es debido a la mayor calidad de gel a que dan lugar los cultivos mixtos frente a los cultivos puros que proporcionan estructuras de gel menos estables. Es por este motivo que estas cepas puras, aquí ensayadas individualmente para evaluar sus propiedades, suelen usarse como cultivos adjuntos a otras mezclas de bacterias para proporcionar notas sensoriales diferenciadas (Lahtinen et al., 2011).

Tabla 1. Composición general y pH de suero de leches fermentadas con YOMIX300, MA400, CECT 4042 y CECT 277 en función del día y la dieta. (g/100g, medias y error

YOMIX300					
Dieta	Día	Grasa del suero	Proteína del suero	Lactosa del suero	Materia seca del suero
CD	2	0,83±0,02	0,20±0,01	2,36±0,02	4,06±0,04
	30	0,46±0,03	0,26±0,02	2,33±0,03	3,67±0,02
ABD	2	0,38±0,09	0,19±0,07	2,14±0,04	3,28±0,20
	30	0,26±0,12	0,25±0,04	2,01±0,07	2,99±0,07
MA400					
CD	2	0,45±0,02	0,28±0,01	2,25±0,003	3,56±0,01
	30	0,41±0,01	0,31±0,02	2,33±0,03	3,59±0,02
ABD	2	0,42±0,05	0,18±0,08	2,08±0,05	3,24±0,14
	30	0,35±0,01	0,25±0,02	2,05±0,03	3,12±0,05
CECT 4042					
CD	2	1,09±0,01	0,25±0,02	2,35±0,02	4,17±0,02
	30	0,43±0,03	0,31±0,02	2,27±0,02	3,52±0,02
ABD	2	0,57±0,19	0,31±0,13	2,29±0,09	3,58±0,28
	30	0,68±0,25	0,39±0,07	2,26±0,11	3,64±0,32
CECT 277					
CD	2	0,86±0,01	0,63±0,01	2,72±0,03	4,46±0,01
	30	0,44±0,01	0,67±0,02	2,54±0,01	3,83±0,02
ABD	2	0,57±0,04	0,42±0,30	2,32±0,31	3,68±0,41
	30	0,51±0,07	0,45±0,32	2,34±0,37	3,58±0,38

estándar)

NOTA: Dieta: CD: control; ABD: brácteas de alcachofa.

La Figura 4 muestra los resultados del pH en leches fermentadas con los cultivos YOMIX300, MA400, CECT 4042 y CECT 277, todos logrando acidificar la leche hasta un pH seguro (<4.6), lo que garantiza la inocuidad del producto (Chandan y Kilara, 2013). Sin embargo, se observó que CECT 277 alcanzó los valores de pH más altos, sugiriendo una menor capacidad acidificante. Esto no es inusual, ya que CECT 277 es un cultivo adjunto cuya función principal es complementar la fermentación, no acelerarla; y contribuir al perfil sensorial y estructural del producto. Tal y como se ha comentado los cultivos puros tienen menor vigor que los mixtos. Como en trabajos previos (García y López, 2023), se destaca que el pH es un parámetro importante para la fermentación láctica, aunque otros factores como textura, sabor, compuestos volátiles y viabilidad microbiana también son esenciales para la calidad final del producto.

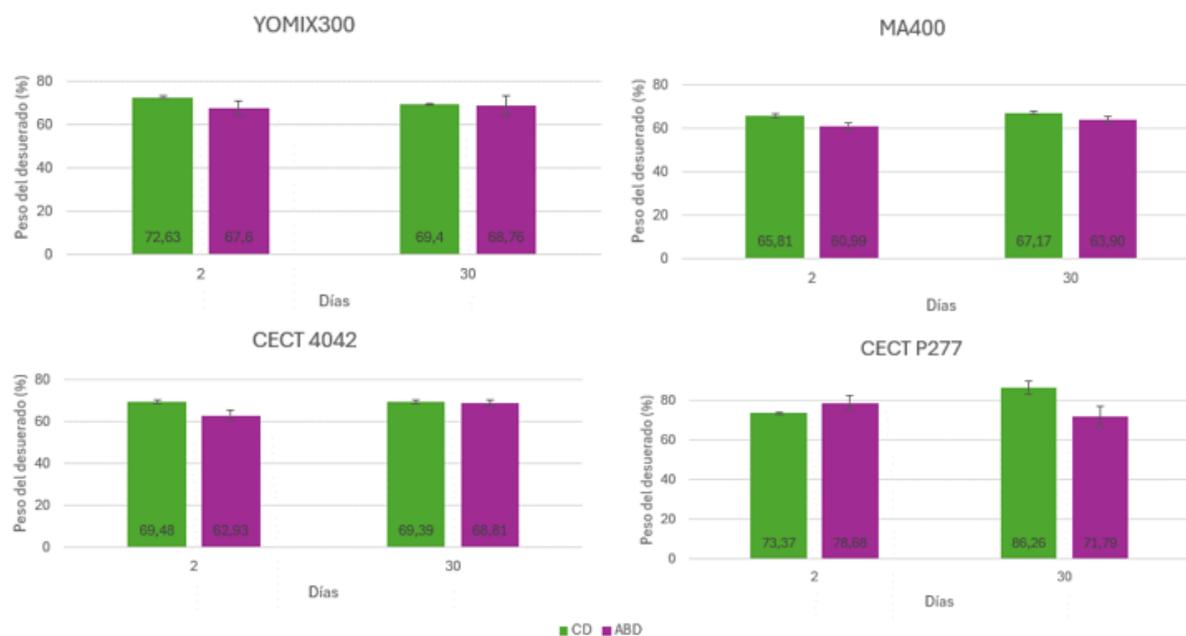


Figura 3. Porcentaje de sinéresis de las leches fermentadas con YOMIX300, MA400, CECT 4042 y CECT 277 a los 2 y 30 días de almacenamiento a 4°C de refrigeración. CD corresponde a Dieta control y ABD a dieta con brácteas de alcachofa.

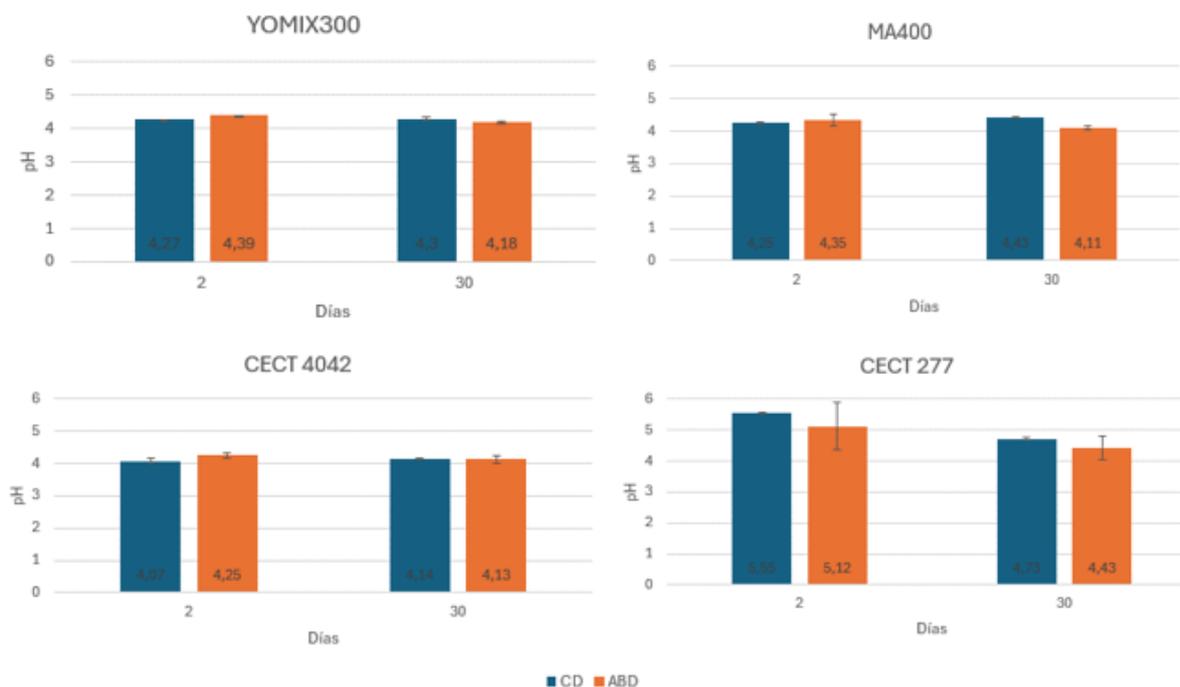


Figura 4. pH de las leches fermentadas con YOMIX300, MA400, CECT 4042 y CECT 277 a los 2 y 30 días de almacenamiento a 4°C de refrigeración. CD corresponde a Dieta control y ABD a dieta con brácteas de alcachofa.

Composición de la leche y las leches fermentadas

La Tabla 2 muestra la evolución de la composición de la leche, y de las leches fermentadas durante el almacenamiento. La disminución de la lactosa y el aumento del ácido láctico evidencian la actividad fermentativa de los cultivos. YOMIX300 destacó por su mayor eficiencia en la acidificación, con una reducción más rápida de lactosa y mayor producción de ácido láctico, lo cual se atribuye a las características sinérgicas de sus cepas bacterianas. El tiempo de almacenamiento en frío también influyó, incrementando gradualmente la acidez. Los cultivos MA400, CECT 4042 y CECT 277 presentaron una actividad más moderada en la producción de ácido láctico y reducción de lactosa, aunque todos lograron una acidificación adecuada. CECT 277 produjo menos ácido láctico que YOMIX300, lo que podría afectar la acidez, estabilidad y vida útil del producto final, en cualquier caso, es un comportamiento esperado de este cultivo para quesos.

Además de lactosa y ácido láctico, la presencia de galactosa y etanol aporta información sobre las vías metabólicas de los cultivos. La acumulación de galactosa refleja la actividad de β -galactosidasas y un posible desbalance en su utilización por las bacterias lácticas, mientras que la producción de etanol sugiere vías fermentativas alternativas, como la heteroláctica o alcohólica, que contribuyen al sabor y aroma (Gobbetti, Corsetti, y Rossi, 2002). El etanol y el ácido acético, aunque presentes en concentraciones mínimas, aportan características distintivas que mejoran la complejidad organoléptica de productos lácteos fermentados. Investigaciones sobre fermentación láctica han señalado que el ácido acético y el etanol son responsables de proporcionar perfiles sensoriales únicos debido a sus efectos en el aroma y sabor de los alimentos fermentados, destacando su importancia en la calidad final de productos como quesos y otros productos lácteos fermentados (Jayasree Joshi et al., 2024)

Estos resultados concuerdan con lo establecido en la literatura científica (Tamime y Robinson, 2007), que destaca la fermentación láctica como un proceso clave en la producción de lácteos, con la disminución de lactosa y el aumento de ácido láctico como indicadores de éxito.

Tabla 2. Composición de la leche y las leches fermentadas con YOMIX300, MA400, CECT 4042 y CECT 277 en función del tiempo y la dieta. (g/100g, medias y error estándar)

Dieta	Tiempo	Grasa	Proteína	Materia seca	Lactosa	Glucosa	Galactosa	Etanol	Ácido láctico	Ácido acético
CD	0	4,46±0,01	3,27±0,02	13,55±0,01	4,75±0,03	0	0	0	0,15±0,0003	0
ABD	0	5,24±0,21	3,38±0,11	13,72±0,05	4,39±0,02	-	-	0	0,129±0,03	-
YOMIX300										
CD	2	4,56±0,03	3,37±0,02	12,92±0,03	1,89±0,03	0,19±0,002	0,50±0,02	0	0,66±0,01	0
	30	4,44±0,06	3,36±0,007	13,01±0,01	2,02±0,02	0,20±0,01	0,480,002	0,74±0,02	0,66±0,002	0
ABD	2	5,4±0,06	3,380,06	13,49±0,16	1,83±0,03	0,36±0,04	0,45±0,02	0	0,59±0,005	0
	30	5,34±0,13	3,34±0,12	13,67±0,39	1,76±0,11	0,28±0,12	0,47±0,04	0,25±0,29	0,64±0,05	-
MA400										
CD	2	4,96±0,02	3,34±0,05	12,93±0,02	2,23±0,14	0	-	0	0,65±0,006	0
	30	4,85±0,04	3,34±0,03	13,26±0,03	2,40±0,21	0,37±0,04	0,37±0,04	0,92±0,34	0,65±0,009	0
ABD	2	5,29±0,39	3,35±0,02	13,04±0,44	1,75±0,05	0,30±0,008	0,40±0,008	0	0,62±0,01	0
	30	5,45±0,52	3,3925±0,18	13,93±0,06	1,73±0,08	0,28±0,03	1,33±1,86	0,42±0,51	0,69±0,02	0
CECT 4042										
CD	2	5,36±0,03	3,24±0,03	13,06±0,03	2,30±0,01	0	0,06±0,0002	0	0,57±0,01	0
	30	4,34±0,007	3,26±0,03	12,53±0,04	2,45±0,08	0	0,03±0,002	1,37±0,03	0,59±0,01	0
ABD	2	5,47±0,38	3,29±0,07	14,04±0,36	2,20±0,07	0,14±0,16	0,20±0,25	0,65±0,18	0,62±0,03	0
	30	5,62±0,55	3,42±0,24	14,35±0,02	2,11±0,07	0,12±0,14	0,16±0,19	0,32±0,37	0,68±0,03	-
CECT 277										
CD	2	4,84±0,02	2,75±0,04	12,72±0,03	2,66±0,07	0	0	0	0,41±0,008	0,02±0,007
	30	5,09±0,007	3,25±0,02	13,93±0,02	2,35±0,008	0,30±0,01	0	1,41±0,008	0,67±0,006	0,02±0,002
ABD	2	5,83±0,79	3,27±0,05	14,39±0,18	2,10±0,31	0,15±0,17	0,16±0,19	0,70±0,20	0,50±0,23	0,01±0,008
	30	5,43±0,35	3,27±0,39	14,19±0,96	2,15±0,18	0,12±0,14	0,16±0,18	0,23±0,28	0,68±0,29	0,01±0,007

NOTA: Tiempo 0: leche; 2: leche fermentada de 2 días en almacenamiento a 4°C; 30: leche fermentada de 30 días en almacenamiento a 4°C. Dieta: CD: control; ABD: brácteas de alcachofa; -: cantidades valores marginales que reflejan cantidades muy bajas.

Índices nutricionales de los ácidos grasos de la leche y leches fermentadas

Muelas et al. (2017) y Chen y Liu (2020) revisaron los índices nutricionales en productos lácteos, confirmando que los valores de la Tabla 4 se ajustan a los rangos reportados para productos de cabra, como PUFA/SFA (0,02-0,175), IA (1,89-2,91) e IT (2,70-3,20). En el presente estudio, la dieta con ensilado de brácteas de alcachofa (ABD) mejoró el índice n-6/n-3 en comparación con la dieta control (CD), lo cual concuerda con investigaciones previas que indican que dietas ricas en antioxidantes, como la alcachofa, pueden mejorar la calidad lipídica de la leche al aumentar los ácidos grasos poliinsaturados (Santos et al., 2014). Sin embargo, el tipo de cultivo bacteriano y el tiempo de fermentación no mostraron efectos en la mejora de estos índices, la significancia de sus diferencias está reflejada en las tablas, lo que contrasta con otros estudios que sí señalan el impacto de la fermentación bacteriana en la composición lipídica (Calder, 2015).

En el presente estudio se observó un aumento en los índices n-6/n-3 y LA/ALA, lo cual no es favorable desde una perspectiva nutricional. Este aumento no parece haber sido influido ni por los cultivos bacterianos (CECT 4042 y CECT 277) ni por el tiempo de almacenamiento, sino que fue la dieta el principal factor responsable de modificar estos índices. La relación entre la alimentación y la composición de ácidos grasos está bien documentada, por ejemplo, en vacas (Ferlay et al., 2006), y en ovejas, la inclusión de ensilado de brácteas de alcachofa puede alterar la proporción n-6/n-3, lo que contribuye a variaciones estacionales en los ácidos grasos libres en quesos madurados (Fernández-García et al., 2006). Estos cambios podrían explicar el aumento de n-6/n-3 en la leche fermentada, en comparación con los valores más bajos observados en animales bajo dietas convencionales (Jaramillo et al., 2010).

Asimismo, los índices de aterogenicidad (IA) y trombogenicidad (IT) no cambiaron notablemente en función del cultivo o el tiempo de almacenamiento, a diferencia de lo que señalan trabajos como el de Ulbricht y Southgate (1991), que indican que la fermentación puede reducir estos índices. Además, el índice MUFA/SFA, que es relevante para la salud cardiovascular, tampoco mostró variaciones importantes, si bien otros autores sugieren que algunos cultivos pueden aumentar los ácidos grasos monoinsaturados durante la fermentación (Ritz et al., 2012), descartamos que los ensayados en este estudio posean dicha capacidad.

Tabla 3. Índices nutricionales de ácidos grasos de la leche y las leches fermentadas con YOMIX300, MA400, CECT 4042 y CECT 277 en función del tiempo y la dieta.

Índices nutricionales de Ácidos grasos	Leche		YOMIX 300				MA400				CECT 4042				CECT 277			
	Dieta		CD		ABD		CD		ABD		CD		ABD		CD		ABD	
	Tiempo	0	0	2	30	2	30	2	30	2	30	2	30	2	30	2	30	
PUFA/SFA	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
MUFA/SFA	0,41	0,39	0,41	0,40	0,36	0,38	0,39	0,40	0,38	0,38	0,41	0,41	0,38	0,38	0,41	0,41	0,38	0,38
n6/n3	11,24	17,92	9,75	9,86	18,84	20,11	9,73	9,31	21,13	21,02	9,79	9,77	17,45	18,97	10,12	10,04	19,32	15,44
IA	1,44	1,54	1,46	1,48	1,71	1,34	1,53	1,47	1,63	1,61	1,44	1,45	1,61	1,68	1,44	1,43	1,61	1,62
IT	2,98	3,10	2,95	3,02	3,43	3,14	3,11	3,01	3,27	3,23	2,97	2,98	3,20	3,28	3,00	2,98	3,24	3,22
HFA	34,97	37,56	35,23	35,43	39,49	36,71	35,82	35,38	38,78	38,76	35,24	35,08	38,60	39,82	35,26	35,40	38,90	39,37
HH	0,69	0,67	0,69	0,66	0,63	0,72	0,66	0,66	0,67	0,68	0,69	0,68	0,67	0,65	0,67	0,68	0,67	0,67
HPI	0,77	0,71	0,77	0,75	0,64	0,83	0,73	0,75	0,68	0,69	0,76	0,77	0,69	0,66	0,77	0,77	0,68	0,69
LA/ALA	10,29	16,30	8,98	9,15	17,30	18,63	8,96	8,67	19,82	19,60	9,08	9,12	16,67	17,70	9,34	9,22	17,89	14,12
DI14	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,85	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03
DI16	0,09	0,07	0,08	0,07	0,06	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
DI18	2,54	2,81	2,61	2,50	2,60	2,64	2,39	2,49	2,70	2,85	2,55	2,51	2,80	2,91	2,48	2,51	2,76	2,67
ácido oléico/ácido esteárico	1,16	1,45	1,23	1,17	1,44	1,47	1,17	1,17	1,52	1,56	1,21	1,17	1,55	1,64	1,16	1,16	1,54	1,51
ΣCLA/ácido vacénico	0,30	0,52	1,02	0,30	0,50	0,47	0,97	0,32	0,48	0,48	0,32	0,30	0,41	0,50	0,32	0,32	1,60	0,51

NOTA: PUFA/SFA (ácidos grasos poliinsaturados/ácidos grasos saturados), MUFA/SFA (ácidos grasos monoinsaturados/ácidos grasos saturados), n6/n3 (ácido omega-6/omega-3), LA/ALA (ácido linoleico/ácido α-linolénico), ácido oleico/ácido esteárico, índice de aterogenicidad (IA), índice de trombogenicidad (IT), índice de hipercolesterolemia (HFA), cociente hipocolesterolémico/hipercolesterolémico (HH), índice promotor de la salud (HPI), índice de desaturación C14:0 (DI14), índice de desaturación C16:0 (DI16) e índice de desaturación C18:0 (DI18).

Conclusión

La inclusión de subproducto de brácteas de alcachofa ensilado en la dieta de cabras Murciano-Granadinas es una estrategia viable para mejorar ciertos aspectos como la estabilidad del gel, en la producción de leches fermentadas sin comprometer la calidad general del producto. Además, esta práctica contribuye a la sostenibilidad en la producción ganadera, alineándose con los principios de economía circular al aprovechar residuos agrícolas, lo que podría tener aplicaciones significativas en el desarrollo de productos lácteos más sostenibles y eficientes.

Agradecimientos

Este trabajo fin de máster ha sido posible gracias al apoyo del proyecto AGL2015-64518 R, del Ministerio de Economía y Competitividad.

Bibliografía

Andreu-Coll, L; Cano-Lamadrid, M; Sendra, E; Carbonell-Barrachina, A; Legua, P; Hernández, F. (2019). Fatty acid profile of fruits (pulp and peel) and cladodes (young and old) of prickly pear [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.] from six Spanish cultivars. *J. Food Compos. Anal.* 84, 103294.

Bovera, F., Lestingi, A., Iannaccone, F., Tateo, A., & Nizza, A. (2017). Effect of dietary supplementation with artichoke bracts on the performance and milk composition of goats. *Journal of Dairy Science*, 100(1), 279-285. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11508>

Calder, P. C. (2015). Functional Roles of Fatty Acids and Their Effects on Human Health. *Journal of Parenteral and Enteral Nutrition*, 39(1), 18S–32S.

Chandan, R. C., & Kilara, A. (2013). *Dairy Ingredients for Food Processing*. John Wiley & Sons.

Chen, J.; Liu, H. (2020). Nutritional Indices for Assessing Fatty Acids: A Mini Review. *Int. J. Mol. Sci.* 2020, 21, 5695.

FAO. (2019). *The future of food and agriculture: Alternative pathways to 2050*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Fasoli, S., Marzotto, M., Rizzotti, L., Rossi, F., Dellaglio, F., & Torriani, S. (2003). Bacterial composition of commercial probiotic products as evaluated by PCR-DGGE analysis. *International Journal of Food Microbiology*, 82(1), 59-70. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(02\)00247-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(02)00247-X)

Ferlay, A., Martin, B., Pradel, P., Coulon, J. B., & Chilliard, Y. (2006). Influence of grass-based diets on milk fatty acid composition and milk lipolytic system in Tarentaise and Montbeliarde cow breeds. *Journal of Dairy Science*, 89(11), 4026-4041. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72446-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72446-3)

Fernández-García, E., Carbonell, M., Calzada, J., & Núñez, M. (2006). Seasonal variation of the free fatty acids contents of Spanish ovine milk cheeses protected by a designation of origin: A comparative study. *International Dairy Journal*, 16(3), 252-261. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2005.02.010>

García Lorente, A. (2017). Perfil de ácidos grasos totales de leche de cabra: efecto de la inclusión de subproductos de alcachofa (*Cynara scolymus*) en la dieta de caprino lechero. (Trabajo de fin de grado). Universidad Miguel Hernández de Elche, Alicante, España.

García, M., & López, R. (2023). Effect of different microorganisms and diets on cow's milk fermentation: A pilot study. *Journal of Food Science and Technology*, 23(2), 115-122.

Gobbetti, M., Corsetti, A., & Rossi, O. (2002). Bacteriocinogenic lactic acid bacteria and their potential applications in food. *Trends in Food Science & Technology*, 13(6), 201-207

- González Arrojo, M. (2016). Inclusión de subproductos de alcachofa y brócoli en la dieta de cabras lecheras: efecto en el contenido en minerales y el perfil de volátiles de la leche. (Trabajo de Fin de Grado). Universidad Miguel Hernández de Elche, Alicante, España.
- Jaramillo, D. P., Buffa, M. N., Rodríguez, M., Pérez-Baena, I., Guamis, B., & Trujillo, A. J. (2010). Effect of the inclusion of artichoke silage in the ration of lactating ewes on the properties of milk and cheese characteristics during ripening. *Journal of Dairy Science*, 93(4), 1412-1419. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2525>
- Jayasree Joshi, T., Salini, S. V., Mohan, L., Nandagopal, P., & Arakal, J. J. (2024). Functional metabolites of probiotic lactic acid bacteria in fermented dairy products. *Food and Humanity*, 3, 100341. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100341>
- Lahtinen, S. J., Ouwehand, A. C., Salminen, S. J., & von Wright, A. (2011). *Lactic Acid Bacteria: Microbiological and Functional Aspects* (4th ed.). CRC Press.
- Llorach, R., Tomás-Barberán, F. A., Ferreres, F., & Gil, M. I. (2003). Characterisation of artichoke (*Cynara scolymus* L.) by-products and antimicrobial activity. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(12), 1297-1303.
- Marco, M. L., Pavan, S., & Kleerebezem, M. (2007). Towards understanding molecular modes of probiotic action. *Current Opinion in Biotechnology*, 18(3), 204-210.
- Mensink, R. P. (2016). Effects of saturated fatty acids on serum lipids and lipoproteins: a systematic review and regression analysis. World Health Organization.
- Monllor, P., & Muellas, R. (2019). Valor nutricional de subproductos agrícolas en la alimentación de cabras lecheras. *Revista de Investigación Agropecuaria*, 43(2), 87-94.
- Monllor, P., & Muellas, R. (2020). Efecto del secado de brácteas de alcachofa en la conservación de sus componentes bioactivos. *Revista Española de Ciencia Animal*, 40(1), 55-63.
- Morgan, F.; Massouras, T.; Barbosa, M.; Roseiro, L.; Ravasco, F.; Kandarakis, I.; Bonnin, V.; Fistakoris, M.; Anifantakis, E.; Jaubert, G. (2003). Características de la leche de cabra recogida en pequeñas y medianas empresas de Grecia, Portugal y Francia. *Small Rumin. Res* 47, 39–49.
- Muelas, R., Monllor P., Romero, G., Sayas-Barberá, M. E., Navarro, C., Díaz, J. R. y Sendra, E. (2017). Milk Technological Properties as Affected by Including Artichoke By-Products Silages in the Diet of Dairy Goats. *Foods*, 6 (112).
- Ouwehand, A. C., Salminen, S., & Isolauri, E. (2002). Probiotics: An overview of beneficial effects. *Antonie van Leeuwenhoek*, 82(1-4), 279-289.
- Pandino, G., Lombardo, S., Mauromicale, G., & Williamson, G. (2011). Phenolic acids and flavonoids in leaf and floral stem of cultivated and wild *Cynara cardunculus* L. genotypes. *Food Chemistry*, 126(2), 417-422.
- Pérez-Jiménez, J., Neveu, V., Vos, F., & Scalbert, A. (2018). Systematic analysis of the content of 502 polyphenols in 452 foods and beverages: An application of the Phenol-Explorer database. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(9), 2267-2283.
- Ritz, M. et al. (2012). Long-term effects of fermentation on fatty acid profile. *Food Chemistry*, 131(2), 408–416.
- Romeu-Nadal, M.; Castellote, AI; López-Sabater, MC. (2004). Método de cromatografía de gases en espacio de cabeza para la determinación de compuestos volátiles en fórmulas infantiles. *J. Chromatogr.* 1046, 235–239
- Sánchez-Moreno, C., García-Viguera, C., & Ancos, B. (2020). Nutritional and health-promoting properties of artichoke (*Cynara scolymus* L.): A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 71(3), 253-267.

Santos, A. et al. (2014). Effect of artichoke leaves on cholesterol metabolism. *Phytotherapy Research*, 28(7), 1042–1049.

Simopoulos, A. P. (2002). The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 56(8), 365–379.

Tamime, A. Y., & Robinson, R. K. (2007). *Yoghurt: Science and technology*. Woodhead Publishing.

Trigueros, L.; Sendra, E. (2015). Contenido de ácidos grasos y ácido linoleico conjugado (CLA) en leches fermentadas según evaluación por metilación directa. *LWT-Food Sci. Technol.* 60 , 315–319.

Ulbricht, T. L., & Southgate, D. A. (1991). Coronary heart disease: seven dietary factors. *The Lancet*, 338(8773), 985–992.

Valorización energética de aguas y lodos de matadero

L. Ballesteros ¹, M. Pérez ²

¹ Universidad Miguel Hernández de Elche, EPSO, Orihuela, España: meli.balleso@gmail.com

² Tecnologías del Medio Ambiente, Universidad de Cádiz, Campus Puerto Real, montserrat.perez@uca.es

Resumen

En este estudio se realiza la co-digestión anaerobia de lodos (L) y vertido de matadero de cerdo (V) (Lodo:Vinaza, L:V) en una proporción 50:50, en dos digestores monoetapa de 2L de capacidad, en condiciones ideales termófilas (55°C) y mesófilas (35°C). Se hacen estudios variando los tiempos hidráulicos de retención de 30, 25 y 20 días con el fin de evaluar las mejores condiciones para garantizar la mayor generación de biogás (específicamente metano) así como una mayor eficacia en la remoción de la carga orgánica de los residuos de interés. Además, se ha estudiado el efecto de la adición de un cosustrato (vinaza de vino) a la alimentación, sobre la generación y rendimiento de metano. Para ello se ha añadido en ambos reactores mesofílico y termofílico, un 50% v/v de vinaza al sustrato Lodo:Vertido para obtener una alimentación (Lodo:Vertido:Vinaza, L:V:Vi) en una proporción 25:25:50 y se ha analizado la eficacia de eliminación de materia orgánica así como la generación y rendimiento de metano. Dentro de los principales resultados se obtuvo una producción de biometano entre 257 a 514 mL CH₄/d para el sustrato L:V, y entre 191 y 413 mL CH₄/d para el sustrato L:V:Vi, predominando las condiciones termofílicas. Sin embargo en cuanto a rendimiento, se obtuvo entre 0,190 y 0,296 m³ CH₄/kg DQO eliminada para el sustrato L:V, y entre 0,099 y 0,111 m³ CH₄/kg DQO eliminada para el sustrato L:V:Vi, predominando las condiciones mesofílicas en ambos casos. Para los cuatro digestatos se cumplen las condiciones de patógenos reguladas por la legislación para el uso agrícola. Sin embargo, la baja concentración final de nitrógeno, no lo hace un fertilizante agrícola de interés.

Palabras clave: Co-digestión anaerobia, biogás, tratamiento de residuos, metano, residuos agroindustriales

Energy recovery of water and slaughterhouse sludge

Abstract

In this study of anaerobic co-digestion of sludge (L) and pig slaughterhouse discharge (V) 50:50 is carried out in two single-stage digesters of 2L capacity, under ideal thermophilic (55°C) and mesophilic conditions (35°C) varying the hydraulic retention times of 30, 25 and 20 days, in order to evaluate the best conditions to guarantee the greatest generation of biogas, specifically methane, as well as efficiency in the removal of the organic load from the waste of interest, as well as the behavior in the generation of biomethane in two reactors by adding 50% v/v of wine wastes to the feed, that is, Sludge: Discharge: Wine Wastes (L:V:Vi), in a proportion of 25 :25:50, in two reactors, one thermophilic and the other mesophilic. Among the main results, biomethane production was obtained between 257 to 514 mL CH₄/d for the L:V substrate, and between 191 and 413 mL CH₄/d for the L:V:Vi substrate, thermophilic conditions predominating, however In terms of performance, between 0.190 and 0.296 m³ CH₄/kg COD removed for the L:V substrate was obtained, and between 0.099 and 0.111 m³ CH₄/kg COD removed for the L:V:Vi substrate, mesophilic conditions predominating in both. cases. For the four digestates, the pathogen conditions for agricultural use are met; however, the low final concentration of nitrogen does not make it an agricultural fertilizer of interest.

Keywords: Anaerobic co-digestion, biogas, waste treatment, methane, agro-industrial waste.

Introducción

Debido a la industrialización de la carne a nivel industrial a nivel mundial, se están generando grandes cantidades de residuos sólidos y líquidos en los procesos de matanza, despiece y limpieza que se realizan en los mataderos. Se promedia que el 25% del peso del animal se lleva a vertedero como inservible debido a su alta carga orgánica e infecciosa. Dentro de los residuos, se contabilizan desde animales enteros, partes y sustancias compuestas por grasa, pelo, sangre, entre otros. Asimismo, de la actividad de lavado se generan grandes cantidades de aguas residuales para las cuales han implementado sistemas de tratamiento que, a su vez, generan lodos con bastante carga orgánica, sólidos suspendidos y sustancias más complejas como proteínas y lípidos. En este sentido, el consumo de aguas es bastante elevado en las operaciones de limpieza, lavado, corte, despacho, deshuesado en los mataderos. Estas aguas residuales se caracterizan por contener altas concentraciones de Demanda Química de Oxígeno (DQO) y oxígeno bioquímico, carbono orgánico total, nitrógeno total, Sólidos Suspendidos Totales (SST) y fósforo total. (Granada et al., 2018), siendo los procesos de digestión anaerobia especialmente indicados para la gestión y valorización de este tipo de residuos de naturaleza orgánica.

En la literatura se encuentra que la mayor parte de estudios de digestión anaerobia se han realizado con los residuos sólidos de la matanza donde incluyen intestinos, tejidos cárnicos, sangre, piel, cerdas (pelo), los cuales son higienizados en cumplimiento de la normativa europea con altas temperaturas y presión para, posteriormente, ser triturados y en diferentes composiciones analizando su potencial de biometanización y digestión anaerobia en reactores semicontinuos. La alta DQO, alta DBO y alto contenido de humedad de estos residuos hacen que sean ideales para la digestión anaeróbica. (Granada et al., 2018)

Asimismo, se ha referenciado que la monodigestión de estos residuos presenta un alto riesgo de inhibición de la actividad metanogénica debido a la acumulación de amoníaco (NH_3) y ácidos grasos volátiles (AGV) como de ácidos grasos de cadena larga (AGCL) que se generan en las primeras fases de descomposición, siendo una etapa limitante para su implementación en la escala industrial. Otros estudios han demostrado que la co-digestión con otros residuos permite una mayor estabilidad del proceso. Los residuos de matadero han sido utilizados en cogestión con estiércol de cerdo, desechos de frutas y verduras, fracción orgánica de desechos municipales, residuos sólidos, residuos farmacéuticos, residuos de alimentos. (Borowski & Kubacki, 2015). Así, se puede alcanzar un mejor balance de macro y micronutrientes, consorcios microbianos más robustos, relación C/N más equilibrada, mejor capacidad de amortiguación, dilución de inhibidores, mejor carga orgánica y por ende mejor rendimiento en la producción de biogás (Salehiyoum et al., 2020).

Respecto a los lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de los mataderos, debido a su alta carga orgánica se comporta como un sustrato de gran interés para la generación de biometano. Sin embargo, se ha evidenciado que la etapa limitante para la digestión anaerobia de estos es la hidrólisis, puesto que aproximadamente el 80% de la materia orgánica del lodo de matadero está contenida en compuestos como proteínas, carbohidratos, lípidos y AGVs. Las paredes celulares protegen a las proteínas y carbohidratos de la hidrólisis enzimática, y los polímeros de alto peso molecular impactan en la sedimentación, biofloculación, tamaño y estabilidad de los lodos. Se estima que en condiciones normales se necesitan de 20 a 30 días para que del 30 al 50% de los sólidos volátiles del crudo se descompongan. (Siddiqui et al., 2023)

Por lo anterior, surge la necesidad de estudiar el proceso de codigestión anaerobia de estos residuos con el fin de reducirlos y evaluar alternativas que sean más económicas para su gestión. Interesa, por tanto, estudiar el potencial de las diferentes mezclas de residuos para producir biometano por medio de digestión anaerobia. El estudio del potencial de biometanización se realiza en ensayos discontinuos, y posteriormente, la optimización del proceso se lleva a cabo en reactores semicontinuos con diferentes mezclas y condiciones de operación.

Objetivos

El objetivo general del presente trabajo fue evaluar la potencial valorización energética y agronómica de subproductos y lodos de matadero mediante codigestión anaerobia para la obtención de metano y otros productos finales de valor añadido. Este objetivo general se desglosó en diferentes objetivos parciales:

- Analizar el efecto de la temperatura (mesofílica y termofílica) sobre el comportamiento de digestores anaerobios para la codigestión de lodos y vertidos de matadero.
- Evaluar el efecto de la adición de un cosustrato (vinaza de vino) sobre el comportamiento de los digestores anaerobios operando en condiciones mesofílicas y termofílicas para la codigestión de lodos y vertidos de matadero.
- Analizar la viabilidad de aprovechamiento de los digestatos para uso agrícola

Materiales y Métodos

Para dar respuesta a los objetivos planteados, se desarrollan diferentes estudios de codigestión anaerobia en reactores monoetapa con flujo semicontinuo, en dos condiciones de temperatura.

Sustratos e inóculo utilizados

Los sustratos utilizados proceden de la empresa Monte Sierra ubicada en Jerez de la Frontera, Andalucía, España. El vertido de la empresa y el lodo generado en el sistema de tratamiento de aguas residuales industriales del matadero de porcinos son los sustratos principales del presente estudio. Las características de los dos sustratos se relacionan en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de los sustratos utilizados.

Parámetro	Vertido	Lodo
Potencial de Hidrógeno (pH)	6,85	7,75
Demanda Química de Oxígeno Total (DQOt) (g/L)	4,55	127,14
Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQOs) (g/L)	1,31	12,06
Sólidos Suspendidos Totales (SST) (g/L)	1,17	125,62
Sólidos Volátiles (SV) (g/L)	0,48	97,73

Fuente: Elaboración propia, 2024

Como puede observarse en la Tabla 1, ambos residuos tienen un pH adecuado para el proceso de digestión anaerobia. El lodo aporta mayor contenido en DQOt y DQOs, además de presentar un alto contenido en SST y SSV frente al vertido, con gran contenido en material inorgánico, aproximadamente 28 g/L.

A partir del test BMP donde la mejor relación entre vertido y lodo de matadero para la producción de CH₄ fue 50:50 V/V (Ripoll et al., 2023), para el presente estudio se decidió utilizar la misma relación 50:50 en volumen Lodo:Vertido (L:V), y como pretratamiento se realiza la trituración con el fin de homogenizar y minimizar el tamaño de partícula, de tal forma que facilite un poco la hidrólisis en el proceso de digestión anaerobia. Las características del sustrato mezclado y triturado son:

Tabla 2. Caracterización de la alimentación L:V

Parámetro / Unidad	L:V
Potencial de Hidrógeno (pH)	7,48
Demanda Química de Oxígeno Total (DQOt) (g/L)	47,59
Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQOs) (g/L)	5,59
Sólidos Suspendidos Totales (SST) (g/L)	57,68
Sólidos Volátiles (SV) (g/L)	46,78

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la tabla 2 se relaciona la mezcla de vertido y lodo la cual proporciona un valor de pH (7,48) muy adecuado para los procesos de digestión anaerobia en rango mesofílico y termofílico. Asimismo, el vertido diluye la alta carga orgánica del lodo hasta valores de 47,6 gDQOt/L y 5,6 gDQOs/L y el contenido en sólidos a 46,8 g/L, favoreciendo sus características para la digestión anaerobia húmeda. Otro sustrato adicional que se utilizó en el experimento fue la vinaza, como subproducto de la industria vitivinícola del tratamiento de las aguas residuales.

Tabla 3. Caracterización del sustrato Vinaza

Parámetro	Vinaza
Potencial de Hidrógeno (pH)	3,13
Demanda Química de Oxígeno Total (DQOt) (g/L)	28,69
Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQOs) (g/L)	27,79
Sólidos Suspendidos Totales (SST) (g/L)	12,96
Sólidos Volátiles (SV) (g/L)	10,30

Fuente: Elaboración propia, 2024

Como se observa en la Tabla 3, la vinaza presenta un pH muy ácido (3,13) no adecuado para procesos de digestión anaerobia. Asimismo, presenta una DQOt del orden de 28,7 g/L, de la cual la mayor parte es soluble (27,8 g/L). Asimismo, el contenido en sólidos es bajo, siendo la mayor parte de naturaleza orgánica o volátil (10,3 g/L).

Se realizó la mezcla 50:50 con el sustrato de L:V, obteniendo una mezcla de 25:25:50 Lodo:Vertido:Vinaza (L:V:Vi). A continuación, en la tabla 4 se detalla la caracterización de la mezcla.

Tabla 4. Caracterización del sustrato L:V:Vi

Parámetro	L:V:Vi
Potencial de Hidrógeno (pH)	7,4
Demanda Química de Oxígeno Total (DQOt) (g/L)	45,65
Demanda Química de Oxígeno Soluble (DQOs) (g/L)	14,23
Sólidos Suspendidos Totales (SST) (g/L)	40,77
Sólidos Volátiles (SV) (g/L)	33,89

Fuente: Elaboración propia, 2024

En la Tabla 4, se evidencia que la muestra L:V:Vi presenta alta carga orgánica 45,65 gDQOt/L, de la cual solo el 31% es soluble (14,23 gDQOs/L). Por otro lado, presenta un elevado contenido en ST, de los cuales el 83% son volátiles (33,9 gSV/L).

Por tanto, la adición de vinaza a mezcla L:V no supone grandes cambios en la DQOt pero aporta DQOs de forma que pasamos de 5,59 g DQOs/L a 14,23 g DQOs/L en la mezcla L:V:Vi. Por otro lado, se reducen los sólidos de 57 g ST/L a 40 g ST/L y los volátiles de 46 a 33 g SV/L.

El inóculo utilizado para iniciar y acondicionar los reactores al sustrato es procedente de reactores anaerobios propios de la Universidad de la UCA, del laboratorio húmedo del Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente el cual es alimentado con lodos de EDAR.

Ensayos experimentales en reactores operados en semicontinuo

Para alcanzar los objetivos previstos, se aborda un estudio experimental en el que se utilizan 4 reactores operando en semicontinuo (Imagen 1), con diferentes condiciones de operación y alimentación:

- Reactor monoetapa Termofílico (55°C) alimentado con sustrato L:V, 50:50.
- Reactor monoetapa Mesofílico (35°C) alimentado con sustrato L:V, 50:50.
- Reactor monoetapa Termofílico (55°C) alimentado con sustrato L:V:Vi, 25:25:50.
- Reactor monoetapa Mesofílico (35°C) alimentado con sustrato L:V:Vi, 25:25:50.



Figura 1. Reactores utilizados para el experimento

Fuente: Elaboración propia, 2024

Se analizaron diferentes tiempos hidráulicos de retención (THR) comprendidos entre 30 y 20 días (THR: 30d; THR: 25d; THR: 20d). Las condiciones de operación se modifican cuando se alcanza estabilidad en las condiciones de operación previas, considerando la estabilización en la generación de biogás (metano) y en la eficacia depurativa. En ese orden se organizaron los experimentos de la siguiente manera:

- ✓ **Experimento 1.** Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones termofílicas para el sustrato L:V.
- ✓ **Experimento 2.** Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones mesofílicas para el sustrato L:V.
- ✓ **Experimento 3.** Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones termofílicas para el sustrato L:V:Vi.

- ✓ **Experimento 4.** Efecto del tiempo hidráulico de retención en condiciones mesofílicas para el sustrato L:V:Vi.

Métodos analíticos

Durante el desarrollo de la experimentación, se llevaron a cabo numerosos análisis, divididos en caracterización de sustratos y mezclas para alimentación, caracterización periódica de los efluentes y del biogás, así como cálculos de rendimientos, eficiencias depurativas, análisis cinético, entre otros. A continuación, en el esquema 2 se detallan los análisis realizados en cada etapa de cada ensayo.

Diarios	Semanales	Alimentación	Finales
<ul style="list-style-type: none"> Composición Biogás Volumen Biogás pH 	<ul style="list-style-type: none"> DQOs, DQOt ST, SV AGV's 	<ul style="list-style-type: none"> DQOs, DQOt ST, SV AGV's 	<ul style="list-style-type: none"> Nitrógeno Patógenos

Figura 2. Métodos analíticos implementados

Fuente: Elaboración propia, 2024

Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados generales del estudio a partir de la comparación de los experimentos.

Efecto de la temperatura, con el sustrato L:V

Los experimentos 1 y 2 se abordan para estudiar el efecto de la temperatura termofílica y mesofílica en la digestión anaerobia del sustrato L:V operando a diferentes THR (30, 25 y 20 días).

Dentro de las observaciones de interés para el THR de 30 y 25 días (ver tabla 5), las condiciones termofílicas presentaron una mejor producción de metano en comparación con las condiciones mesofílicas, aproximadamente en un 35 y 28%, respectivamente. Sin embargo, para el THR de 20 días, el reactor mesofílico presentó una mayor producción de CH₄, con una generación 40% superior respecto al termofílico. En estas condiciones termofílicas y THR 20 días, es posible que se haya producido una inhibición de los microorganismos por la presencia de AGV's (según se evidencia previamente). Esta inhibición no se observa en rango mesofílico: el reactor continuó estable y produciendo mayor volumen de metano que en THR menores. Por ello, al comparar la producción de metano por unidad de tiempo, se evidencia que la mayor generación de metano (453,03 ml CH₄/día) se obtiene a THR: 20 días y condiciones mesofílicas.

Tabla 5. Producción y rendimiento de metano (CH₄) en rango termofílico y mesofílico para L:V

THR (d)	Producción Metano (mL CH ₄ /d)		Rendimiento (m ³ CH ₄ /kg SV)		Rendimiento (m ³ CH ₄ /kg DQO eliminada)	
	55 °C	35 °C	55 °C	35 °C	55 °C	35 °C
30	397,24	257,77	0,116	0,078	0,248	0,212
25	514,65	368,45	0,132	0,093	0,278	0,276
20	273,08	453,03	0,048	0,072	0,190	0,296

Asimismo, los rendimientos de producción de metano, respecto tanto de los SV alimentados como de la DQO eliminada, presentan el mismo comportamiento que la producción de CH₄.

En el gráfico 1 se presenta el valor promedio del rendimiento expresado en m³ CH₄/kg SV. Como puede observarse en relación con los tiempos hidráulicos de retención estudiados, evidenciándose que el reactor termofílico es mejor en condiciones de THR elevados (30 y 25 días). Sin embargo, para THR 20 días cambia la tendencia y son las condiciones mesofílicas las más favorables.

También para el rendimiento en m³ CH₄/kg DQO eliminada, el mejor comportamiento se presenta en las condiciones mesofílicas con un THR de 20 días, con 0,296 m³ CH₄/kg DQO eliminada.

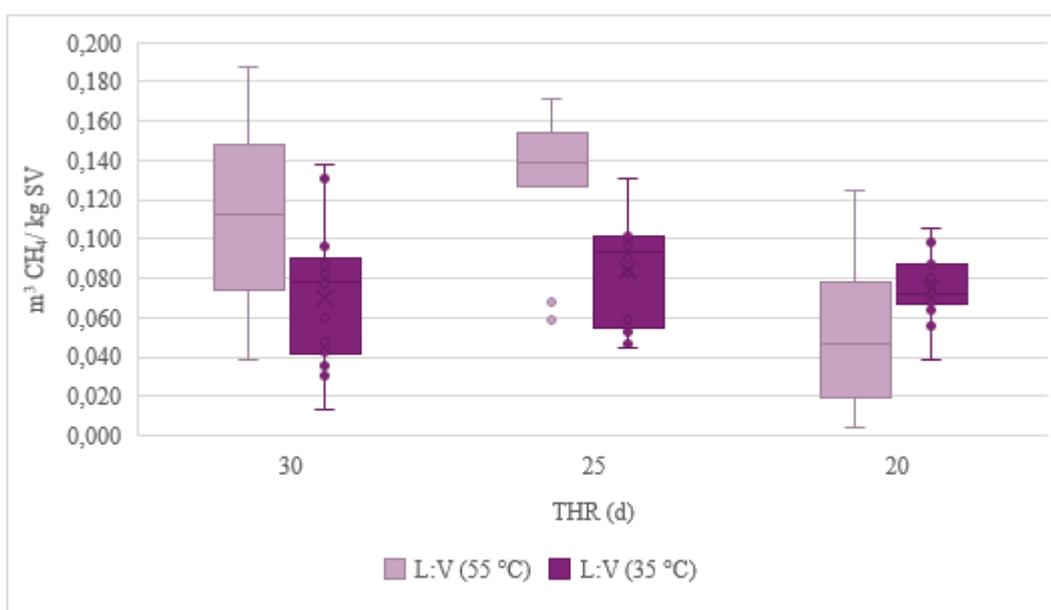


Figura 3. Comparación del rendimiento de producción de CH₄ para condiciones de temperatura de 55°C y 35°C con L:V

Efecto de la temperatura, con el sustrato L:V:Vi

En la tabla 6, se evidencia la relación de los resultados de producción de metano y rendimiento para los experimentos 3 y 4, los cuales se desarrollan para estudiar el efecto de la temperatura para la digestión anaerobia del sustrato L:V:Vi (condiciones termofílicas y mesofílicas) a diferentes condiciones de THR (30, 25 y 20 días).

En general, se evidenció un ligero mejor comportamiento del sustrato L:V:Vi en condiciones termofílicas para los tres THR estudiados, con producciones de metano más elevadas de 8%, 5% y 9% respectivamente. Así, el mejor dato obtenido es 413,37 mL CH₄/d para las condiciones termofílicas y THR de 20 días.

Tabla 6. Producción y rendimiento de CH₄ en rango termofílico y mesofílico para L:V:Vi

THR (d)	Producción Metano (mL CH ₄ /d)		Rendimiento (m ³ CH ₄ /kg SV)		Rendimiento (m ³ CH ₄ /kg DQO eliminada)	
	55 °C	35 °C	55 °C	35 °C	55 °C	35 °C
30	207,55	191,11	0,063	0,060	0,099	0,111
25	231,18	219,31	0,110	0,086	0,109	0,110
20	413,37	374,32	0,149	0,144	0,101	0,099

Como puede observarse, el rendimiento de producción de metano por cada kg SV alimentados es mayor en condiciones termófilas con $0,149 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$. Sin embargo, respecto a los g de DQO eliminada, el mejor comportamiento se observa en condiciones mesofílicas ($35 \text{ }^\circ\text{C}$) para el THR de 30 d, con $0,111 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$ eliminada.

En el gráfico 2, se muestra el valor medio del rendimiento en $\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ para cada reactor y cada tiempo hidráulico de retención. Como puede observarse, ambos reactores presentan un comportamiento similar independientemente de la temperatura para los tres THR estudiados, manteniéndose condiciones estables en la producción, sin inhibición de la actividad metanogénica.

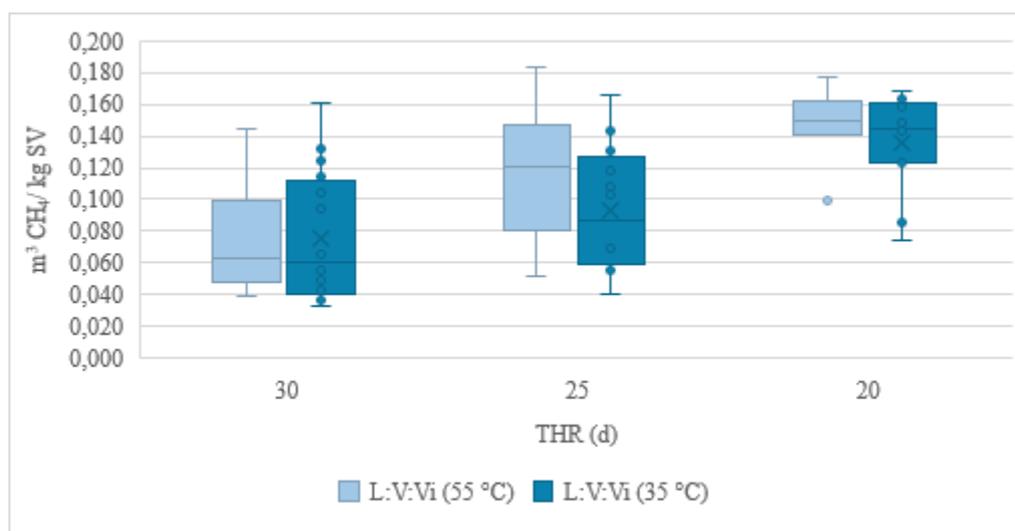


Figura 4. Comparación del rendimiento de producción de CH_4 para condiciones de 55°C y 35°C con L:V:Vi

Análisis de la co-digestión de los lodos y vertido de matadero con la vinaza

En condiciones termofílicas, la adición de vinaza a la digestión de L:V no mejora el proceso cuando se opera a 30 y 25 días de THR, con producciones de CH_4 que superan en 48 y 55% respectivamente la producción del sustrato L:V:Vi. Sin embargo, para el THR de 20 días, la vinaza revierte la tendencia y mejora la generación de metano en un 34%. En la Tabla 7 se recogen los datos de producción de metano y de rendimiento respecto a los kg de SV ingresados, así como por los g de DQO eliminada, para los dos tipos de sustrato. Analizando los resultados se puede evidenciar que la mejor producción de metano se obtiene para las condiciones termofílicas de digestión del sustrato L:V en un THR de 25 días, con un valor de $514,65 \text{ mL CH}_4/\text{d}$.

Tabla 7. Producción y rendimiento de CH_4 para los dos sustratos en condiciones termofílicas

THR (d)	Producción Metano ($\text{mL CH}_4/\text{d}$)		Rendimiento ($\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$)		Rendimiento ($\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg DQO}$ eliminada)	
	L:V	L:V:Vi	L:V	L:V:Vi	L:V	L:V:Vi
30	397,24	207,55	0,116	0,063	0,248	0,099
25	514,65	231,18	0,132	0,110	0,278	0,109
20	273,08	413,37	0,048	0,149	0,190	0,101

Similar comportamiento se observa para los datos de $\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ en el gráfico 3 con relación a los tiempos hidráulicos de retención, donde la vinaza solo mejora el rendimiento para el THR de 20 días, con un valor de $0,148 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$. Sin embargo, si se evalúa el rendimiento respecto a los kg de DQO eliminada, la vinaza no mejora el rendimiento en ninguno de los tres THR estudiados. Por tanto,

en condiciones termofílicas, el mejor comportamiento se observa para el sustrato L:V, con un valor de 0,278 m³ CH₄/kg DQO eliminada para THR: 20 días.

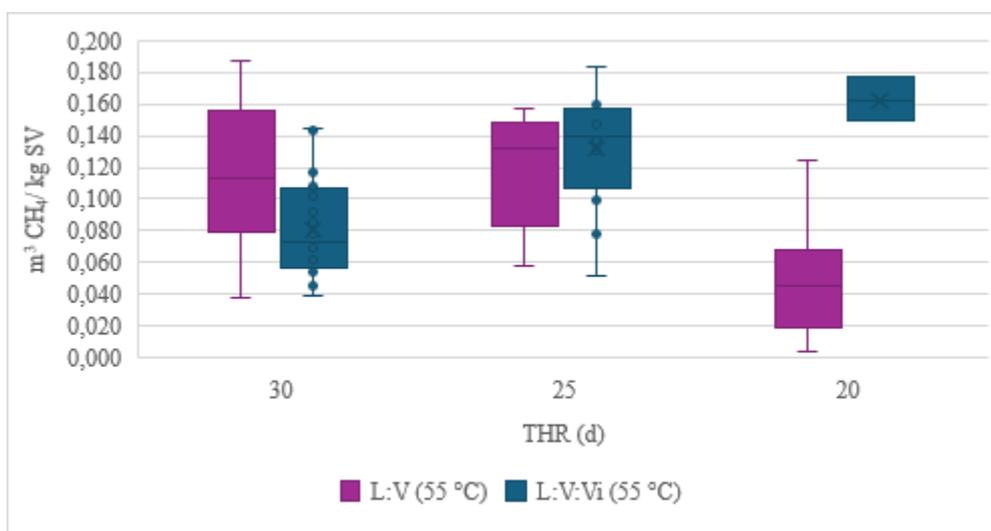


Figura 5. Comparación del rendimiento de producción de CH₄ para los sustratos L:V y L:V:Vi, en condiciones termofílicas.

En cuanto a la generación de CH₄ en condiciones mesófilas, los resultados de la Tabla 8 indican que la vinaza presente en el sustrato L:V:Vi (para los tres THR de 30, 25 y 20 días), no mejora la producción de CH₄. Así, el sustrato L:V genera un 26, 40 y 17% más de CH₄ respectivamente que el sustrato con vinaza. Así, la mayor producción de metano se obtiene para la digestión de L:V en condiciones mesofílicas en un THR de 20 días, con 453,03 mL CH₄/d. La mayor producción de CH₄ para L:V:Vi es 374,32 mL CH₄/d.

Tabla 8. Producción y rendimiento de CH₄ para los dos sustratos en condiciones mesofílicas

THR (d)	Producción Metano (mL CH ₄ /d)		Rendimiento (m ³ CH ₄ /kg SV)		Rendimiento (m ³ CH ₄ /kg DQO eliminada)	
	L:V	L:V:Vi	L:V	L:V:Vi	L:V	L:V:Vi
30	257,77	191,11	0,078	0,060	0,212	0,111
25	368,45	219,31	0,093	0,086	0,276	0,110
20	453,03	374,32	0,072	0,144	0,296	0,099

Por su parte en el gráfico 4 se relaciona el rendimiento expresado como m³ CH₄/kg SV en condiciones mesofílicas, el cual se comporta de forma contraria a la producción de metano. Es decir, para los tres tiempos hidráulicos de retención, la vinaza mejora el rendimiento presentando un máximo de 0,144 m³ CH₄/kg SV para L:V:Vi a THR 20 días.

Sin embargo, si se evalúa el rendimiento expresado como m³ CH₄/kg DQO eliminada, la vinaza no mejora el rendimiento en ningún THR estudiado. En este caso, el mejor valor es 0,296 m³ CH₄/g DQO eliminada para L:V a THR 20 días.

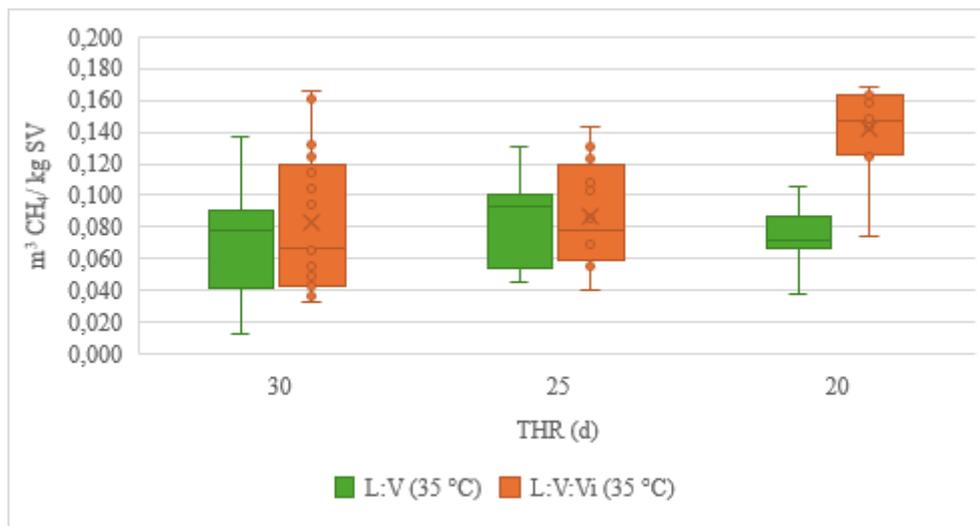


Figura 5. Comparación del rendimiento de producción de CH₄ para los sustratos L:V y L:V:Vi, en condiciones mesofílicas.

Análisis de viabilidad de aprovechamiento del digestato para uso agrícola

A partir de los resultados de las analíticas de patógenos realizadas a los efluentes de los cuatro experimentos, se logró constatar que las condiciones termofílicas permiten controlar la presencia de microorganismos patógenos en los efluentes finales (a THR_ 20 días), al no presentar ni coliformes totales, Escherichia Coli ni Salmonella sp., lo que le permite cumplir con los estándares normativos con potencial uso agrícola. (EPA, 1994)

Por otro lado, las condiciones mesofílicas (35 °C) presentan ausencia de Salmonella sp., y aunque sí se detectaron concentraciones de Coliformes Totales y Escherichia Coli en los dos casos (L:V y L:V:Vi), se encuentran dentro del rango permitido por la normatividad.

En cuanto a la concentración final de Nitrógeno en los diferentes experimentos, en la Tabla 9 se evidencia que esta aumenta respecto a la concentración inicial en los sustratos, posiblemente por la hidrólisis de las proteínas y compuestos más complejos, liberando nitrógeno para la actividad microbiana, así como también la posible formación de nitrógeno inorgánico. Respecto a la normatividad española, en el grupo 2 “abonos orgánicos” establece que, para productos de origen animal obtenidos a partir de un tratamiento, el contenido mínimo de nutrientes como el nitrógeno será del 6% en masa seca, y una relación C/N no mayor a 10, y para productos de origen animal y vegetal obtenidos a partir de un tratamiento será de 3% para N, y la relación C/N no mayor a 12. (BOE N 289, 2015).

Tabla 9. Contenido de nitrógeno en el digestato final y la relación C/N

Experimento	N final (g/L)	C (g/L)	C/N final
L:V (55 °C)	1,35	18,14	13,43
L:V (35 °C)	1,00	22,05	22,05
L:V:Vi (55 °C)	0,70	8,77	12,52
L:V:Vi (35 °C)	0,60	11,15	18,58

En ese orden, el contenido del digestato de los cuatro experimentos presenta una relación C/N supera el límite máximo por pocas unidades para ser utilizado como fertilizante orgánico en los suelos. Adicionalmente, el contenido final de nitrógeno es muy bajo para ser utilizado como nutriente en abonos orgánicos, que, comparado con la bibliografía inicial, el digestato tiene concentraciones muy bajas de nitrógeno a pesar del tipo de sustrato de origen animal utilizado. (Borowski & Kubacki, 2015)

Conclusiones

Las principales conclusiones que se pueden extraer del estudio desarrollado en las condiciones de operación indicadas ponen de manifiesto que:

- Para el sustrato L:V, las condiciones termofílicas favorecen la generación de metano a tiempos hidráulicos de retención altos de 25 días. Sin embargo, en condiciones mesofílicas, las mejores producciones de metano se obtienen para bajos tiempos hidráulicos de retención y altas cargas orgánicas. En cuanto a rendimientos, en ambas condiciones de temperatura se alcanzan los más altos rendimientos, para las condiciones termofílicas y mesofílicas.
- Para el sustrato L:V:Vi, las condiciones termofílicas consiguen un mejor rendimiento de producción de metano para todos los tiempos hidráulicos de retención estudiados. Sin embargo, respecto a la demanda química de oxígeno eliminada, se evidencia un mejor rendimiento en las condiciones mesofílicas. El mejor dato de rendimiento es para el tiempo hidráulico de retención de 30 días.
- Las temperaturas termofílicas favorecen el proceso de digestión anaerobia frente a las mesofílicas, mejorando las eficacias de eliminación tanto de sólidos volátiles como Demanda química de oxígeno para ambos sustratos. Para el sustrato con vinaza se obtienen eliminaciones mayores en comparación con el sustrato sin vinaza.
- La adición de un cosustrato (vinaza) al sustrato lodo-vertido no mejora la producción de metano porque, aunque aporta DQO soluble al sustrato, reduce la carga orgánica total suministrada susceptible de transformarse en metano. No obstante, la vinaza mejora la eficacia de depuración. Además, para las condiciones de más altas cargas orgánicas y bajos tiempos hidráulicos de retención estudiados, la adición de vinaza consigue sistemas más estables, especialmente en condiciones termofílicas.
- Los digestatos obtenidos a partir de la digestión anaerobia cumplen con las medidas de concentración de patógenos en ambos rangos de temperatura. No obstante, la concentración final de nitrógeno es muy baja, conllevando a una alta relación Carbono Nitrógeno, por lo que el digesto puede destinarse como insumo de un tratamiento adicional como el compostaje u otros procesos de digestión anaerobia donde pueda ser aporte de materia orgánica y microorganismos, y a su vez sea complementado con otros nutrientes esenciales para la planta, convirtiéndose en un sustrato de interés para el uso agrícola.

Por tanto, estas conclusiones indican que la digestión anaerobia bajo condiciones mesofílicas y termofílicas tiene comportamientos variables dependiendo del tiempo hidráulico de retención y el tipo de sustrato utilizado. En general, las condiciones mesofílicas presentan mejor estabilidad y producción de metano para tiempos de retención más cortos, mientras que las condiciones termofílicas son más eficaces en tiempos de retención más largos, salvo excepciones como la inhibición observada en el tiempo de 20 días bajo condiciones termofílicas.

Como conclusión global, indicar que es necesario realizar más estudios a menores tiempos hidráulicos de retención para determinar con mayor exactitud el efecto de la adición de vinaza sobre el comportamiento del sustrato base en la producción de metano en ambas condiciones de temperatura. Esto permitirá optimizar el proceso y mejorar la eficiencia de la valorización de residuos.

Bibliografía

- Agabo-García, C., Solera, R., & Pérez, M. (2020). First approaches to valorize fat, oil and grease (FOG) as anaerobic co-substrate with slaughterhouse wastewater: Biomethane potential, settling capacity and microbial dynamics. *Chemosphere*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127474>
- Agabo-García, C., Solera, R., & Perez, M. (2022). Anaerobic sequential batch reactor for CO-DIGESTION of slaughterhouse residues: Wastewater and activated sludge. *Energy*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124575>
- BOE N 289. (2015). Orden AAA/2564/2015, de 27 de noviembre, por la que se modifican los anexos I, II, III, IV y VI del Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. <http://www.boe.es>
- Borowski, S., & Kubacki, P. (2015). Co-digestion of pig slaughterhouse waste with sewage sludge. *Waste Management*, 40, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.021>
- Campos A. (2001). Tesis Doctoral - Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. <http://hdl.handle.net/10459.1/63733>
- Chae, K. J., Jang, A., Yim, S. K., & Kim, I. S. (2008). The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. *Bioresource Technology*, 99(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.063>
- EPA. (1994). A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-12/documents/plain-english-guide-part503-biosolids-rule.pdf>
- Flores, C. (2008). Tesis Doctoral - Tratamiento de residuos sólidos provenientes de rastros mediante digestión anaerobia. <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/350/1/Tratamiento%20de%20residuos%20s%C3%B3lidos%20provenientes%20de%20rastros%20mediante%20digesti%C3%B3n%20anaerobia.pdf>
- Granada, C. E., Hasan, C., Marder, M., Konrad, O., Vargas, L. K., Passaglia, L. M. P., Giongo, A., de Oliveira, R. R., Pereira, L. de M., de Jesus Trindade, F., & Sperotto, R. A. (2018). Biogas from slaughterhouse wastewater anaerobic digestion is driven by the archaeal family Methanobacteriaceae and bacterial families Porphyromonadaceae and Tissierellaceae. *Renewable Energy*, 118, 840–846. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.077>
- Hernández, A. M. (2016). Tesis Doctoral - Biodegradación de los residuos de un matadero mediante un digestor continuo. https://dehesa.unex.es:8443/bitstream/10662/5151/1/TDUEX_2016_Marcos_Hernandez.pdf
- Izquierdo Bautista, J., & Arévalo Hernández, J. J. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. *Ingeniería y Región*, 26, 20–28. <https://doi.org/10.25054/22161325.2527>
- Palacios, A., Riba, N., & Comas, J. (2019). Valorización agronómica de lodos depurados procedentes de un matadero de porcino trabajo final de grado ingeniería de sistemas biológicos. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/172765/memoria.pdf;jsessionid=87284ACE9CFAB85B6F93AC271BDA1905?sequence=1>
- Pitk, P., Kaparaju, P., Palatsi, J., Affes, R., & Vilu, R. (2013). Co-digestion of sewage sludge and sterilized solid slaughterhouse waste: Methane production efficiency and process limitations. *Bioresource Technology*, 134, 227–232. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.029>
- Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. In *Geoderma* (Vol. 156, Issues 3–4, pp. 75–83). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>
- Ripoll, V., Agabo-García, C., Solera, R., & Perez, M. (2023). Anaerobic digestion of slaughterhouse waste in batch and anaerobic sequential batch reactors. In *Biomass Conversion and Biorefinery* (Vol. 13, Issue 13, pp.



11457–11468). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02179-1>

Salehiyoun, A. R., Di Maria, F., Sharifi, M., Norouzi, O., Zilouei, H., & Aghbashlo, M. (2020). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and slaughterhouse waste in existing wastewater digesters. *Renewable Energy*, 145, 2503–2509. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.001>

Siddiqui, M. I., Farooqi, I. H., Basheer, F., Rameez, H., & Isa, M. H. (2023). Pretreatment of Slaughterhouse Effluent Treatment Plant Sludge Using Electro-Fenton Process for Anaerobic Digestion. *Sustainability (Switzerland)*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/su15043159>

Yepez, L. E. (2017). Evaluación del incremento de la temperatura en la digestión anaeróbica de King Grass y gallinaza para la producción de metano. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/5ef97438-5863-467d-aa31-8386d2687a37/content>

Zahedi, S., Solera, R., & Pérez, M. (2020). An eco-friendly way to valorize winery wastewater and sewage sludge: Anaerobic co-digestion. *Biomass and Bioenergy*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105779>

