

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA
Máster Universitario Oficial de
Agroecología, Desarrollo Rural y Agroturismo



COMPOSTAJE DE RESIDUOS AGRÍCOLAS Y DE
JARDINERÍA URBANA ORIENTADOS A LA
AGRICULTURA ECOLÓGICA EN EL ÁMBITO
GEOGRÁFICO DE VILLENA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Septiembre - 2018

Autora: Lorena Guixot Ponsoda

Tutores: Raúl Moral Herrero
M^a Dolores Pérez Murcia

Máster Oficial en Agroecología, Desarrollo Rural y Agroturismo

Se autoriza a la alumna **D^a Lorena Guixot Ponsoda** a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: "COMPOSTAJE DE RESIDUOS AGRÍCOLAS Y DE JARDINERÍA URBANA ORIENTADOS A LA AGRICULTURA ECOLÓGICA EN EL ÁMBITO GEOGRÁFICO DE VILLENA" realizado bajo la dirección del **Dr. Raúl Moral Herrero y la Dra. María Dolores Pérez Murcia**, debiendo cumplir las directrices para la redacción del mismo que están a su disposición en la asignatura.



Orihuela, 3 de septiembre de 2018

Miguel Hernández
Dpto. Tecnología Agroalimentaria

Fdo.: Esther Sendra Nadal

ESCUELA POLITÉCNICA
DE ORIHUELA

Directora del Master Universitario en Agroecología, Desarrollo Rural y Agroturismo





**MASTER UNIVERSITARIO OFICIAL DE
AGROECOLOGÍA, DESARROLLOR RURAL Y
AGROTURISMO**

VISTO BUENO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

CURSO 2017/2018

Director/es del trabajo
RAÚL MORAL HERREO MARIA DOLORES PÉREZ MURCIA

Dan su visto bueno al Trabajo Fin de Máster

Título del Trabajo
Compostaje de residuos agrícolas y de jardinería urbana orientados a la agricultura ecológica en el ámbito geográfico de Villena
Alumno
LORENA GUIXOT PONSODA

Orihuela, a 4 de Septiembre de 2018

Firma/s directores/es trabajo



MASTER UNIVERSITARIO OFICIAL DE AGROECOLOGÍA, DESARROLLOR RURAL Y AGROTURISMO

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Título: Compostaje de residuos agrícolas y de jardinería urbana orientados a la Agricultura Ecológica en el ámbito geográfico de Villena

Modalidad: Experimental

Autor: Lorena Guixot Ponsoda

Director/es: Raúl Moral Herrero

Convocatoria: Extraordinaria de septiembre

Número de referencias bibliográficas: 39

Número de tablas: 15

Número de figuras: 22

Palabras clave: co-compostaje, agrocompostaje, compost, Agricultura Ecológica, Villena.

RESUMEN:

El presente trabajo desarrolla un proceso de co-compostaje a gran escala mediante dos sistemas distintos de manejo (a. mediante sistema abierto de pila volteada periódicamente; b. mediante sistema cerrado en túnel con aireación forzada), en ambos casos desarrollados en las instalaciones de la Planta de Tratamiento mecánico-biológico de R.U. de VAERSA en Villena. El proceso de compostaje en sistema cerrado se realizó en túneles cerrados de 400m³ de capacidad durante un periodo de 60 días y posterior etapa de maduración en sistema abierto de pila con volteo, hasta 124 días de proceso. La evaluación de la evolución del proceso de compostaje y de la calidad del producto final en ambos casos, permite obtener conclusiones y comparar el proceso de compostaje mediante sistema abierto de pila con volteo y el realizado en sistema cerrado de túneles. Hemos estudiado y comparado el perfil térmico, los parámetros de seguimiento del proceso y la evolución de la materia orgánica para ambos sistemas de compostaje. Se han encontrado diferencias en el índice exotérmico, valor de pH y de conductividad de ambos procesos. En cambio, en la evolución de la materia orgánica no se han observado diferencias.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a Raúl Moral Herrero la oportunidad de haber podido realizar este trabajo y haberme permitido conocer la esencia del compostaje, además de su valiosa ayuda. La realización de este trabajo ha sido una gran experiencia que me ha permitido conocer la valiosa labor que realiza el grupo de Agrocompostaje de la EPSO, a ellos también quiero agradecerles su dedicación, tiempo y esfuerzo, especialmente a Teresa y a Borja. Agradecer también a la cooperativa agrícola de Villena, a la bodega Las Virtudes y al concejal del Ayuntamiento de Villena, José Tomás, su gran interés y predisposición a colaborar en este proyecto.

Quiero expresar también mi agradecimiento a mis compañeros de trabajo de la planta de residuos de VAERSA, sin su trabajo y apoyo este estudio no habría sido posible. Especialmente a los operarios de la planta cuyo trabajo diario es una labor encomiable y merecedora de un gran reconocimiento, GRACIAS de corazón.

Agradecer a mi familia todo su apoyo y comprensión, el que siempre me prestan y sin los cuales ninguna nueva andadura que me proponga sería posible.

No puedo olvidarme de mi otra gran familia, Luna, Dídac y Pepe, por soportarme y arroparme, sobre todo a Luna por su ayuda vital en este trabajo. A Ana, Salima y Guada porque todo es más fácil si se cuenta con vuestra amistad. Y a la tribu, Andre, Clarita, Diana, Ana, Ali, Anna, Germán, Marina, Jaime, Vicent, Cristabel, Pablo, Cristian, Fran y Hassane por seguir a mi lado.

A mis sobrinos, Sofía y Dídac.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Riesgos medioambientales asociados a los residuos orgánicos	9
1.2. Tipología de los residuos	12
1.2.1. Residuos de poda y de jardinería	12
1.2.2. Residuos agrícolas	13
1.2.3. Residuos agroindustriales: Almazara	14
1.3. Fundamentos del compostaje	16
1.3.1. Definición y fases del proceso de compostaje	16
1.3.2 Condiciones para el proceso de compostaje	19
1.3.3. Sistemas de compostaje	22
1.3.4. Evaluación de la calidad y el grado de madurez de un compost	22
1.4. Utilización del compost	28
1.4.1. El compostaje en el marco de la Agricultura Ecológica	29
1.4.2. Uso como enmienda orgánica	30
1.4.3. Uso como sustrato de cultivo	30
1.4.4. Legislación medioambiental aplicada al uso del compost como enmienda orgánica y como sustrato de cultivo	31
2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO	34
3. MATERIAL Y MÉTODOS	36
3.1. Diseño experimental	36
3.2. Dispositivo experimental	40
3.2.1. Características de los residuos utilizados	40
3.2.3. Sistemas de compostaje utilizados	43
3.3. Desarrollo experimental	48
3.3.1. Cálculo y preparación	48
3.3.2. Seguimiento del proceso de compostaje	50
3.3.3. Muestreo del material, volteos y otras operaciones realizadas	52
3.4 Métodos analíticos	54
3.5. Métodos estadísticos	56
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
4.1. Desarrollo de los procesos de co-compostaje: Perfil térmico	58
4.1.1. Co-compostaje en túnel con aireación forzada	59
4.1.2. Co-compostaje en pila exterior volteada periódicamente	61
4.1.3. Análisis comparativo de los perfiles térmicos en los dos escenarios de proceso	63
4.2. Seguimiento de parámetros claves durante el proceso	66
4.3. Evolución de la materia orgánica durante el proceso	71
5. CONCLUSIONES	75
6. BIBLIOGRAFÍA	77

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Riesgos medioambientales asociados a los residuos orgánicos

1.1.1 Tipos de riesgos medioambientales

Cuando se habla de riesgos para el medio ambiente asociados a los residuos orgánicos, debemos situarnos en el sistema subsuelo, suelo y plantas, así como los efectos que pueden llegar al hombre (Navarro *et al.*, 1995).

Los riesgos medioambientales asociados a los residuos orgánicos son:

- La degradación física, química y biológica del suelo
- La contaminación de aguas superficiales y subterráneas
- La contaminación atmosférica
- La contaminación de la cadena trófica
- Los problemas sanitarios

1.1.2 Principales agentes contaminantes

Los principales agentes contaminantes que provocan los riesgos medioambientales anteriormente citados son:

- La presencia de metales pesados
- Sustancias tóxicas
- La existencia de microorganismos patógenos
- El exceso de nutrientes o la deficiencia o demanda de los mismos
- Solubilidad de sales en exceso: salinidad
- Presencia de materiales no biodegradables
- Otros agentes

En la Tabla 1.1 se muestra la relación de los principales agentes contaminantes y los residuos orgánicos en cuya aplicación podrían aparecer.

Tabla 1.1. Riesgos relacionados con los residuos orgánicos (Navarro et al., 1995).

Tipo de residuo	Metales pesados	Sustancias tóxicas	Patógenos	Exceso/demanda de nutrientes	Materias No Biodegradables
Residuo ganadero			X	X	
Abonado verde				X	
Residuo de cosechas		X		X	
Agroindustriales	X	X	X	X	X
Basuras urbanas	X	X	X	X	X
Lodos de depuradora	X	X	X	X	X

Aquellos residuos derivados de procesos de transformación de productos agrícolas y ganaderos, así como los residuos urbanos (basuras y lodos), son los materiales a los que en general, se debe mostrar una mayor atención por la posible presencia de agentes contaminantes y componentes no biodegradables.

Metales pesados

Los metales pesados, al igual que otros elementos como el As, son elementos tóxicos y peligrosos por su incidencia en procesos bioquímicamente activos en los organismos vivos. Un aspecto muy importante de los elementos que está relacionado con la calidad ambiental, es la movilidad de los mismos en los suelos donde se encuentran. El grado de movilidad de los elementos en el perfil de suelo dependerá de las condiciones ambientales (humedad, temperatura, precipitación, etc.) y de las características del suelo.

Sustancias tóxicas

Se trataría de los compuestos orgánicos tales como plaguicidas (organoclorados y organofosforados principalmente), y otros con mayor o menor persistencia a la degradación biológica como agentes tensioactivos y derivados fenólicos.

Patógenos

La presencia de organismos patógenos está relacionada con el tipo de residuo y su origen. Es uno de los problemas más importantes que se dan en los materiales residuales frescos, ya

que pueden afectar al hombre. Por ello resulta importante realizar procesos de acondicionamiento previo que nos permitan controlar y eliminar este riesgo tan importante, así como lograr que la temperatura durante el proceso de compostaje sea adecuada para poder garantizar la higienización del residuo.

Exceso o demanda de nutrientes

Los residuos cuando son adicionados a los suelos pueden precisar de aporte suplementario de N para que se desarrollen adecuadamente los procesos de mineralización del material. Esto sucede como consecuencia de la elevada relación C/N que posee el residuo. Por ello, un riesgo que se puede plantear es la demanda inicial de nutrientes. Es importante realizar la aplicación del residuo orgánico previamente compostado, además de determinar la mezcla de los residuos a compostar para garantizar que el producto final tenga una relación C/N inferior a 20, con el fin de evitar este riesgo.

Materiales no biodegradables

Cabe la posibilidad de que se dé la presencia de materiales no biodegradables o inertes en los residuos orgánicos frescos, y por tanto también en el residuo ya compostado. La presencia y cantidad de estos materiales dependerá del tipo de residuo y de su origen. El manejo del residuo orgánico previo a su aplicación también condicionará el grado de contaminación con estos materiales no biodegradables

Salinidad

Existen residuos orgánicos que presentan especialmente un elevado riesgo de salinidad del suelo donde se aplique, este sería el caso de las algas. Por lo que se debe tener en consideración la marcada concentración salina de determinados residuos.

Otros riesgos

Otros riesgos aun no comentados que pueden deberse a muchas causas. Como por ejemplo, la aplicación del residuo en los suelos mediante maquinaria pesada implica en muchas ocasiones la compactación de los mismos. Una incorrecta técnica de aplicación puede llevar a que se produzcan pérdidas por lixiviación de nutrientes o de sustancias tóxicas que

ocasionen problemas de contaminación de acuíferos, además de las pérdidas para la planta de elementos básicos en su nutrición. O la existencia de semillas de vegetales (malas hierbas) no deseables.

1.2. Tipología de los residuos

1.2.1. Residuos de poda y de jardinería

Origen y descripción de los residuos de poda y de jardinería

Los residuos orgánicos procedentes del mantenimiento de las zonas verdes en espacios públicos y privados, se incluyen dentro de la denominación de biorresiduo. La Ley 22/2011, de 28 de Julio, de residuos y suelos contaminados se define el término biorresiduo como residuo biodegradable de jardines y parques, residuos alimentarios y de cocinas procedentes de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimiento de venta al por menor, así como residuos comparables procedentes de plantas de procesado de alimentos.

No gestionar correctamente este tipo de residuo supone una gran pérdida de materia orgánica potencialmente valorizable. La gestión de residuos de poda y de jardinería está dentro del ámbito de la gestión municipal de los residuos sólidos urbanos.

Características de los residuos de poda y jardinería

La poda está constituida por fracción vegetal en forma de restos vegetales de tamaño grande y de tipo leñoso. Los restos de jardinería son restos vegetales de pequeño tamaño y de tipo no leñoso que procede de servicios de jardinería (ramos de flores mustios, malas hierbas, césped, pequeñas ramas de poda, hojarasca, etc.).

Es importante destacar la función como agente estructurante de los residuos de poda y jardinería, por su función de aportar estructura, porosidad y resistencia a la compactación de la mezcla a compostar. En general estos materiales se caracterizan por una baja humedad a modo que pueden compensar y absorber el exceso de humedad habitualmente presente en

los residuos orgánicos. Además, presentan una elevada cantidad de materia orgánica y carbono orgánico, principalmente lignina, celulosa y hemicelulosa, de modo que su relación C/N es alta. Por tanto, se consideran ideales para compensar las bajas relaciones C/N de muchos residuos orgánicos y minimizar así las pérdidas de nitrógeno en el proceso de compostaje.

1.2.2. Residuos agrícolas

Origen y descripción de los residuos agrícolas

De forma amplia se puede definir como residuo agrícola todo aquel residuo que proviene de la actividad agrícola, independientemente de su naturaleza. En este contexto el concepto de residuo agrícola hará alusión específicamente a todo material de naturaleza orgánica que se genere en los sistemas agrícolas o forestales, más concretamente a los residuos de cosechas, entendiéndose como tal la fracción de cultivo que no constituye aquella parte de cosecha que no se destina a comercialización y a los restos de poda de cultivos leñosos.

Con los datos obtenidos de Van-Camp *et al.* (2001) y Martínez (2006) correspondientes a los años 1999 y 2000 sobre la producción de los principales cultivos y de los residuos generados, se observa que la mayor producción corresponde a cereales, siendo trigo, maíz y cebada los cultivos que generan mayor residuo, seguido de los cultivos de hortalizas (López y Boluda, 2008).

Características de los residuos agrícolas

Los residuos agrícolas constituyen una fuente de materia orgánica exógena que pueden ser devueltos al suelo, mejorar el desarrollo de los cultivos y aumentar la calidad del suelo. Cabe destacar también que el compostaje de los residuos agrícolas es el tratamiento más habitual.

La composición del residuo agrícola suele ser variada dependiendo del tipo de cultivo del que proceda. Generalmente son residuos que presentan:

- Contenido hídrico muy variable, en función del desarrollo del cultivo en el momento de la recolección.
- Variable concentración de la fracción mineral.

- Elevado contenido en materia orgánica.
- Elevado porcentaje de C y bajo de N, por lo que la relación C/N será alta, aunque variará en función del tipo de cultivo.
- Nutrientes como K, P, Mg y Ca, se encuentra en menor cantidad y en contenido variable según el tipo de cultivo.

Los residuos de cereales suelen presentar baja humedad (10-15%), alto contenido de C (37-47%) y materia orgánica (77-85%), y bajo contenido en N (0.3-1.1%). Por ello la relación C/N suele ser elevada (50-100). Suelen presentar un elevado porcentaje de biomoléculas de fácil degradación (30-50%).

Los residuos hortícolas son cosechados antes de la senescencia vegetal, es por ello que estos residuos presentan un alto contenido en humedad y, por lo general, son más fácilmente biodegradables. Presentan un elevado contenido de C, pero también de N, por lo que la relación C/N es baja (15-30). Comúnmente, se trata de residuos de cultivos hortícolas comestibles y de las producciones de flor cortada, raíces o tubérculos extensivos.

1.2.3. Residuos agroindustriales: Almazara

Origen y descripción de los residuos de almazara

El cultivo del olivo y la actividad de la industria oleícola tienen una gran importancia socioeconómica en los países de la Cuenca del Mediterráneo. Los residuos procedentes de la industria del aceite de la aceituna constituyen un problema común en los países de clima mediterráneo, debido a que confluye una producción estacional y localizada de los residuos con una alta carga orgánica de elevado contenido en sólidos.

Para la extracción, la aceituna se deposita en la almazara donde se clasifica y limpia de hojas e impurezas antes de llevar a cabo la preparación de la pasta mediante la operación molienda y batido. La molienda es la trituración del fruto con el fin de liberar el aceite de la pulpa, mientras que la finalidad del batido es romper la emulsión aceite-agua y reunir el aceite liberado. A partir de la masa batida, se procede a separar la fase líquida de la sólida mediante dos métodos: presión (sistema tradicional) o centrifugación.

Mediante el sistema de presión se procede a filtrar la masa batida, reteniéndose la parte sólida (orujo) en los capachos y liberando el mosto oleoso (fase líquida), el cual se somete a decantación o centrifugación para separar la fase oleosa obteniendo el aceite y el alpechín. Mediante el sistema de centrifugación se separan las diferentes fracciones por diferencia de densidad. Se distinguen los sistemas de 3 fases, en los que se separa el orujo, el alpechín y el aceite, y los de dos fases donde se obtiene el aceite y la mezcla de orujo con fracciones acuosas (alperujo) (Cegarra y Paredes, 2008).

Características de los residuos de almazara: Alperujo.

El alperujo es un subproducto de consistencia semilíquida que puede tener propiedades fitotóxicas si se aplica directamente como enmienda. Su contenido en materia orgánica es del 95%, la humedad del 50-55% y presenta un pH ácido en torno a 6 (García-Morales *et al.*, 2015).



Tabla 1.2. Características de las muestras de alperujo (n=20) (Alburquerque et al., 2004)

Parámetros ¹	Media	Intervalo
Humedad	64,0	55,6-74,5
pH	5,32	4,86-6,45
Conductividad eléctrica (dS m⁻¹)	3,42	0,88-4,76
Materia orgánica (g/Kg)	933	849-976
Lignina (g/Kg)	426,3	323,0-556,5
Celulosa (g/Kg)	193,6	140,2-249,0
Hemicelulosa (g/Kg)	347,4	273,0-415,8
Carbono orgánico total (g/Kg)	519,8	495,0-539,2
Nitrógeno total (g/Kg)	11,5	7,0-18,4
Relación C/N	47,2	28,2-72,9
Contenido graso (g/Kg)	121,0	77,5-194,6
Carbohidratos solubles (g/Kg)	95,8	12,9-164,0
Polifenoles hidrosolubles (g/Kg)	14,2	6,2-23,9
Fósforo (g/Kg)	1,2	0,7-2,2
Potasio (g/Kg)	19,8	7,7-29,7
Calcio (g/Kg)	4,5	1,7-9,2
Magnesio (g/Kg)	1,7	0,7-3,8
Hierro (mg/Kg)	614	78-1.462
Cobre (mg/Kg)	17	12-29
Manganeso (mg/Kg)	16	5-39
Zinc (mg/Kg)	21	10-37

¹Datos referidos a materia seca.

El elevado contenido en agua, que le confiere la consistencia semilíquida, unido al reducido tamaño de partícula establece una porosidad muy reducida del material que dificulta la correcta aireación durante su compostaje. Además, como se puede observar en la Tabla 1.2, presenta baja biodegradabilidad y elevada relación C/N, lo que en definitiva hace que sea un producto poco apto para el compostaje. Por tanto, la viabilidad del proceso depende en gran medida de los llamados agentes estructurantes que se adicionen a la mezcla para mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

1.3. Fundamentos del compostaje

1.3.1. Definición y fases del proceso de compostaje

El compostaje es un proceso biológico, aerobio y termófilo controlado de estabilización de la materia orgánica de los residuos biodegradables. Las variaciones térmicas que se dan durante el proceso permiten la sucesión de poblaciones microbianas que contribuyen a eliminar patógenos y a modificar las propiedades fisicoquímicas del sustrato.

Se diferencian cuatro fases durante el proceso de acuerdo a las variaciones térmicas y metabólicas que se producen. Alternativamente, estas cuatro fases se pueden englobar en dos fases en función de la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes: fase bio-oxidativa y fase de maduración (Moreno y Mormeneo, 2008) (Figura 1.1).

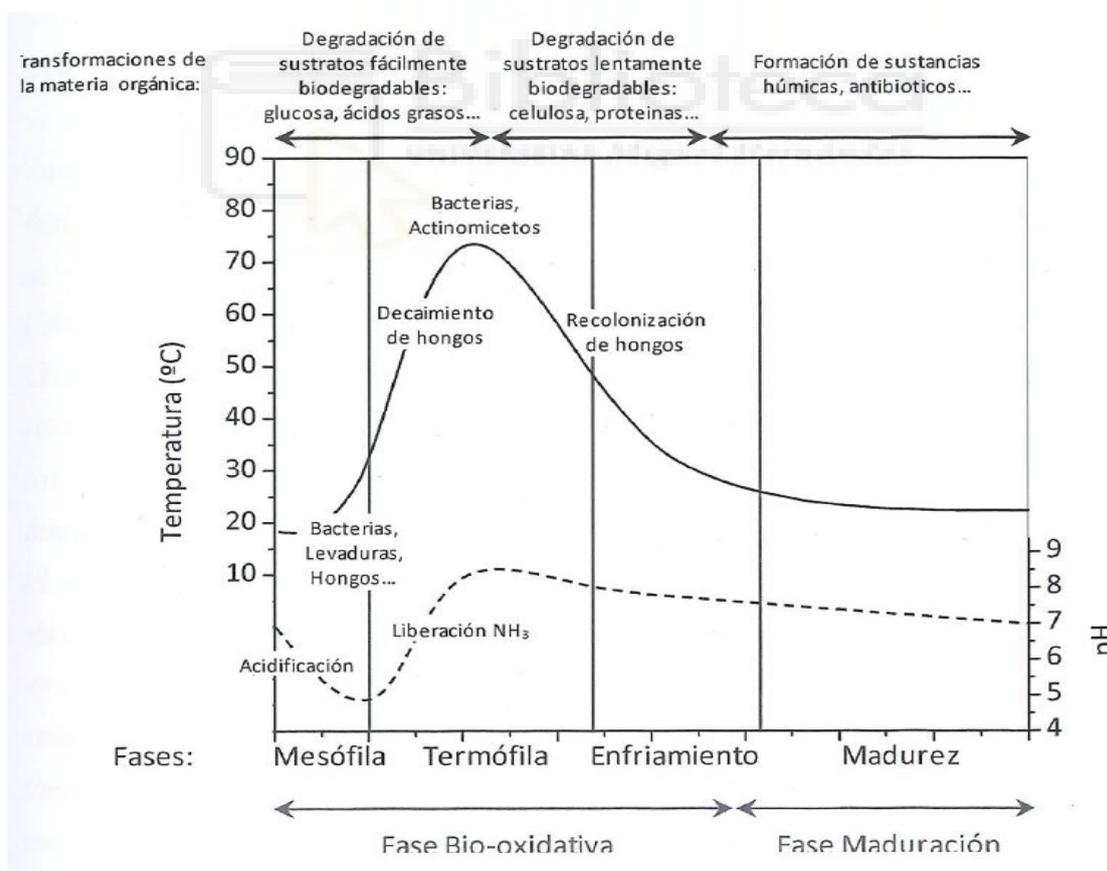


Figura 1.1. Evolución de la Temperatura y del pH durante el proceso de compostaje. Adaptado de Dalzell et al., (1981).

a. Fase bio-oxidativa: En esta fase existe una alta disponibilidad de nutrientes y una elevada actividad microbiana.

1. Fase mesófila: Al inicio del proceso la pila está a temperatura ambiente, a medida que la población microbiana se multiplica aumenta la temperatura rápidamente. Actúan poblaciones microbianas mesófilas con crecimientos entre temperaturas de 10°C a 40°C. (Bacterias y hongos). En esta etapa destaca la formación de ácidos orgánicos y el descenso del pH con la acidificación.
2. Fase termófila: Se producen procesos metabólicos por actividad de poblaciones microbianas termófilas con crecimiento entre 40°C y 70°C. Se distinguen dos etapas, una primera donde la temperatura de 40°C sube progresivamente a los 60°C, y otra segunda etapa más lenta durante la cual la temperatura alcanza los 75°C. Las poblaciones de bacterias y hongos mesofílicos mueren o permanecen en estado aletargado mientras que las bacterias termofílicas y actinomicetos. No se aconseja superar los 70°C porque frena el proceso. La degradación de los ácidos obtenidos en la etapa anterior provoca el incremento del pH pasando desde 5,5 hasta 7,5 donde permanecerá casi constante hasta el final del proceso, el color del compost se pone más oscuro paulatinamente y el olor original se comienza a sustituir por olor a tierra. Esta es la fase también llamada de higienización, donde una temperatura de al menos de 55°C durante un mínimo de 3 días provoca la eliminación de microorganismos patógenos, como la Salmonella y la *Escherichia coli* y hace inviables semillas que pueda contener la pila.
3. Fase de enfriamiento: Se produce un descenso de la temperatura hasta alcanzar la temperatura inicial, y su duración es de unos 15 días. La actividad microbiana comienza a descender debido al descenso en la disponibilidad de nutrientes.

b. Fase de maduración: La disponibilidad de nutrientes es baja.

4. Fase de maduración: La temperatura baja hasta igualarse con la temperatura ambiente. En esta fase se produce la formación de las sustancias húmicas y el pH se estabiliza.

Estas fases se pueden desarrollar de forma única o periódica en función del tipo de sistema de compostaje empleado. En pilas estáticas con volteos periódicos se reproducen de forma secuencial cada una de estas etapas tras el volteo. Por otro lado, en sistemas estáticos con aireación forzada se desarrollan estas fases de forma única pero con una fase termófila más prolongada en el tiempo.

Una vez finalizado el proceso se obtiene un producto humificado estable o maduro, en el que los mecanismos de descomposición microbiana de la materia orgánica ya no ocurren o lo hacen de forma muy lenta.

1.3.2 Condiciones para el proceso de compostaje

Las variables más importantes que afectan a los sistemas de compostaje, según Díaz *et al.* (2008), se pueden clasificar en dos tipos:

- Parámetros de seguimiento: deben ser medidos y adecuados para garantizar que el proceso se desarrolle en condiciones óptimas. Estos parámetros de seguimiento para el control del proceso son: Temperatura, humedad, pH, aireación.
- Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato: aquellos que se han de medir y adecuar a su valor correcto al inicio del proceso.

a. Parámetros de seguimiento

- Temperatura: es el parámetro de seguimiento del proceso más importante ya que su evolución representa el propio proceso de compostaje. Existe una relación directa entre la temperatura y la evolución de la degradación de la materia orgánica. Conforme va creciendo la población microbiana se genera calor aumentando así la temperatura del material, por lo que es un claro síntoma de la actividad microbiana.

Cada especie de microorganismo tiene su rango de temperatura óptima, 15-40°C para los mesófilos, 40-70°C para los termófilos (Chica *et al.*, 2015). Los microorganismos que en cada fase se encuentren en su temperatura óptima serán los más beneficiados y los que principalmente descompondrán la materia orgánica del residuo, produciéndose una generación de calor que hará aumentar la

temperatura de la pila a compostar. Fuera de los valores óptimos la actividad microbiana se ralentiza afectando negativamente al proceso.

- Humedad: la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos. Es junto a la temperatura un parámetro fundamental. Una humedad óptima (50-70%) permite el transporte de sustancias solubles que sirven de nutrientes a los microorganismos. Además también permite la circulación de gases por los poros de la masa, como el oxígeno y garantizar las condiciones aerobias del proceso.

Existen valores umbrales: <30% decrece mucho la actividad microbiana, y >70% el agua desplaza al aire en los espacios libres existentes en la masa reduciendo el oxígeno y produciendo anaerobiosis. Esta condición genera lentitud en el proceso y malos olores.

- pH: Influye directamente sobre los procesos microbianos. Es una medida indirecta para controlar la aireación de la masa ya que en condiciones anaerobias el pH desciende.

El pH sigue una evolución durante el proceso:

- Fase inicial de acidificación – valores bajos, debido a la liberación de ácidos orgánicos. (Ocurre durante el inicio de la fase mesófila inicial).
 - Fase de alcalinización – valores <8,5. Debido a la generación de amoníaco procedente de la descomposición de proteínas.
 - Fase de neutralidad – valores cercanos a 7,5. Debido a la formación de ácidos húmicos. (Coincide con la fase de enfriamiento y la de maduración).
- Aireación: El oxígeno es necesario para que el proceso se desarrolle correctamente ya que los microorganismos que intervienen son aerobios. Mediante sistemas de aireación o por volteos se trata de realizar los aportes de oxígeno necesarios en el proceso. Una aireación insuficiente provoca que se den condiciones anaerobias,

descomposición lenta de la materia orgánica, formación de sulfuro de hidrógeno y malos olores. Una aireación excesiva provocaría el enfriamiento de la masa y pérdida de humedad, reduciendo la actividad metabólica. Existe una relación directa de las necesidades de oxígeno y la actividad microbiana, coincidiendo la mayor demanda de oxígeno con la etapa de mayor actividad de los microorganismos. El nivel de oxígeno es óptimo entre los valores del 18-20 %.

b. Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato

- Tamaño de partícula: cuanto menor sea la partícula, mayor será la superficie expuesta al ataque microbiano por unidad de masa, mejorando el proceso. Las dimensiones consideradas óptimas por los autores, son entre 1 y 5 cm.
- Relación C/N: el intervalo teórico óptimo de C/N para el compostaje de un producto es de 25-30. Valores por encima de 40 la actividad biológica disminuye y los microorganismos deben oxidar el exceso de carbono con la consiguiente ralentización del proceso. Si por el contrario los valores son menores a 25, se produce pérdida de nitrógeno en forma amoniacal.
- Nutrientes: La disponibilidad de elementos nutritivos en el compost final determinará su utilidad agronómica y especialmente su capacidad fertilizante. Entre los elementos que componen el sustrato destacan el C, N y P, que son macronutrientes fundamentales para el desarrollo microbiano. Además existen otros nutrientes presentes en menor cantidad, micronutrientes, que tiene un papel fundamental en la síntesis de enzimas, metabolismo de los microorganismos y en los mecanismos de transporte.
- Materia orgánica: es el principal factor para determinar la calidad agronómica del compost. Durante el proceso de compostaje la materia orgánica tiende a disminuir debido a su mineralización.
- Conductividad eléctrica (EC): está determinada por la naturaleza y composición del material de partida, fundamentalmente por su concentración en sales. La EC tiende a aumentar durante el proceso de compostaje debido a la mineralización de la materia

orgánica. La dosis de compost que puede añadirse a un suelo debe ser proporcional a la EC del compost debido a que un exceso en la salinidad del suelo dificulta la absorción de agua por las raíces de las plantas.

1.3.3. Sistemas de compostaje

La clasificación más común se realiza en función del aislamiento del material a compostar con respecto al exterior, en cuyo caso se tendrán: sistemas abiertos, semi-cerrados y cerrados (Chica y García, 2008).

- Sistemas abiertos: la forma de amontonamiento del material es muy variado (pilas, mesetas, zanjas, etc.), así como los sistemas de manipulación de éste. Se utilizan principalmente sistemas dinámicos, ya sea por medio de volteadoras o con maquinaria inespecífica (palas mecánicas), también se utilizan métodos estáticos con sistemas de aireación pasiva o forzada, aunque son menos frecuentes.
- Sistemas semi-cerrados: en este tipo de sistemas todas las operaciones se realizan dentro de una nave cubierta y cerrada. El sistema más conocido es el de las trincheras en las que el material se coloca entre muretes longitudinales y es volteado por distintos procedimientos.
- Sistemas cerrados: el material a compostar no está nunca en contacto directo con el exterior, sino a través de un sistema de conductos y turbinas, lo que facilita el tratamiento de los olores generados en la fermentación. Son dispositivos estancos de diversos tipos, como túneles estáticos, contenedores o tambores rotatorios. En este tipo de sistemas las distintas variables (humedad, composición, temperatura, pH, etc.) pueden ser registradas, controladas, y optimizadas. Esto conlleva una degradación más rápida y completa con un mínimo de impacto ambiental en las instalaciones.

1.3.4. Evaluación de la calidad y el grado de madurez de un compost

Evaluación de calidad de un compost

El concepto de calidad es difícil de definir y puede resultar subjetivo. Se debería considerar la calidad de un compost a partir de las aquellas características que resulten de aplicar un proceso respetuoso con el medio ambiente, acorde una gestión racional de los residuos (economía circular) y que tenga como objetivo la obtención de un producto de aplicación agrícola. Por tanto, el compost producido deberá tener una calidad adecuada a su uso y unas características constantes en el tiempo (Masaguer y Benito, 2008).

Los requerimientos de calidad del compost deberían ir dirigidos a conseguir: aspecto y olor aceptables, correcta higienización, inertes y contaminantes sin superar un nivel de trazas, nivel conocido de componentes agrónomicamente útiles, y características homogéneas y constantes. Además, debe de poder ser almacenado sin experimentar alteraciones. Los aspectos más destacables que afectan a la calidad del compost son: El material inicial, el proceso de compostaje y las condiciones de almacenamiento (Masaguer y Benito, 2008).

Existe cierta dificultad a la hora de establecer unos criterios generales de calidad debido a que siempre van a depender en mayor o menor medida del origen del compost y de su uso final. Es por ello que, ante la disparidad de criterios, existen numerosas publicaciones de organizaciones sobre normas, especificaciones y recomendaciones sobre la calidad del compost.

Los parámetros que pueden utilizarse para valorar la calidad del compost se resumen en la Tabla 1.3 (Soliva, 2001).

Tabla 1.3. Parámetros de calidad del compost (Soliva, 2001)

Propiedad	Parámetro	Informa sobre
FÍSICAS	Densidad aparente	Transporte, manejo y aplicación
	Color	Aceptación
	Olor	Aceptación, higiene e impacto ambiental
	Humedad	Transporte y manejo
	Granulometría	Manejo, aceptación y efectos en suelo/sustrato
	Capacidad retención de agua	Efectos suelo/sustrato y ahorro de agua
	Inertes	Aceptación, impacto ambiental y seguridad
QUÍMICAS	Contenido y estabilidad de la materia orgánica	Efecto suelo/sustrato, vegetales, y aceptación
	Nutrientes minerales	Efectos suelo/sustrato y vegetales
	Contaminantes	Salud, efectos sobre suelo/sustrato y vegetales, e impacto ambiental
	Sales solubles	Efectos suelo/sustrato y vegetales, e impacto ambiental
	pH	Disponibilidad de nutrientes
BIOLÓGICAS	Patógenos	Salud e impacto ambiental
	Semillas de malas hierbas	Efectos suelo/sustrato y la producción

Grado de madurez de un compost

Desde el punto de vista práctico se entiende como un compost maduro un material térmicamente estabilizado. La aplicación agrícola de un compost sin un adecuado grado de madurez, puede ocasionar efectos negativos muy graves, como:

- Originar una disminución del contenido de oxígeno a nivel de las raíces.
- Si la relación C/N es alta, se produce un bloqueo de nitrógeno en el suelo.
- Excesivo aumento de la temperatura del suelo.
- Acumulación de sustancias fitotóxicas.
- No se produce la eliminación de microorganismos patógenos.

Para evitar posibles efectos negativos y obtener un compost de calidad es imprescindible establecer correctamente el grado de madurez. La mayoría de métodos o criterios utilizados

en la actualidad están basados en el estudio de la evolución de determinados parámetros físico-químicos y bioquímicos durante el proceso de compostaje.

Los test o métodos propuestos para la evaluación del grado de madurez pueden agruparse en cinco tipos según la naturaleza del parámetro que se evalúan (Iglesias *et al.*, 2008):

a. Parámetros sensoriales de la madurez

Son criterios de aplicación muy común, pero sólo dan una idea aproximada del grado de madurez del compost. Aunque pueden ser suficientes para una aplicación práctica en plantas de compostaje, han de considerarse criterios orientativos.

- Temperatura: la evolución de la temperatura durante el compostaje es un reflejo de la actividad metabólica de los microorganismos implicados en el proceso, por lo que es un buen indicador del final de la fase bio-oxidativa en la cual el compost ha adquirido cierta madurez, ya que la curva de temperatura se estabiliza definitivamente.

- Olor: los materiales frescos desprenden compuestos como amoníaco, aminas y en general ácidos orgánicos, que producen malos olores. El olor desagradable producido por estos compuestos desaparece con la maduración del producto.

- Color: durante el proceso tiene lugar, de manera gradual, el oscurecimiento del material o melanización como consecuencia de la rápida humificación de la materia orgánica. El producto final a medida que va madurando ha de presentar un color pardo oscuro, debido a la formación de grupos cromóforos y a la síntesis de melanoidinas. Existen técnicas sencillas basadas en sistemas colorímetros que determinan el proceso de oscurecimiento con mayor precisión que el seguimiento visual (Sugahara *et al.*, 1979).

b. Evolución de parámetros de la biomasa microbiana

A través de métodos que determinan el grado de estabilidad biológica del material. Pueden distinguirse cuatro tipos de métodos (Iglesias *et al.*, 2008):

- Cuantificación de la microbiota y biomarcadores de la diversidad microbiana: Método directo de recuento total de microorganismo a lo largo del proceso de compostaje. La biomasa decrece a medida que el producto alcanza madurez.
- Respirometría: emplean el estudio de la respiración del compost (absorción de oxígeno o desprendimiento de anhídrido carbónico). Es la técnica más fiable para ser considerada como indicador de madurez para todo tipo de residuos. Se considera maduro un compost cuando no consume más de 40 mg de oxígeno por Kg de materia seca en una hora, tras incubarlo durante 3 días (Iglesias y Pérez, 1989).
- Parámetros bioquímicos de la actividad microbiana: métodos basados en la identificación de la microflora específica y en el estudio de enzimas indicadores de la actividad celular en cada fase del compostaje.
- Análisis de constituyentes fácilmente biodegradables: Morel *et al.* (1985) indican que el parámetro que caracteriza en mayor medida el estado de maduración del compost es la relación entre el carbono orgánico total y el porcentaje de carbohidratos solubles en agua caliente, y proponen como criterio de madurez un índice de degradabilidad.

c. Estudio de la materia orgánica humificada

Parámetros basados en estudios sobre la naturaleza y composición de las fracciones húmicas del compost.

- Carbono extraíble: numerosos autores han propuesto la riqueza total en C húmico como índice de madurez dado que en residuos agrícolas y estiércoles normalmente se observa un incremento en la riqueza de C húmico. Pero en el caso de compostaje de RSU y lodos el C húmico total permanece constante durante todo el proceso (Iglesias y Pérez, 1992b, 1992c). Por lo tanto el porcentaje de C húmico total no puede considerarse como un índice adecuado de humificación de materia orgánica.
- Ratio AH/AF: durante el compostaje de residuos no existe una auténtica síntesis de nuevas sustancias húmicas y lo que ocurre es un incremento paulatino de la tasa de polimeración, incremento de la fracción de AH (ácido húmico), por transformación, reestructuración y

condensación de sustancias que se pueden adscribir a AF (tipo fulvoácidos). Por lo que se puede decir que la fracción de AH se forma paulatinamente a partir de la fracción de AF (ácido flúvico) (Iglesias y Pérez, 1992b y 1992c). Por lo tanto el ratio AH/AF puede considerarse como índice de humificación y constituye un parámetro importante para deducir el grado de madurez del compost.

d. Indicadores químicos de la madurez

- Ratio C/N fase sólida: es el criterio que con más asiduidad se ha venido empleando para determinar el grado de madurez del compost y definir su calidad agronómica. Muchos autores han propuesto una relación C/N por debajo de 20 como indicativa de un aceptable nivel de madurez (Poincelot, 1974; Cárdenas y Wang, 1980; Golueke, 1991) o con un valor menor de 15 (Juste, 1980).

- Ratio C/N fase acuosa: El proceso de compostaje es una descomposición bioquímica de la materia orgánica que se producen fundamentalmente en la fase acuosa, es por ello que mediante el estudio de los cambios bioquímicos a lo largo del compostaje en extractos en agua es posible deducir el estado de maduración del compost. Disminuye paulatinamente desde valores entre 30-40 hasta 5-6, y diversos autores proponen este parámetro como indicador absoluto de madurez (Chanyasak y Kubota, 1981).

- Carbono orgánico soluble en agua (Cw): muchos autores han propuesto, como alternativa a la reacción C/N tanto en fase sólida como acuosa, la determinación del Cw como simple índice de madurez, ya que siempre se observa un descenso paulatino durante el compostaje, hasta una práctica esterilización. Sin embargo los valores límites propuestos varían considerablemente, dependiendo del material inicial.

- Capacidad de intercambio catiónico: aumenta progresivamente a medida que progresa la humificación de la materia orgánica, ya que el incremento del grado de polimerización provoca un aumento considerable de la superficie específica de las macromoléculas húmicas y un aumento progresivo de grupos carboxilos aunque en menor medida (Lax, A., Roig, A. y Costa, F., 1986). Este incremento de la CIC ha sido descrito por numerosos autores en todo

tipo de residuos y por lo tanto ha sido aceptado universalmente como criterio de madurez e indirectamente como criterio de humificación de materiales orgánicos (Roig *et al.*, 1988).

- Ratio N-NH₄⁺/N-NO₃⁻: Finstein y Miller (1985) definen el concepto de madurez en términos de nitrificación y escriben que cuando en el proceso de compostaje aparecen cantidades apreciables de nitratos y/o nitritos se puede considerar que el compost está suficientemente maduro, ya que durante la fase termófila la nitrificación está prácticamente inhibida.

- Presencia de compuestos reductores: la presencia de compuestos tipo amoníaco o sulfhídrico, característicos de un potencial rédox inadecuado, es indicativa, al igual que el pH ácido, de procesos anaerobios y muestran que los residuos se encuentran aún en período de intensa descomposición. Por lo que la presencia de estos compuestos indica inmadurez del compost.

e. Métodos biológicos

Son los ensayos más determinantes, ya que ponen de manifiesto la presencia de productos fitotóxicos que no son detectados por los métodos anteriores, siendo concluyente para establecer el uso final del producto.

- Método de germinación: test propuestos por Zucconi *et al.* (1981), aunque el más generalizado es éste último que utiliza semillas de *Lepidium sativum* y que calcula un índice de germinación que combina el porcentaje de germinación y la longitud media de las raíces.

- Método de crecimiento: supone la evaluación del efecto del compost sobre distintos vegetales, siendo los más corrientes el maíz y la cebada.

Por todos los métodos expuestos anteriormente, se puede presumir el grado de dificultad que supone la determinación del índice de madurez universal y extrapolable a todos los materiales compostables. Y sin olvidarnos que en general la calidad del producto dependerá principalmente de los materiales de origen y de las condiciones de temperatura, humedad y aireación que existan durante el proceso.

1.4. Utilización del compost

Cuando se va a utilizar un compost, es necesario conocer su composición química, necesaria para evaluar la idoneidad de ese compost elegido para un determinado uso y establecer las estrategias de gestión oportunas. Es necesario garantizar que los productos utilizados en la nutrición vegetal o en la mejora de las características del suelo cumplan con dos requisitos fundamentales:

- Eficacia agronómica
- Ausencia de efectos perjudiciales para la salud y el medio ambiente

La valorización agrícola de los diferentes compost puede realizarse mediante diferentes vías entre las que cabe diferenciar su uso como enmienda orgánica y sustrato de cultivo. Para cada uno de estos usos hay que saber de forma específica los factores más determinantes de su eficacia, tanto los derivados de las características del compost como los asociados a la zona en la que se vaya a utilizar así como los requerimientos de los cultivos o vegetación. También se deberá tener en cuenta el marco legislativo y normativa aplicable en cada caso.

1.4.1. El compostaje en el marco de la Agricultura Ecológica

Una característica distintiva de las diferentes estrategias de cultivo ecológico es la utilización de los productos orgánicos como productos fertilizantes, tomando la técnica de compostaje como el método más empleado en el marco de la Agricultura Ecológica.

A pesar de que no existe una distinción del propio método de compostaje que diferencie entre un compostaje ecológico o no ecológico, sí se aplican diferenciaciones en el manejo práctico que pueden resultar ser más consecuentes con los principios que persigue la Agricultura Ecológica. La principal diferencia radica en el objetivo del proceso de compostaje, siendo en agricultura convencional la obtención de un material estable que pueda tener mayor variedad de aplicaciones o valorizaciones del tipo energético, mientras que en Agricultura Ecológica el objetivo es la obtención de productos fertilizantes y enmiendas orgánicas.

Otra diferenciación importante es que los residuos a emplear en el proceso deben estar autorizados por los reglamentos de aplicación. Es decir, que los residuos provengan de

actividades calificables o certificables como ecológicas. Si bien la norma dictaría éste proceder, la práctica indica que se suelen admitir residuos que cumplen estrictos criterios de calidad independientemente de su origen, con el fin de evitar los problemas derivados de la escasez y el elevado coste de los residuos estrictamente ecológicos. Es por ello que quedan descartados dos de los residuos más habituales del compostaje convencional, los residuos urbanos no separados en origen y los lodos de depuradora, así como cualquier otro residuo orgánico agroindustrial proveniente de un proceso productivo en el que se han empleado compuestos químicos de síntesis. Por el contrario, es habitual encontrar en compostaje con aplicación en Agricultura Ecológica residuos nada habituales en compostaje con aplicación convencional como son los restos de vegetación natural, plantas aromáticas y medicinales, etc. (Canet y Albiach, 2008).

1.4.2. Uso como enmienda orgánica

Este uso pretende incrementar el contenido en sustancias húmicas del suelo como enmienda de corrección en suelos pobres o de mantenimiento en rotaciones o producciones agrícolas con balance húmico negativo, así como la mejora general de la fertilidad física, química y biológica con secuencia del aumento del nivel de sustancias húmicas. El uso de un compost bien elaborado como enmienda orgánica disminuye el uso de fertilizantes inorgánicos y hace que parte del carbono que contiene la materia orgánica del compost se fije al suelo, por lo que es de sumo interés conocer tanto el contenido en materia orgánica total del compost, como su contenido en materia orgánica resistente (MOR) que rendirá sustancias húmicas al suelo y utilizar compost que tengan un contenido de nitrógeno orgánico y mineral bajo, y así evitar la contaminación por nitratos. Además, se ha observado un descenso progresivo de los niveles de materia orgánica lo que provoca paulatinamente una disminución de la fertilidad y un aumento de la erosionabilidad (Favoiono y Hogg, 2008).

Los programas de enmienda orgánica y/o de corrección en los sistemas agrícolas se ejecutan generalmente a largo plazo, y consisten en realizar un conjunto de aplicaciones que permitirán un adecuado ajuste de las dinámicas biológicas y de fertilidad del suelo.

1.4.3. Uso como sustrato de cultivo

El uso del compost en el cultivo sin suelo obliga a un alto nivel de exigencias en cuanto a la calidad de estos productos, ya que unas características físicas, químicas o biológicas inapropiadas podrían hacerlo inútil como sustrato. El uso del compost en el cultivo sin suelo es una forma de valorización de este producto mucho más reciente que las tradicionales como enmienda orgánica o fertilizante orgánico. El compost puede sustituir a la turba en la producción de tierra vegetal y evitar las emisiones que se producen durante su extracción y mineralización en condiciones aerobias.

Para los cultivos sin suelo cuyo objetivo comercial es la puesta en el mercado de plantas en contenedor, se requiere de sustratos físico y químicamente activos, que retengan agua y que posean capacidad de intercambio catiónico.

Este sistema es utilizado para la multiplicación por semillas y esquejes de plantas hortícolas, frutícolas o especies forestales, y para la producción de plantas en contenedor para su uso principal en jardinería y paisajismo.



1.4.4. Legislación medioambiental aplicada al uso del compost como enmienda orgánica y como sustrato de cultivo

Con la aprobación de la Ley 22/2011 de Residuos, se introduce la definición de **compost** como enmienda orgánica obtenida a partir del tratamiento biológico aerobio y termófilo de residuos biodegradables recogidos separadamente, y la definición de **material bioestabilizado** como el material orgánico obtenido de las plantas de tratamiento mecánico-biológico de residuos mezclados.

El nuevo Real Decreto 999/2017, de 24 de noviembre, sobre productos fertilizantes, por el que se modifica el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, clasifica dentro del “Grupo 6. Enmiendas Orgánicas” el compost producido a partir de residuos biodegradables, como “producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica

(incluyendo fase termofílica), bajo condiciones controladas, de materiales orgánicos biodegradables del Anexo IV, recogidos separadamente”.

Recalcar el hecho de que en el Real Decreto 506/2013 sobre productos fertilizantes, ya no se incluía en la lista de residuos admisibles para la producción de productos fertilizantes la fracción orgánica procedente de residuos municipales no recogidos separadamente. Es por ello que el material bioestabilizado que se produce en las plantas de tratamiento mecánico-biológico para su aplicación a suelos debe cumplir lo establecido por el ‘Decálogo, del 25 de junio de 2013, para la utilización del material bioestabilizado y compost no inscrito en el registro de productos fertilizantes mediante operación R10 (aplicación a los suelos que produzca un beneficio a la agricultura o una mejora de los mismos)’. Dicho decálogo desarrolla los requisitos de autorización de aplicación del material bioestabilizado mediante operación R10, incluyendo las características exigibles al material bioestabilizado y la frecuencia de análisis. Y diferencia los tipos de aplicación a realizar que quedan englobados en la operación R10, éstos serían: aplicación a suelos agrícolas, revegetación de taludes, cobertura de vertederos clausurados, restauración de canteras y minas, o jardinería pública.

Según el Real Decreto 999/2017, para el compost se permite su aplicación en agricultura, jardinería o restauración de suelos degradados, siempre que el compost no supere los márgenes de tolerancia establecidos en el Anexo III y los límites establecidos en el Anexo V (Tabla 1.4).

Tabla 1.4. Requisitos mínimos exigidos para considerar a un producto compost según el Real Decreto 999/2017.

Parámetro			
Mat. Orgánica total (%)	35		
Humedad máxima (%)	40		
C/N	< 20		
N inorgánico máximo (% N total)	15		
Metales pesados	Clase A	Clase B	Clase C
<i>(mg/kg m.s.):</i>			
Cadmio	0,7	2	3
Cromo (total)	70	250	300
Cromo (VI)	nd	nd	nd
Cobre	70	300	400
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1000
Contaminantes orgánicos			
Polifenoles (% p/p)	0,8		
Furfural(% p/p)	0,05		
Microorganismos			
<i>Salmonella spp</i>	Ausentes en 25 g de compost		
<i>E. coli</i>	<1000 MPN/g		
Semillas de malas hierbas	-		
Partículas (%)	90 (25mm)		
Impurezas (%)	No puede contener		
Gravas y piedras (%)	No puede contener		
nd: no detectable según método oficial; MPN: número más probable; Clase A: Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna A. Clase B: Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna B. Clase C: Productos fertilizantes cuyo contenido en metales pesados no superan ninguno de ellos los valores de la columna C.			

Los compost se clasificarán atendiendo a su contenido en metales como A, B o C, añadiéndose: “contenido en metales pesados inferior a los límites autorizados para esta clasificación”. Además, deberá declararse el contenido en cobre (Cu) y zinc (Zn) cuando sobrepasen los límites máximos correspondientes a la clase A (70 y 200 mg/kg de materia seca, respectivamente).

Respecto a la valorización del compost como sustrato de cultivo, en el Real Decreto 865/2010 de 2 de julio, modificado por el Real Decreto 1039/2012, de 6 de julio, sobre sustratos de cultivo, se definen y tipifican todos aquellos productos denominados como sustratos, con el fin de garantizar que los que se ponen en el mercado sean agrónomicamente eficaces y que eviten posibles efectos nocivos en el agua, el suelo, la flora, la fauna y el ser humano.

2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

En el municipio de Villena es creciente el interés suscitado por las explotaciones agrícolas y el Ayuntamiento de Villena en obtener compost para aplicación en agricultura convencional y ecológica, a partir de los residuos orgánicos generados por la propia actividad de las explotaciones. Desde diferentes estudios asociados se han detectado tres flujos principales de residuos potencialmente transformables a compost orientado a Agricultura Ecológica, que son destrío de puerro (producción anual hasta 5.000 t), poda urbana del municipio de Villena y alperujo de la almazara de la bodega Las Virtudes.

El objetivo principal del presente trabajo es la realización de un estudio comparativo del proceso de co-compostaje a gran escala en dos sistemas distintos de manejo, un sistema cerrado en túnel con aireación forzada y un sistema abierto de pila con volteos periódicos, de una mezcla de residuos de destrío de puerro (32,1%), estiércol de vaca (15%), poda urbana (36,7%) y alperujo (16,2%). Ambos manejos han sido realizados en las instalaciones de la planta de tratamiento mecánico-biológico de residuo urbano y vertedero de la empresa VAERSA (Valenciana de Aprovechamiento Energético de Residuos, S. A.) en Villena.

Como objetivos específicos nos planteamos:

1. Estudiar el comportamiento térmico de la mezcla planteada en dos tipologías de tratamiento.
2. Analizar la evolución de la materia orgánica presente, y la pérdida de masa durante el proceso.
3. Evaluar los parámetros clave asociados al proceso de compostaje: Densidad, Humedad, pH y Conductividad Eléctrica.

Destacar además, que el presente estudio se desarrolla dentro del marco del proyecto Agorcompost que desarrolla la Universidad Miguel Hernández, es por ello que, en consonancia con la filosofía de dicho proyecto de promover la economía circular agroalimentaria para la reutilización, aprovechamiento y transformación de residuos para producir compost de calidad, todos los residuos empleados en el presente estudio han sido generados en el término municipal de Villena.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Diseño experimental

Para alcanzar el objetivo planteado en el presente estudio se diseñaron dos pilas de compostaje, una por cada tipo de manejo, en las instalaciones de la planta de tratamiento mecánico-biológico de Residuo Urbano (RU) y vertedero de VAERSA, ubicada al Noroeste de la población de Villena (Figura 3.1).

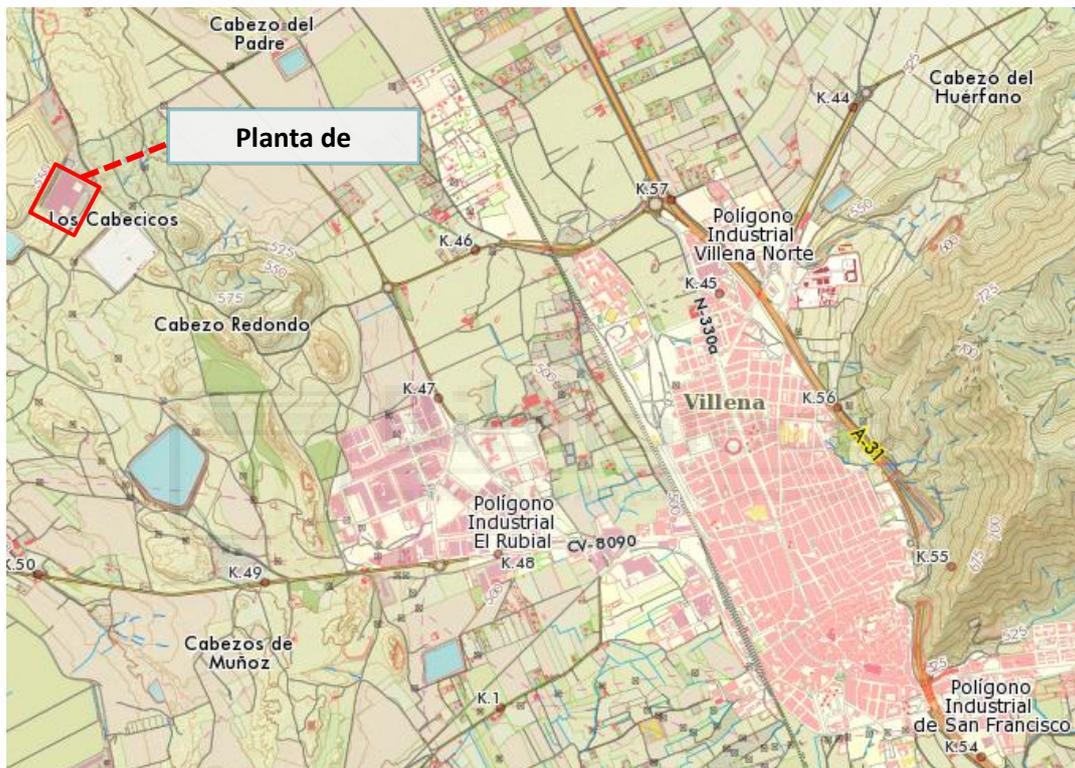


Figura 3.1. Ubicación de la Planta de VAERSA al NO del municipio de Villena.

- a. Pila exterior-control: es la pila conformada para el manejo mediante sistema abierto con volteos periódicos, ubicada durante todo el estudio en el exterior (Figura 3.2).
- b. Pila túnel: es la conformada en el interior de uno de los túneles de la planta de compostaje de la planta, concretamente en el túnel nº 16 (Figura 3.2).



Figura 3.2. Ubicación de los túneles de compostaje, de la zona exterior de acopio y de la zona de estancia de la pila exterior control.

Con el fin de que el producto final tenga aplicación en agricultura ecológica, se composta residuo del destrío de puerro, estiércol de vaca, alperujo y restos triturados de poda.

El diseño experimental planteado para la realización del presente estudio, establece la metodología de trabajo que a continuación se describe.

Fase 1: Caracterización inicial de los residuos a compostar.

Previo a la mezcla de los residuos orgánicos acopiados, éstos se muestrean con el fin de realizar una caracterización inicial.

Fase 2: Establecimiento de la mezcla a compostar.

El proceso de compostaje necesita que la mezcla a compostar posea una serie de características adecuadas a nivel físico, físico-químico y químico que van a condicionar el

proceso. Es decir, la correcta elección de los ingredientes y su proporción es muy importante para que este proceso tenga lugar.

Es por ello que, a la hora de elaborar las pilas de compostaje, se plantea como objetivos básicos la obtención de una adecuada humedad, porosidad y Relación C/N en la mezcla inicial.

Fase 3: Desarrollo de un sistema de compostaje.

Una vez realizada la mezcla con las condiciones óptimas iniciales en función de nuestros objetivos, se desarrolla los dos sistemas de compostaje se procede a para las dos pilas, control y túnel.

- a. Pila exterior-control: En sistema abierto dinámico donde se establece el control de oxígeno mediante volteos periódicos, la temperatura se controla cada dos-tres días mediante sonda de medición rápida en 6 puntos aleatorios de la pila siempre a 1 metro de altura y la humedad mediante apertura mecánica de la pila y riego. Y a partir del día 67, mediante la medición en continuo con dos sondas de temperatura y data logger Hobo (HOBO® U12-008).
- b. Pila túnel: En sistema cerrado de aireación forzada donde no existe contacto directo entre la pila y el ambiente exterior. El oxígeno es controlado por la ventilación forzada de una turbina y las válvulas de los conductos para el aire fresco y el aire recirculado. La temperatura es controlada por 3 lanzas con 3 sondas de temperatura conectadas al sistema SCADA de la planta y 4 sondas de temperaturas conectadas a un data logger (HOBO® U12-008). La medida de oxígeno que monitoriza el SCADA, es indirectamente utilizada como medición de la humedad y normalmente los túneles tienen una instalación para regar la pila dentro del propio túnel, para este ensayo no se utilizó ya que la instalación de riego se encontraba fuera de servicio y tampoco se realizó seguimiento del nivel de oxígeno.

Fase 4: Análisis de las características fisicoquímicas y químicas de los materiales a compostar a lo largo del proceso así como del producto final obtenido.

En las muestras de los materiales iniciales se determinaron los siguientes parámetros:

- Humedad
- Densidad
- pH
- Conductividad eléctrica
- Materia orgánica
- Carbono orgánico
- Nitrógeno total
- Relación C/N
- Contenido de macronutrientes y Na

También se pretende estudiar la evolución de la mezcla a lo largo de todo el proceso de compostaje, desde el inicio hasta la obtención del compost maduro, mediante el análisis de diferentes parámetros indicativos del proceso de compostaje:

- Relativos al propio proceso de compostaje: temperatura y humedad.
- Relacionados con la evolución de la materia orgánica: materia orgánica, carbono orgánico, pérdida de la materia orgánica y relación entre el carbono orgánico total y el nitrógeno total.
- Asociados a la evolución de nutrientes N, P, K y Na en el compost, los cuales serán determinantes a la hora de determinar la aplicación final del producto.
- Parámetros asociados a la evolución de la fracción hidrosoluble: pH, conductividad eléctrica y polifenoles solubles.
- Parámetros indicativos de la calidad del compost: capacidad de intercambio catiónico e índice de germinación.

No obstante, en el presente estudio sólo se muestran los resultados y discusión de los parámetros de seguimiento del proceso de compostaje (hasta los 124 días de proceso) y no los relativos al producto final, debido a que el ensayo experimental en el momento de elaborar este trabajo no ha concluido. El experimento completo se va a presentar en el congreso de la Red Española de Compostaje que tendrá lugar en noviembre de 2018.

3.2. Dispositivo experimental

3.2.1. Características de los residuos utilizados

Los residuos orgánicos utilizados en el proceso de co-compostaje ensayado han sido los mismos y en las mismas proporciones para la pila control y pila túnel.

Los residuos y sus procedencias son:

- **Alperujo**, materia prima producida en la almazara de la Bodega Las Virtudes en Villena, es un subproducto obtenido de la extracción del aceite al separarlo de la pasta de aceituna mediante un proceso de extracción en 2 fases, obteniendo por un lado el aceite (producto final del proceso) y por otro el alperujo (considerado residuo). Destaca su elevado contenido en K, Na y alta humedad. Posee una relación C/N alta por su elevado contenido en materia orgánica y bajo en N (Figura 3.3-a).

Es un residuo que procede del proceso de transformación alimentaria de la aceituna, por lo que se consideraría apto para su aplicación en agricultura ecológica (AE).

- **Poda urbana** proveniente de la poda y el mantenimiento de parques, jardines y demás zonas verdes del municipio, se presentan trituradas con un tamaño de 5 a 30 cm de longitud y de naturaleza heterogénea, debido a la variedad de flora en los jardines, este residuo se caracteriza principalmente por una baja densidad y humedad y una relación C/N media debido a la presencia tanto de plantas leñosas como herbáceas (Figura 3.3-c). El Ayuntamiento de Villena no realiza tratamientos fitosanitarios intensivos en las zonas verdes del municipio, por lo que en un principio este residuo no resulta conflictivo para su aplicación en AE.
- **Destrío de puerro** (*Allium ampeloprasum*) que se produce durante todo el año en la Cooperativa Agrícola de Villena. Los residuos procedentes del destrío del puerro llegan a alcanzar las 5000t/año. Al ser un producto alimentario se puede aplicar en AE aunque no provenga de cultivo ecológico, ya que se presupone que los compuestos potencialmente tóxicos tiene una menor persistencia. Se caracteriza por presentar un pH adecuado para desarrollar procesos de compostaje, además de un

alto contenido en materia orgánica. La elevada humedad y el exceso de conductividad por la presencia de altas concentraciones de sodio y potasio se corrigen con el aporte de otras materias primas en la mezcla (Figura 3.3-b).

- **Estiércol de vaca** procedente de la granja Micó en el mismo municipio de Villena. Este residuo bovino de naturaleza alcalina presenta un alto contenido de materia orgánica además de conductividad elevada debida a los niveles de concentración de iones tales como el sodio y el potasio (Figura 3.3-d). La explotación ganadera es lechera y de tipo semiextensiva, en su manejo no se utilizan productos potencialmente tóxicos en exceso, por ello es un ingrediente óptimo para su uso en compost con aplicación en AE.

Los portes de los materiales fueron pesados en la báscula de camiones de la planta de VAERSA y posteriormente descargados en la localización exterior destinada a acopiar los distintos residuos orgánicos a utilizar en el presente experimento. En la Tabla 3.1 se muestran las cantidades que se recibieron de material, siendo la suma total 155.760 Kg.

Tabla 3.1. Datos de los residuos orgánicos acopiados.

Residuo	Procedencia	Fecha	Nº viajes	Cantidad (Kg)
Poda triturada	M.I. Ayuntamiento de Villena	Del 30 de enero al 15 de febrero	17	57.100
Destrío puerro	Cooperativa Agrícola de Villena	8 y 9 de febrero	4	50.080
Alperujo	Bodega Las Virtudes (Villena)	15 de febrero	1	25.260
Estiércol vacuno	Granja Micó (Villena)	19 de febrero	2	23.320
				155.760

El residuo procedente del destrío de puerro fue triturado *in situ* mediante máquina de pala con trituradora de brazo.

Tras finalizar la recepción de los residuos y previo a la mezcla de los mismos, se realizó el muestreo inicial para caracterizar cada uno de los ingredientes (Tabla 3.2, Figura 3.3).

Tabla 3.2. Parámetros analíticos iniciales de cada residuo empleado en el proceso de compostaje.

Parámetro	Poda urbana	Estiércol vaca	Destrío puerro	Alperujo
Humedad (%)	20	68	89	45
Materia seca (%)	80	32	11	75
Densidad (Kg/l)	0,30	0,35	0,48	1,01
pH	6,9	8,1	6,5	5,7
CE (dS/m)	4,2	7,9	12	4,4
MO (%)	62,5	79,5	50	92,5
Cenizas (%)	37,5	20,5	50	7,5
Corg total (%)	35,47	1,85	1,75	1,21
Ntotal (%)	1,45	40,96	22,63	54,04
Ctotal/Ntotal	24,4	22,2	12,9	44,7
P (g/Kg)	1,62	2,6	3,30	1,14
K (g/Kg)	11,4	30,6	26,5	21,3
Na (g/Kg)	2,34	5,14	8,67	2,10
Polifenoles (mg/l)	9061	4596	4439	2590

CE: conductividad eléctrica; MO: Materia orgánica; Corg: Carbono orgánico; Ntotal: Nitrógeno total.



a)



b)



c)



d)

Figura 3.3. Ingredientes utilizados: a) alperujo, b) destrío de puerro, c) poda urbana y d) estiércol vacuno.

3.2.3. Sistemas de compostaje utilizados

En el presente estudio se ha utilizado dos tipos de manejo diferentes: sistema abierto de pila con volteo periódico (pila control) y sistema cerrado en túnel de compostaje con aireación forzada (pila túnel) (Figura 3.4). Ambos sistemas han sido realizados en las instalaciones de la Planta de RU de VAERSA.



Figura 3.4. Sistemas de compostaje utilizados: a) abierto de pila exterior con volteo, pila control; y b) cerrado de túnel de compostaje con aireación forzada, pila túnel.

a. Sistema abierto de pila con volteo. Pila control.

Se estableció realizar una pila control mediante un sistema abierto dinámico de compostaje. Para los volteos se ha utilizado maquinaria inespecífica como es la pala de carga frontal de cadenas. La pila se ubicó en una campa exterior sin cubierta y directamente sobre la tierra.

b. Sistema cerrado con aireación forzada en túnel de compostaje. Pila túnel.

Se establece mediante este sistema el proceso de compostaje para la llamada pila túnel. Se utilizan los túneles de la planta de tratamiento mecánico-biológico de R.U. de VAERSA, cuyo funcionamiento es el siguiente.

Etapas de tratamiento de la fracción orgánica en la planta de RU de VAERSA

Mediante el siguiente diagrama se representan las diferentes etapas de tratamiento mecánico-biológico de Residuo Urbano que tienen lugar en las instalaciones de la planta de VAERSA (Figura 3.5).

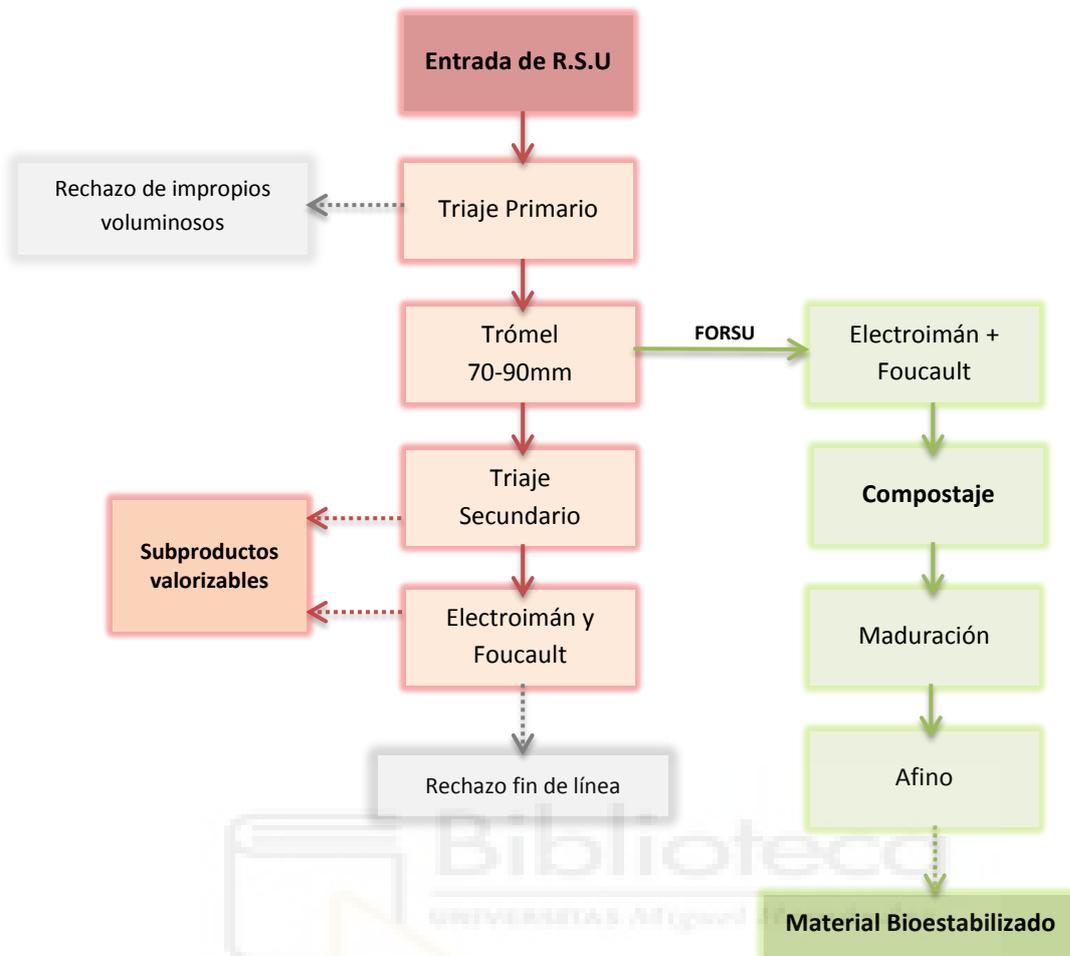


Figura 3.5. Etapas de tratamiento mecánico-biológico de R.U. en la Planta de VAERSA en Villena. (Elaboración propia)

Operativa de carga y descarga de los túneles de compostaje

La carga de los túneles se realiza mediante cintas transportadoras que vierten el residuo por una trampilla ubicada en el techo de los túneles donde además por la parte frontal superior del túnel, previa apertura de la compuerta hidráulica, un puente grúa introduce un conjunto de cintas móviles que van repartiendo el residuo por todo el túnel de forma automática, dicho conjunto es la máquina de carga (Figura 3.6).

La planta está diseñada para tratar únicamente fracción orgánica (FORSU) y la carga total por túnel es de 130-160 tn. El residuo FORSU tratado tiene una densidad aparente de 0'51 Kg/l y es de fracción <80 mm. Las dimensiones de cada túnel son: 25 m de largo, 4 metros de

ancho y 6'50 de altura total; Aunque la altura que puede ocupar la pila es de 3'80 metros, ya que el resto del espacio lo ocuparía la máquina de carga.



Figura 3.6. Secuencia de la operativa de carga de la pila túnel: a) alimentación, b) transporte en cintas y c) y d) caída al interior del túnel.

El vaciado del túnel se realiza por la puerta frontal inferior. El suelo de los túneles es un fondo móvil y la descarga se realiza por la acción de una máquina descargadora que se acopla al frontal de las lamas del fondo móvil del túnel, accionando el movimiento de éstas. De esta forma se va acercando el material al interior de la propia máquina, lo descompacta por acción de la hélice de palas y lo vierte a una cinta transportadora (Figura 3.7).

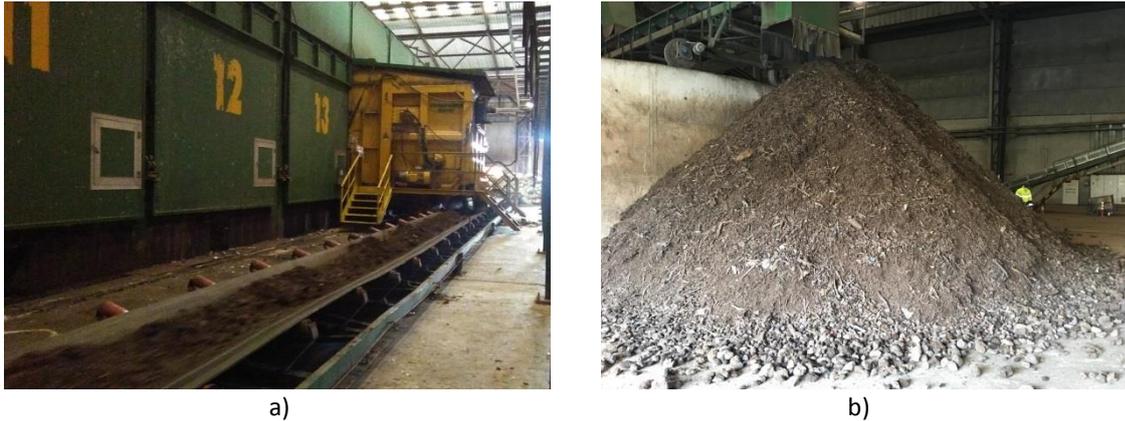


Figura 3.7. Secuencia de la operativa de descarga de la pila túnel: a) máquina descargadora y cinta transportadora; y b) tolva de salida.

Sistema de ventilación

El suelo del túnel es un piso móvil compuesto por lamas de metal separadas entre ellas unos 5 cm, en esta separación existen unos orificios por toda la extensión de la planta del túnel por donde entra el aire de ventilación. La salida forzada la realiza por una única trampilla situada en el techo del túnel.

Control automático del proceso

El control automático del proceso se realiza mediante un SCADA. Las 6 fases del proceso se parametrizan introduciendo valores de temperatura a alcanzar y días de duración para cada una de las fases del proceso (Figura 3.8). Cada túnel posee 3 lanzas con sonda de temperatura pt100 que se introducen a lo largo del túnel por 3 orificios situados en el techo y se mantienen dentro durante todo el proceso. Otro parámetro de control que realiza el programa durante el proceso es la medición de oxígeno, midiendo el nivel de oxígeno del espacio libre de material del interior de cada túnel. Ambos parámetros de control, temperatura y oxígeno, regulan la apertura o cierre de las válvulas de aire frío (entrada de aire de la nave) y aire recirculado del propio túnel, así como la velocidad (Hz) de la turbina. El rango de velocidad de la turbina también varía en función de la fase en la que se encuentre el proceso, y también este rango se puede modificar, pero siempre se debe de tener en cuenta la tipología del residuo a estabilizar y la altura de llenado (Figura 3.9).

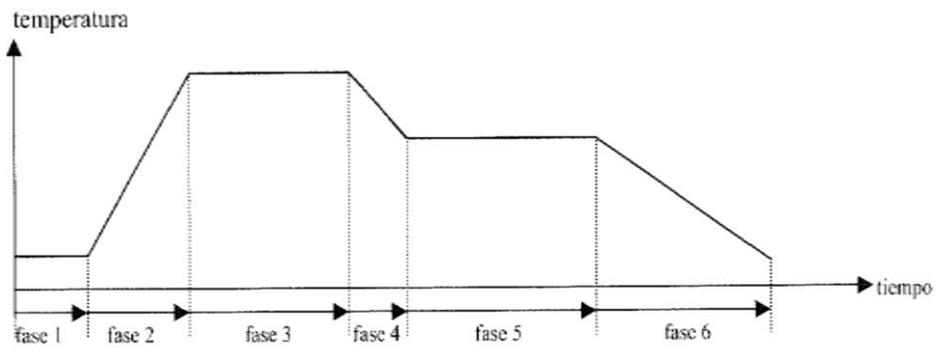


Figura 3.8. Fases del proceso de compostaje programadas en el SCADA de la Planta de VAERSA.

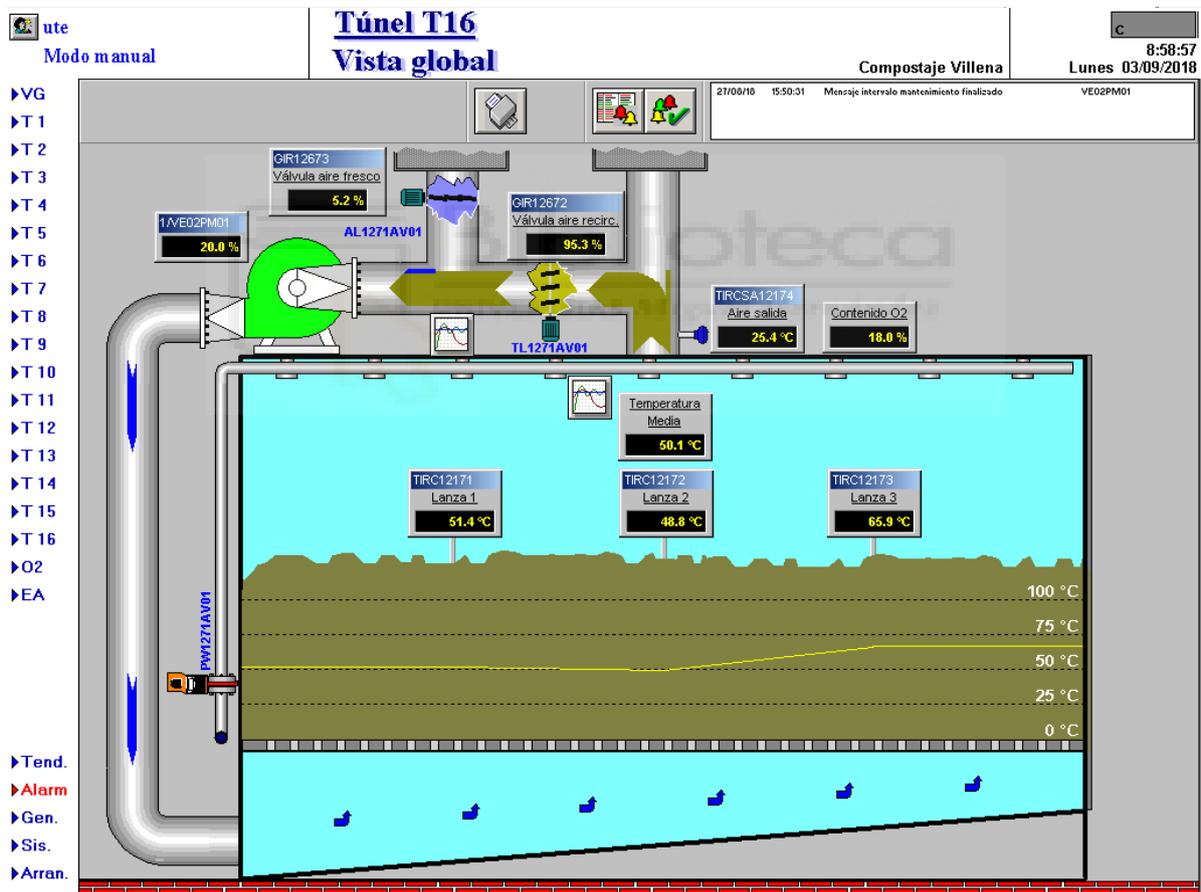


Figura 3.9. Programa SCADA de control del proceso de compostaje, vista túnel con parámetros de seguimiento (temperatura y oxígeno).

3.3. Desarrollo experimental

A continuación se describen los pasos seguidos para la realización del proceso de compostaje, su seguimiento a lo largo del tiempo de ensayo y el proceso previo de preparación de la mezcla de los residuos a compostar.

3.3.1. Cálculo y preparación

Con el objetivo de obtener una mezcla de los ingredientes cuya relación C/N estuviese dentro del rango óptimo 20-35, en los cálculos previos basados en datos de caracterizaciones de experiencias anteriores con los mismos ingredientes se determinó que realizando una mezcla total de todas las cantidades acopiadas se alcanzaría una relación C/N= 24,19 (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Porcentaje de peso fresco (PF), peso seco (PS) y volumen de cada material utilizado en la mezcla a compostar.

	Destrío puerro	Estiércol vacuno	Poda urbana	Alperujo
Mezcla PF	32,1	15,0	36,7	16,2
Volumen (m³)	104,33	66,63	190,33	25,01

Se procede en la misma zona utilizada para el acopio de materiales, a la mezcla de los mismos mediante una pala cargadora de cadenas de 2,5 m³ de capacidad de carga.

Teniendo en cuenta la disposición de los acopios y la diferencia de densidad de los residuos, se opta por no manipular directamente el alperujo y comenzar a verter sobre dicho residuo la poda seguida del destrío del puerro y del estiércol, mediante sistema de sandwich. Tras juntar los residuos la pala mecánica homogeniza el montón, para posteriormente conformar las pilas, tanto en el túnel como en la zona exterior (Figura 3.10).



Figura 3.10. Mezcla de materiales mediante sistema de sándwic (a) hasta formar un gran pila (b).

a. Pila exterior-control

Primero se conforma la **pila control** con una extensión de 6 metros de longitud y una altura de 1,80 metros, quedando ubicada en el la misma zona utilizada durante el acopio de ingredientes.

b. Pila túnel

Con el material restante tras haber conformado la pila control, se procede a conformar la **pila túnel** en el interior del túnel 16 de la planta. Para ello, se carga el material en un camión bañera con la pala cargadora de cadenas para su traslado al interior de la nave donde es descargado y acopiado. A continuación, la pala de carga frontal de 4,5 m³, procede a alimentar la tolva de la línea de orgánico de la planta. Y mediante el conjunto de cintas transportadoras de la línea de orgánico y máquina cargadora se vierte el material al interior del túnel.

La operación fue realizada en 3 jornadas consecutivas, los días 20, 21 y 22 de febrero (Tabla 3.4), de 3 horas aproximadamente cada una, y en horario definido por el equipo técnico de VAERSA debido a que la planta sólo dispone de una única línea de orgánico y por tanto sólo podía realizarse esta operación fuera del horario de producción de la planta. Mediante la báscula existente en el tambor de una de las cintas transportadoras se realiza el pesaje de material que pasa por dicha línea. El total del material introducido en el interior del túnel 16, que conforma la pila túnel, es de 127,98 t, y ocupa una extensión de 25 metros de longitud,

una altura media de 1,9 metros y 4 metros de ancho. Se establece el inicio del proceso de compostaje el día 22 de febrero.

Tabla 3.4. Cantidad del material introducido en el túnel de compostaje de la planta de VAERSA.

Día	Cantidad (t)
20/02/2018	41,79
21/02/2018	49,07
22/02/2018	37,12
Total	127,98

Mencionar que en el día 29 del proceso se realiza la operativa de recirculación de la pila túnel con el objetivo de voltear y regar el material. La pila es sacada del túnel 16, mediante sistema de máquina descargadora, y el material es conducido por el conjunto de cintas transportadoras máquina de carga al interior del túnel 14. La cantidad de material pesado a la salida del túnel 16 es de 108,10 t. La extensión de la pila recirculada en el interior del túnel 14 es de 25 metros de longitud, 1,7 metros de altura media y 4 metros de ancho.

La pila túnel es sacada de túnel de compostaje en el día 67 del proceso, y llevada al exterior, al mismo espacio donde se ubica la pila control, para continuar el proceso de compostaje mediante el sistema abierto de pila. La cantidad de material pesado en la báscula de cinta a la salida del túnel 14 es de 86,85 t. La pila túnel que ya se conforma en el exterior ocupa una extensión de 20 metros de longitud, 2 metros de altura y 5 metros de ancho.

3.3.2. Seguimiento del proceso de compostaje

En el momento en que quedan conformadas ambas pilas, control y túnel, se toma como inicio de la fase de seguimiento del proceso de compostaje, por lo tanto el día 22 de febrero es el día 0 del proceso. El seguimiento se realiza fundamentalmente sobre la evolución de la temperatura de ambas pilas.

La fase biooxidativa del proceso se da por finalizada cuando la diferencia entre la temperatura de las pilas y la temperatura ambiente es inferior a 10°C y no se reactiva la temperatura tras los volteos. En ese momento daría comienzo la fase de maduración.

a. Pila control

En este caso, el seguimiento de la temperatura fue realizado mediante mediciones manuales cada 2-3 días con sonda de medición rápida de 30 cm de longitud, realizando 6 mediciones por día alrededor del montón a una altura de 1 metro. A partir del día 67 del proceso pasó a realizarse la medición en continuo mediante la instalación de dos sondas y data logger HOBO U12-008. Cuando la temperatura media resultante de la pila era igual o inferior a 40°C se programaba el volteo de la pila que siempre coincidió con la necesidad de aplicar un riego. La necesidad de riego, seguimiento de humedad, se realizaba de forma visual.

b. Pila túnel

El seguimiento de la temperatura en la pila túnel fue realizada mediante la colocación de sondas de temperatura de medición continua con data logger HOBO U12-008. La situación de las mismas respecto a las 3 ubicaciones diferenciadas de la pila túnel fue la siguiente:

- Túnel 16 (0-29 días de proceso): se ubican 4 sondas en las 3 lanzas de acero de medición del propio túnel. Las 3 lanzas se ubican en parte central y extremos de la longitud total del túnel (25 metros). 3 de las sondas son ubicadas en la parte inferior o punta de las lanzas y otra sonda es ubicada 1 metro por encima de la punta de la lanza central de forma que no quede en inmersión con el objetivo de obtener datos temperatura del aire en el espacio libre del interior del túnel (Tabla 3.5a).

Tabla 3.5a. Sondas de temperatura túnel nº16 (etapa inicial).

Ubicación de lanza	Nº sonda	Altura sonda ¹ (m)	Altura pila ¹ (m)	Profundidad sonda (m)
Extremo pared/fondo	1	1,2	1,7	0,5
Centro	2	1,2	2	0,8
Centro	3	2,2	2	No inmersión
Extremo puerta	4	1,2	2,1	0,9

¹Altura respecto de suelo del túnel.

- Túnel 14 (29-67 días de proceso): El criterio de colocación de las sondas de temperatura es el mismo que se ha realizado para el túnel 16 (Tabla 3.5b).

Tabla 3.5b. *Sondas de temperatura túnel nº14 (etapa recirculada).*

Ubicación de lanza	Nº sonda	Altura sonda ¹ (m)	Altura pila ¹ (m)	Profundidad sonda (m)
Extremo pared/fondo	1	1,2	1,6	0,4
Centro	2	1,2	2	0,8
Centro	3	2,2	2	No inmersión
Extremo puerta	4	1,2	1,6	0,4

¹Altura respecto de suelo del túnel.

- Exterior en sistema abierto (67-124): Se colocan las sondas 1 y 2 en la parte intermedia de la pila conformada.

3.3.3. Muestreo del material, volteos y otras operaciones realizadas

En función de la evolución del parámetro de temperatura, y en un segundo plano del aspecto visual de la humedad del material, se programaron las operaciones de volteo y riego para ambas pilas.

La maquinaria y los materiales empleados en la realización de estas labores para cada pila han sido diferentes. La pila control ha sido en todo momento volteada por la pala cargadora de cadenas de 2,5 m³ y regada con tractor-cuba de 15m³, este mismo procedimiento también fue aplicado a la pila túnel en el momento de cambiarla del sistema cerrado de túnel al sistema abierto en pila (día 67 del proceso) (Figura 3.11).

Para el volteo realizado en la pila túnel del día 29 del proceso se realizó la operativa de recirculación de túnel de la planta de VAERSA. La ejecución del volteo se le atribuye a la máquina descargadora de los túneles por acción del mecanismo de palas que tiene en su interior que descompacta el material saliente, y la acción de la máquina cargadora que distribuye de manera automática y uniforme el material en un túnel vacío (en este caso el túnel 14). Se aprovecha esta operativa para aplicar el riego necesario, pulverizando agua sobre el material que pasa por la cinta transportadora de salida del túnel (Figura 3.12).



Figura 3.11. Riego de la pila exterior.



Figura 3.12. Riego de la pila túnel.

En la siguiente tabla se realiza un resumen de las tareas de toma de muestras, volteo y riego de las pilas de compostaje.

Tabla 3.6. Muestreos, volteos y riegos realizados en las pilas de compostaje.

Día	Pila Control			Pila Túnel		
	Muestreo	Volteo	Riego	Muestreo	Volteo	Riego
0	1			1		
21	2	X	2.000 L	2		
29					X	1.500 L
54	3	X	2.500L			
67	4	X	1.500L	4	X	4500L
97	5			5		
124	6			6		

3.4 Métodos analíticos

Preparación de la muestra

Las muestras recogidas se secan en una estufa a 105 °C. Posteriormente se muelen en molino y se tamizan a través de una malla de 0,5 mm de luz.

Humedad

La humedad la determinamos por diferencia de peso entre la materia húmeda y la seca una vez secado el material a 105°C quedándonos un porcentaje de humedad.

Materia orgánica total

En los residuos vegetales y compost, se toma como materia orgánica la pérdida de peso por calcinación a 430 °C. Se determina según el método de Navarro *et al.* (1993). La pérdida de peso se expresa como porcentaje respecto a peso de muestra seca.

Medida del pH

El pH se mide sobre la suspensión acuosa obtenida por agitación mecánica durante 2 horas de la proporción 1:10, sólido/líquido. La medida se realiza con un pH-metro por duplicado.

Conductividad eléctrica

Se determina sobre la suspensión acuosa anterior, previamente centrifugada y filtrada, con un conductímetro y también se realiza sobre las dos submuestras para evitar posibles errores.

Carbono orgánico total y nitrógeno total

Se realiza quemando la muestra a 1020°C en un analizador elemental (Navarro *et al.*, 1991).

Polifenoles

Se determinan los polifenoles solubles mediante extracción acuosa en relación 1:20 mediante la modificación del método Folin (Beltrán *et al.*, 1999).

Mineralización de la muestra

Se prepara la mezcla con una digestión nítrico-perclórica y tras el paso por el bloque digestor se enrasa y almacena.

Fósforo total

Se determina por medida espectrofotométrica de la intensidad de coloración amarilla producida por el complejo fosfovanadato molibdato amónico (Kitson y Mellon, 1994), obtenido sobre una fracción del extracto de mineralización.

Sodio y potasio

Estos elementos se midieron en disoluciones adecuadas del extracto de mineralización, mediante fotómetro de llama.

Índice de germinación (IG)

Se utiliza el método de Zucconi *et al.* (1981), el cual se determina a partir de los porcentajes de semillas germinadas y la medida de la longitud de las raíces de semillas de *Lepidium sativum* L., incubadas (a 27°C durante 24 horas en la oscuridad) sobre un extracto acuoso de compost.

Capacidad de intercambio catiónico

El método de determinación de la CCC está basado en la saturación del complejo de cambio con bario y la posterior determinación gravimétrica del catión retenido por diferencia con un blanco o control (Lax *et al.*, 1986).

3.5. Métodos estadísticos

A nivel estadístico, en el presente trabajo fin de grado se han realizado diferentes estudios estadísticos para poder obtener conclusiones de los datos disponibles.

Como variables principales del experimento están el **tiempo (t)**, esto es, cómo evoluciona la masa en el proceso de compostaje a lo largo de los 125 días. Incluyendo los 6 muestreos realizados (a los 0, 21, 54, 67, 97, 124 días del proceso) y el **tipo de tecnología de tratamiento utilizada en el compostaje (TC)** (aireación forzada en túnel con solo dos volteos frente a pila exterior volteada periódicamente, 3 volteos).

Para cada uno de los procesos de tratamiento se ha realizado un análisis estadístico ANOVA de una sola vía donde se estudiaron las diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes muestreos realizados (**tiempo, t**), con el fin de analizar la evolución del parámetro en cuestión. Se utilizó un contraste post-hoc Tukey-b para establecer dichas diferencias.

También se ha realizado un análisis estadístico GLM multivariante (Modelo General Lineal), utilizando tiempo y tipo de tratamiento como variables principales t y TC, obteniendo la significación de cada una de esas variantes clasificatorias respecto al parámetro considerado. Se utilizó un contraste post-hoc Tukey-b para establecer dichas diferencias respecto a t, TC y t x TC.

Se ha utilizado el paquete IBM SPSS Statistics v24 para este desarrollo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Desarrollo de los procesos de co-compostaje: Perfil térmico

La temperatura se considera una variable fundamental de seguimiento del proceso de compostaje, debido a que el síntoma más claro de actividad microbiana es el aumento de la temperatura de la pila que está compostando.

Durante el proceso de compostaje los microorganismos utilizan los sustratos orgánicos como fuente de carbono y energía en presencia oxígeno. Parte de la energía generada en el proceso se disipa en forma de calor. Para que este calor producido tenga cierto impacto en el proceso es imprescindible desarrollar el proceso con un mínimo de material apilado, con el fin de que parte del calor no se disipe y genere un efecto de retroalimentación. Al incrementarse la temperatura hasta ciertos límites se aceleran las actividades metabólicas microbianas propiciando la generación de más calor. La temperatura continúa aumentando hasta que los niveles térmicos alcanzados comprometen la supervivencia de la mayoría de los microorganismos (por encima de 60°C), a partir de entonces la disminución de la población microbiana no permite mantener el nivel térmico alto provocando el comienzo de la fase de enfriamiento. Las variaciones térmicas durante el proceso de compostaje permiten la sucesión de poblaciones microbianas, contribuyen a la eliminación de microorganismos patógenos y a modificar las propiedades fisicoquímicas del material compostado. De acuerdo con estas variaciones térmicas y las reacciones metabólicas que conllevan se diferencian las fases del proceso de compostaje.

Las fases termófilas/mesófilas suelen repetirse con las operaciones de volteo realizadas. Esto es debido a la reactivación de los microorganismos que disponen de nuevos principios inmediatos para su metabolismo al homogeneizar la masa mediante el volteo, procedentes de la capa superficial y que prácticamente no habrían sido degradados a causa de la escasa humedad de los materiales en la zona periférica de la pila (Stentiford *et al.*, 1985). Estas secuencias de variación de temperatura generan cada vez un menor incremento de temperatura debido a la presencia cada vez menor de materia orgánica de fácil descomposición, que es en la que se basa el aumento de microorganismos no especializados.

En el apartado 4.1.3. se compara la evolución de la temperatura y el incremento térmico de dos tipos de proceso de compostaje consistentes en: sistema cerrado en túnel de compostaje con aireación forzada (Pila túnel), y sistema abierto de pila con volteo (Pila control). Para ambos tipos de proceso se han controlado diariamente las temperaturas en diferentes puntos de las pilas y se han obtenido valores medios, mínimos y máximos, junto con la temperatura media ambiental obtenida en la estación meteorológica del IVIA en el municipio de Villena, como se puede ver en los siguientes apartados 4.1.1. y 4.1.2.

4.1.1. Co-compostaje en túnel con aireación forzada

A continuación, se muestra la evolución de la temperatura de la pila túnel durante el proceso de compostaje, la temperatura ambiental, así como los días en los que se realizaron los muestreos y volteos a la pila (Figura 4.1).

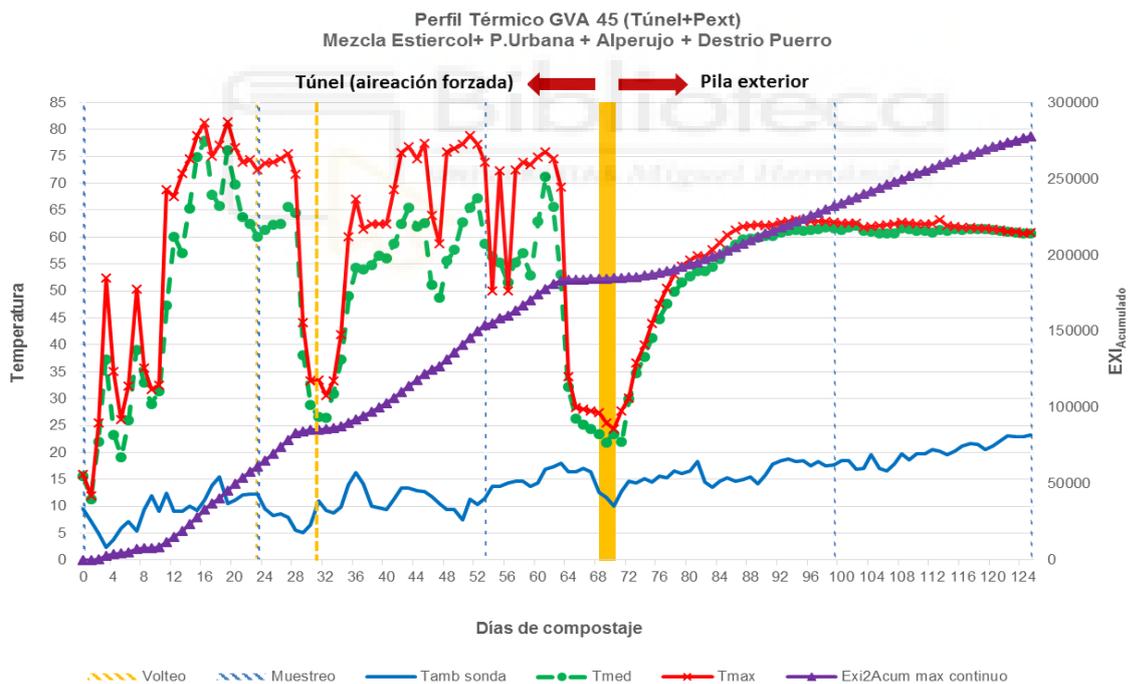


Figura 4.1. Perfil térmico del proceso de compostaje de la pila túnel, con mezcla de estiércol vacuno, paja urbana, alperujo y destrío de puerro.

El proceso de compostaje de la pila túnel consistió en una primera etapa realizada en sistema cerrado de túnel con aireación forzada (0-67 días de proceso), y una segunda etapa

en sistema abierto de pila con volteo (67-124 días). Esta secuencia de manejo de la pila túnel es explicada con mayor detalle en el apartado 3.3. del presente estudio.

Durante la primera etapa de manejo de la pila túnel en el sistema cerrado de túnel con aireación forzada, la temperatura oscila en varias ocasiones frente al perfil térmico constante que presenta la etapa en sistema abierto de pila (Figura 4.1). El motivo de las fuertes oscilaciones de la temperatura durante la estancia en túnel es la operatividad y reajuste del programa SCADA que opera la planta de compostaje. Estos cambios de temperatura registrados responden a la operatividad automática del sistema de válvulas de aire fresco/recirculado y turbina aceleradora del túnel, que se activan como respuesta a una elevada temperatura media de la pila. La reacción de la masa ante el leve aumento de flujo de ventilación o entrada de aire fresco es inmediata, disipando el calor y disminuyendo la temperatura de la pila. Una reacción mucho más lenta ocurre en el caso de las pilas de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), residuo habitual de esta planta de compostaje y para el que está diseñado el programa autómatas (SCADA) de la propia planta.

Tabla 4.1. Resumen de parámetros térmicos del proceso de compostaje de la pila túnel durante las etapas de desarrollo en túnel y en pila exterior.

Parámetro	GVA 45 Etapa túnel	GVA 45 Etapa exterior	Total
Días fase biooxidativa	67,0	57,0	124,0
Nº Días F.Bio-oxid/ >40°C	51,0	56,0	107,0
Nº Días F.Bio-oxid/ >50°C	49,0	53,0	102,0
Nº Días F.Bio-oxid/ >60°C	44,0	45,0	89,0
Temperatura máxima pila	81,4	75,9	78,6
Temperatura promedio pila	49,7	53,9	51,8
Temperatura mínima pila	11,3	21,9	16,6
Nº Días >40°C/ Días fase biooxidativa	0,75	1,00	0,88
Índice EXI ² (°C ²)	184.604	93.384	277.988
Ratio EXI ² /días f. bio-oxid. (Tmax)	2715	1668	2191

EIX²: sumatorio cuadrático de la diferencia diaria entre la temperatura promedio de la pila y la temperatura ambiente.

La temperatura máxima que alcanza la pila (81,4°C) ocurre durante su etapa de estancia en el interior del túnel. Se observa que la temperatura ha sido más constante durante la etapa exterior de la pila. La fase biooxidativa, en el momento de presentar este estudio, aún no está finalizada, pues la diferencia de temperatura de la pila respecto a la temperatura ambiental,

a día 124, es superior a 10°C. En el periodo contemplado es este estudio, el proceso de compostaje ha completado un total de 107 días en fase termófila ($T > 40^{\circ}\text{C}$), dividida a su vez en tres periodos debido a que se repite tras los dos volteos realizados (días 29 y 67 del proceso). En los tres periodos la fase termófila es alcanzada en menos de 4 días (Figura 4.1, Tabla 4.1).

Las toneladas de entrada de material al túnel fueron 127,98 t, con una humedad del 50,2% (M1). En el cambio de túnel (volteo) el peso de la pila fue de 108,10 t, y en la salida al exterior el peso de la pila fue de 86,85 t presentando una humedad del 24,2% (M4) (Tabla 4.4).

4.1.2. Co-compostaje en pila exterior volteada periódicamente

A continuación, se muestra la evolución de la temperatura de la pila control durante el proceso de compostaje, la temperatura ambiental, así como los días en los que se realizaron los muestreos y volteos a la pila (Figura 4.2).

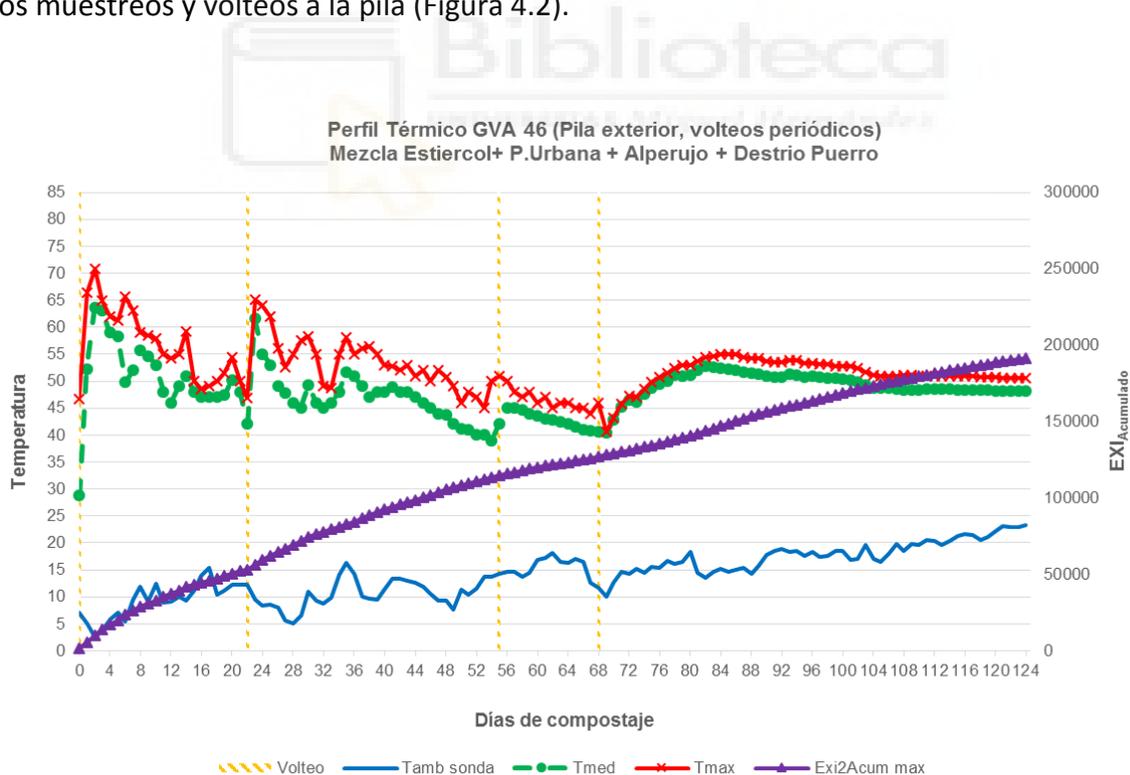


Figura 4.2. Perfil térmico del proceso de compostaje de la pila exterior (control), con mezcla de estiércol vacuno, paja urbana, alperujo y destrío de puerro.

Tabla 4.2. Resumen de parámetros térmicos del proceso de compostaje de la pila exterior (control) durante las etapas de desarrollo en túnel y en pila exterior.

Parámetro	GVA 46 Pila Exterior
Días fase bioxidativa	124
Nº Días F.Bio-oxid/ >40°C	124
Nº Días F.Bio-oxid/ >50°C	95
Nº Días F.Bio-oxid/ >60°C	10
Temperatura máxima pila	70,9
Temperatura promedio pila	48,2
Temperatura mínima pila	28,8
Nº Días >40°C/ Días fase bioxidativa	1,00
Índice EXI ² (°C ²)	191.592
Ratio EXI ² /días f. bio-oxid. (Tmax)	1533

EXI²: sumatorio cuadrático de la diferencia diaria entre la temperatura promedio de la pila y la temperatura ambiente

La temperatura máxima de la pila durante el proceso es de 70,9°C y se alcanza durante el primer periodo de la fase termófila. La fase termófila (T>40°C) tiene una duración de 124 días, dándose en cuatro periodos que corresponden a la formación inicial de la pila y a las reactivaciones que se producen tras los tres volteos (días 21, 54 y 67) (Figura 4.2, Tabla 4.2). Es por ello, que la fase bioxidativa del proceso de compostaje en la pila exterior (control) aún no está finalizada, pues se observa que la diferencia de temperatura de la pila respecto a la temperatura ambiental, a día 124, es superior a 10°C.

4.1.3. Análisis comparativo de los perfiles térmicos en los dos escenarios de proceso

Para la realización de un análisis comparativo se confeccionan las siguientes figuras con datos de las pilas túnel y exterior/control (Figura 4.3, Figura 4.4)

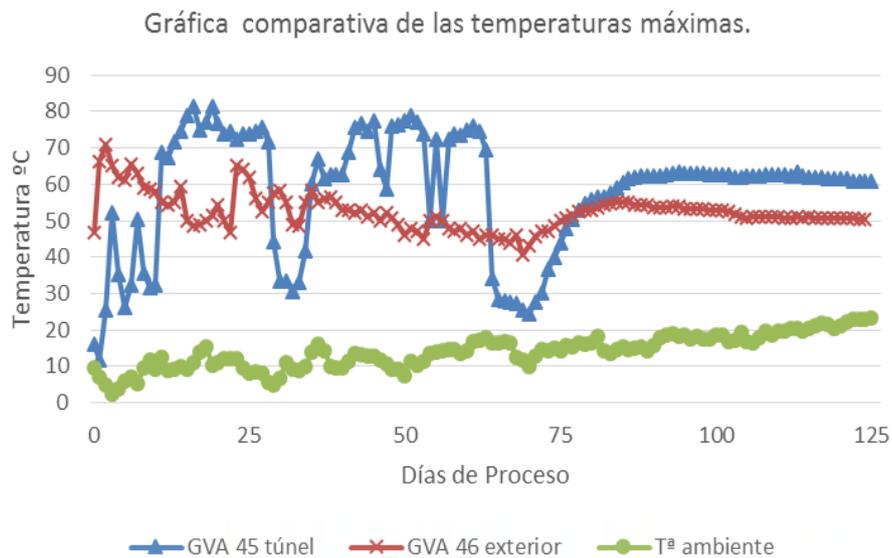


Figura 4.3. Perfil térmico de la pila túnel y pila exterior (control).

El resultado comparativo de los perfiles térmicos de los dos tipos de compostaje muestra que ambas pilas se encuentran en fase biooxidativa con una temperatura media superior a 40°C (fase termófila), superando en más de 10°C la temperatura ambiente, y que la pila túnel es el sistema que mayor valor de temperatura máxima y promedio registra (Figura 4.3.). Por otra parte, la evolución térmica de la pila exterior (control) es menos activa térmicamente pero más homogénea y prolongada en el tiempo que la pila túnel, presentado una fase biooxidativa de 124 días con una temperatura mayor a 40°C (Tabla 4.2). La pila túnel registra un periodo de 107 días con una temperatura mayor a 40°C, del total de 124 días de duración de la fase biooxidativa (Tabla 4.1).

Tanto la pila túnel como la pila exterior (control) cumplen con los criterios de higienización según los requisitos europeos en materia de saneamiento de compost. Según el “Study report on End-of-waste criteria for Biodegradable waste subjected to biological treatment. Draft Final Report, July 2013” el productor del compost debe demostrar que cada proceso de

compostaje ha alcanzado un perfil temperatura-tiempo adecuado. Existen 3 perfiles admitidos en compostajes que no incluyan residuos o subproductos ganaderos:

- 65°C o más al menos 5 días
- 60°C o más al menos 7 días
- 55°C o más al menos 15 días

Los composts que incluyen residuos y subproductos animales deben cumplir requisitos adicionales de cara a la prevención de otros riesgos, en general al menos 70°C al menos una hora.

Tabla 4.3. Criterios de temperatura y tiempo de las pilas en materia de saneamiento del compost.

Parámetro	GVA 45 Pila túnel	GVA 46 Pila exterior
Nº Días F.Bio-oxid/ >55°C	45,0	28,0
Nº Días F.Bio-oxid/ >60°C	44,0	10,0
Nº Días F.Bio-oxid/ >65°C	38,0	5,0

En ambas pilas se cumplen todos los requisitos de homogeneización descritos anteriormente (Tabla 4.3). Cabe destacar que en la pila túnel se da una diferencia de tiempo en la consecución de los criterios térmicos de higienización bastante superior al obtenido en la pila exterior (control), por lo que el sistema de compostaje cerrado de túnel ofrece una mayor garantía de higienización frente al sistema abierto de pila.

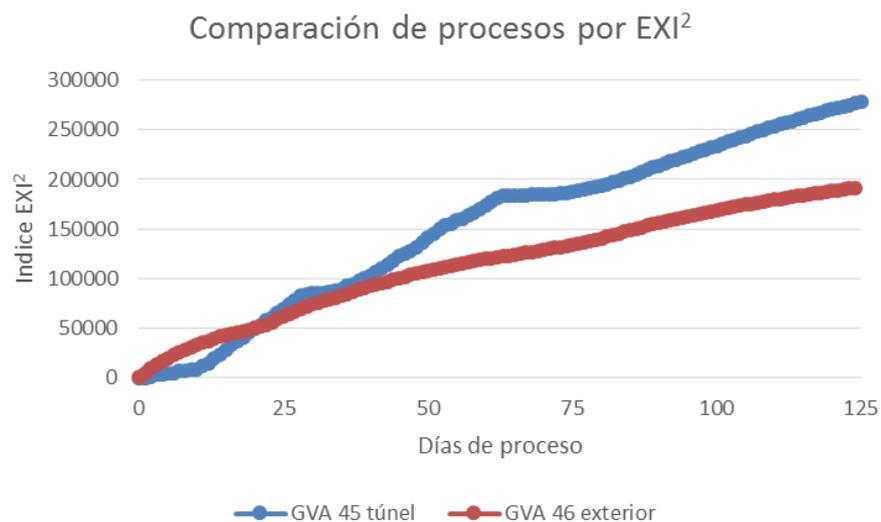


Figura 4.4. Representación del índice exotérmico EXI^2 de la pila túnel y pila exterior (control). (EXI^2 : sumatorio cuadrático de la diferencia diaria entre la temperatura promedio de la pila y la temperatura ambiente).

Los autores Vico *et al.* (2018) definen el índice exotérmico como el sumatorio cuadrático de la diferencia diaria entre la temperatura promedio de la pila y la temperatura ambiente.

El EXI^2 obtenido durante el proceso de compostaje es mayor en la pila túnel que en la pila exterior (control) (Figura 4.4), es decir la pila túnel ha tenido un mejor comportamiento EXI^2 llegando a acumular más calor debido al aislamiento, respecto de las condiciones del ambiente exterior, que ofrece el sistema cerrado del túnel de compostaje.

Como ya se indicó en el apartado 4.1.1., las fluctuaciones térmicas registradas se debieron a pequeños aumentos puntuales de la velocidad de aireación y de apertura de la válvula de aire fresco, lo que vendría a confirmar el hecho de que el aislamiento/control de las condiciones ambientales del exterior que proporciona el sistema de túnel a la pila, favorece un mayor EXI^2 .

Cabe comentar que el control de las condiciones ambientales que ofrece el sistema de túnel, tendría como contrapartida el elevado coste energético y de mantenimiento que conlleva una instalación de este tipo, con sistema ventilación por acción de turbinas de impulsión.

4.2. Seguimiento de parámetros claves durante el proceso

Otros parámetros de seguimiento relevantes para el correcto desarrollo del proceso de compostaje y para determinar el momento de las operaciones de volteo y riego son: la humedad, el pH y la conductividad eléctrica.

Tabla 4.4. Resultados de los parámetros de seguimiento del proceso: Densidad, humedad, pH y conductividad eléctrica (EC); en muestras de la pila túnel y de la pila exterior o control.

Muestra	días	Densidad kg/L	Humedad (%)	pH	EC (ds/m)
Túnel M1	0	0,29 a	50,2 b	7,50 ab	4,85 b
Túnel M2	21	0,54 c	53,9 b	7,51 ab	3,99 a
Túnel M3	54	0,45 b	50,0 b	7,49 ab	4,00 a
Túnel M4	67	0,44 b	24,2 a	7,40 a	4,26 a
Túnel M5	97	0,56 c	24,5 a	7,64 b	5,42 c
Túnel M6	124	0,60 d	24,5 a	7,61 ab	4,83 b
F anova		204 ***	189 ***	3,7 *	41 ***
Pila exterior M1	0	0,24 a	46,8 d	7,56 ab	3,77 a
Pila exterior M2	21	0,31 b	41,8 c	7,42 a	4,36 b
Pila exterior M3	54	0,55 c	42,6 c	7,54 ab	4,33 b
Pila exterior M4	67	0,65 e	29,8 a	7,80 c	3,72 a
Pila exterior M5	97	0,61 d	36,7 b	7,71 bc	4,88 c
Pila exterior M6	124	0,74 f	34,4 b	7,77 c	4,55 b
F anova		408 ***	97 ***	10,9 ***	36 ***
Análisis General Multivariante					
Tipo de Compostaje (TC)					
Túnel		0,48 a	38,1 a	7,57 a	4,58 b
Pila exterior		0,52 b	38,9 a	7,62 b	4,29 a
		57 ***	2,4 ns	16,6 ***	37 ***
Tiempo (t)					
0		0,26 a	48,8 c	7,57 ab	4,34 b
21		0,43 b	48,1 c	7,51 a	4,20 ab
54		0,50 c	46,6 c	7,56 ab	4,19 ab
67		0,54 d	27,1 a	7,65 bc	4,01 a
97		0,59 e	29,6 b	7,72 c	5,18 d
124		0,68 f	30,7 b	7,73 d	4,71 c
		495 ***	264 ***	8,1 ***	55 ***
TC x t		160 ***	62 ***	6,7 ***	23 ***

El contenido de **humedad** de ambas pilas durante los 124 días de fase biooxidativa, disminuye conforme avanza el tiempo de proceso de compostaje (Tabla 4.4). Además, conforme avanza el proceso es habitual que exista una pérdida de humedad debida a que se evapora gran cantidad de agua por la elevada temperatura que alcanzan las pilas. No obstante, si analizamos el valor promedio de humedad para todos los tiempos vemos que no hay diferencias significativas entre el tipo de proceso de túnel y de pila exterior (Figura 4.5). No obstante, se observó de forma empírica que el contenido de humedad en la pila exterior es mayor en el interior de la pila, mientras que en la pila túnel es mayor en las capas exteriores de la pila y no en su interior, como se pudo ver esto es debido a que en el espacio libre del interior de túnel se genera una elevada condensación de agua que lleva a precipitar sobre la superficie de la propia pila.

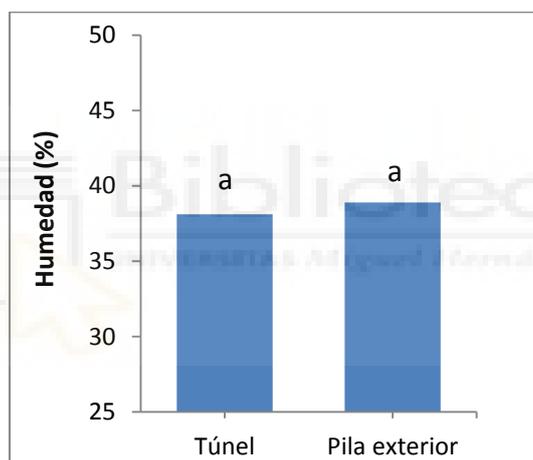


Figura 4.5. Valor promedio de la humedad para el proceso completo por cada tipo de compostaje (túnel y exterior). (Significación: ns)

El seguimiento del parámetro de humedad durante el proceso de compostaje es importante, ya que la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de la fauna microbiana gracias a que es el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células. Por ello, un bajo contenido de humedad (<30%) en las fases de mayor actividad microbiana puede provocar la paralización del proceso, lo que sería un indicativo de la necesidad de aplicar riego a la pila. Por el contrario, un contenido excesivo de humedad (>70%) provoca la saturación de la matriz porosa de la masa reduciendo el intercambio de oxígeno (proceso aerobio) y gases produciendo anaerobiosis, lo cual genera malos olores y una disminución de la velocidad del proceso.

El **pH** tiene una influencia directa en el compostaje debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos. Mediante el seguimiento del pH se puede obtener una medida indirecta del control de la aireación de la mezcla, ya que si en algún momento se crean condiciones anaerobias se liberan ácidos orgánicos que provocan el descenso del pH.

Durante el proceso de compostaje se diferencian 3 fases en la evolución del pH. Durante la fase mesófila inicial se observa una disminución del pH debido a la acción de los microorganismos sobre la materia orgánica más lábil, produciendo una liberación de ácidos orgánicos. En una segunda fase se produce una progresiva alcalinización del medio, debido a la pérdida de los ácidos orgánicos y la generación de amoníaco procedente de la descomposición de las proteínas (Sanchez-Monedero, 2001). Y por último, en la tercera fase el pH tiende a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón.

En el presente estudio los valores de pH de las muestras de la pila túnel sufren una significativa conforme avanzan los días de proceso, y sólo observa un leve incremento del valor. Por el contrario, en la pila túnel si se observa un incremento muy significativo del valor de pH en las muestras conforme aumenta el tiempo de proceso (Tabla 4.4). En los datos comparativos promedios de ambos procesos respecto al tiempo transcurrido, se observa un aumento muy significativo del valor de pH (Tabla 4.4), lo que indica que nos encontramos en la fase termófila del proceso, fase en la cual el pH tiende a aumentar pudiendo llegar a valores próximos a 8,5. Si comparamos para cada tipo de compostaje los valores promedio por tiempo completo, se encuentran diferencias muy significativas entre ambos tipos de proceso (túnel y exterior) (Figura 4.6).

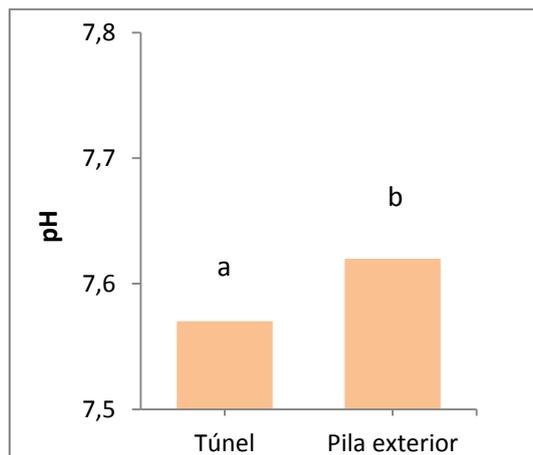


Figura 4.6. Valor promedio del pH para el proceso completo por cada tipo de compostaje (túnel y exterior). (Significación: ***).

La **conductividad eléctrica (EC)** está condicionada por la concentración de sales, y por la presencia de iones amonio o nitrato. La mayoría de las muestras de la pila túnel y pila control, muestran un aumento de la EC conforme avanza el proceso de compostaje (Tabla 4.4). Generalmente, la EC tiende a aumentar durante el proceso de compostaje debido a la degradación de la materia orgánica que produce un aumento en la concentración de sales. Se observa además una disminución puntual en las muestras M2 y M6 de la pila túnel, y M4 y M6 de la pila exterior, debido al efecto de lavado de sales y su acumulación en el lixiviado que provoca el riego o la lluvia.

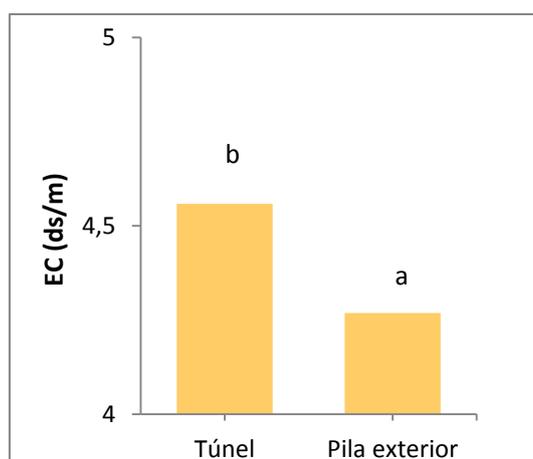


Figura 4.7. Valor promedio de la conductividad eléctrica para el proceso completo por cada tipo de compostaje (túnel y exterior). (Significación: ***).

En el análisis multivariante se observan diferencias muy significativas a la hora de comparar los valores promedios de tiempo para cada tipo de compostaje, siendo el proceso de pila túnel el que mayor EC presenta (Figura 4.7). También se observan diferencias muy significativas a lo largo del transcurso de los días de proceso si promediamos los valores de los dos tipos de proceso, siendo la EC mayor conforme avanza el proceso de compostaje (Tabla 4.4). En las muestras expuestas no se observan grandes variaciones entre la mezcla inicial (M1) y la tomada a los 124 días de proceso (M6). Sin embargo, Vico *et al.* (2018) observó que para el compost de lodos urbanos con restos de palmera como agente estructurante existe una variación positiva de la salinidad de hasta el 100%.

La conductividad eléctrica es uno de los parámetros del producto final que en mayor medida puede condicionar el tipo de aplicación final del compost debido a que un exceso de sales afecta a las propiedades agronómicas del suelo, dificultando la absorción de las plantas.



4.3. Evolución de la materia orgánica durante el proceso

La evolución de la materia orgánica es compleja y su velocidad de transformación depende de su naturaleza física y química, de los microorganismos que intervienen y de las condiciones fisicoquímicas del proceso (humedad, aireación, temperatura y pH) (Michel *et al.*, 2004).

Durante el proceso de compostaje la **materia orgánica** desciende debido a su mineralización y a la consiguiente pérdida de carbono en forma anhídrido carbónico; estas pérdidas pueden llegar a representar casi el 20% en peso de la masa compostada (Zucconi y De Bertoldi., 1987). Produciéndose un aumento de la **ceniza** o materia mineral/inorgánica como fruto de dicha mineralización de la materia fresca.

Las **pérdidas de materia orgánica** reflejan la evolución sufrida por la mezcla de residuos estudiada. Éstas se calcularon a partir del contenido de cenizas inicial (X_1) y en el punto de estudio (X_n), de acuerdo con la ecuación de Viel *et al.* (1987):

$$\text{Pérdidas MO (\%)} = 100 - 100 [X_1 (100 - X_n) / X_n (100 - X_1)]$$

Esta ecuación representa el porcentaje de materia orgánica perdida con respecto a la cantidad inicial, para ello se considera que el contenido de cenizas a lo largo del proceso es constante y de este modo se evita el efecto concentración provocado por las pérdidas de peso de la pila debidas a la degradación de la materia orgánica.

Tabla 4.5. Evolución de la materia orgánica (MO) durante el proceso de compostaje de las pilas túnel y exterior (control).

Muestras	días	MO (%)	Cenizas (%)	% pérdida MO
Túnel M1	0	49,5 e	50,6 a	0,0 a
Túnel M2	21	40,2 d	59,8 b	31,2 b
Túnel M3	54	35,9 c	64,1 c	42,7 c
Túnel M4	67	28,8 b	71,2 d	58,7 d
Túnel M5	97	26,1 a	73,9 de	63,9 e
Túnel M6	124	26,8 ab	73,2 e	62,6 e
F-anova		320 ***	228 ***	861 ***
Pila exterior M1	0	48,5 d	51,5 a	0,0 a
Pila exterior M2	21	42,0 c	58,0 b	23,1 b
Pila exterior M3	54	35,6 b	64,5 c	41,4 c
Pila exterior M4	67	25,7 a	74,3 d	63,2 d
Pila exterior M5	97	25,5 a	74,5 d	63,6 d
Pila exterior M6	124	25,1 a	74,9 d	64,5 d
F-anova		458 ***	307 ***	704 ***

Análisis General Multivariante

Tipo de Compostaje (TC)				
Túnel		34,8 b	65,8 a	43,4 a
Pila exterior		33,9 a	66,7 b	42,9 a
		8,7 **	6,0 *	1,0 ns
Tiempo (t)				
0		49,26 e	51,3 a	0,0 a
21		41,36 d	59,2 b	27,4 b
54		36,0 c	64,6 c	42,3 c
67		27,4 b	73,1 d	61,3 d
97		26,0 a	74,6 d	64,1 e
124		26,1 a	74,5 d	63,9 e
		760 ***	525 ***	1526 ***
TC x t		5,3 **	3,7 *	10,4 ***

Se observa una importante disminución del contenido de materia orgánica en las muestras iniciales M1 respecto de las muestras M6, transcurridos 124, pasando de valores de 49,5% y 48,5% para pila túnel y pila exterior respectivamente, a valores de 26,8% (pila túnel) y 25,1% (pila exterior). Aunque estos valores iniciales y finales de ambas pilas son muy similares, observamos una mayor velocidad de pérdida de MO en la pila túnel frente a la pila exterior (Tabla 4.5, Figura 4.8). Esta evolución es similar a la observada por Vico *et al.* (2018). Y la pérdida de MO observada en ambas pilas, es mayor en los primeros días del proceso, M1, M2, M3 y M4 (Tabla 4.5).

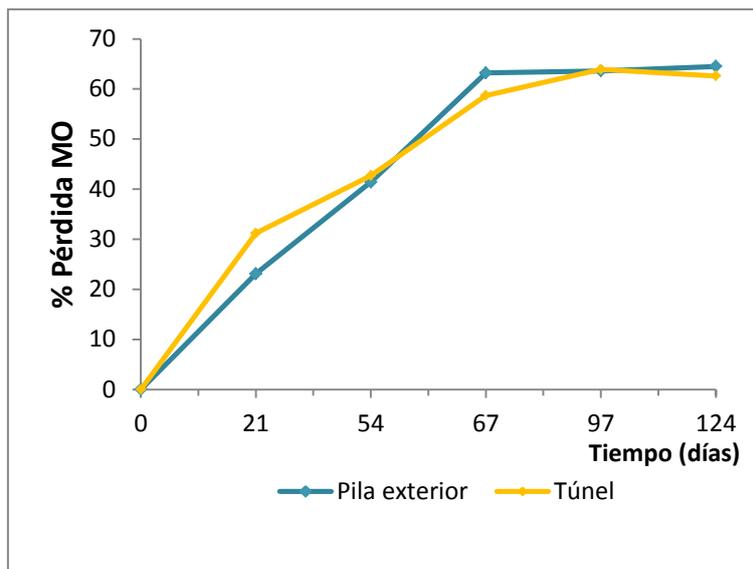


Figura 4.8. Evolución de la pérdida de materia orgánica (%) a lo largo del proceso (días) para cada tipo de compostaje (túnel y exterior).

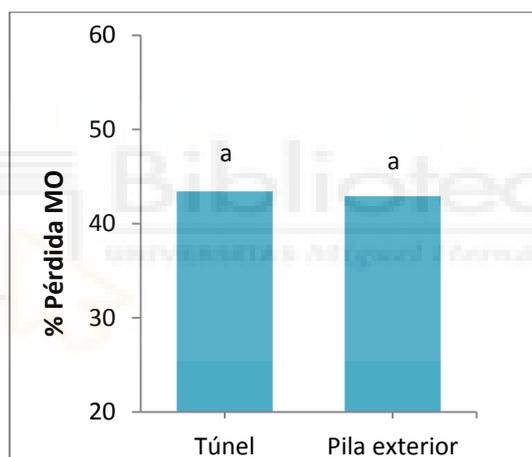


Figura 4.9. Valor promedio de la pérdida de materia orgánica (%) para el proceso completo por cada tipo de compostaje (túnel y exterior). (Significación: ns).

En el análisis multivariante, que compara ambos tipos de procesos de compostaje para el periodo de tiempo completo, encontramos diferencias bastante significativas en los valores de MO y significativas en los valores de cenizas, mientras que para el parámetro % de pérdida de MO no se encontraron diferencias significativas (Tabla 4.5, Figura 4.9). Si comparamos la evolución conjunta de ambos procesos a lo largo del tiempo, vemos una evolución normal de la MO con una disminución de la MO y ganancia de cenizas, aumentando la pérdida de MO (Tabla 4.5).

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas de nuestro estudio que tenía como objetivo comparar el proceso de co-compostaje a gran escala en dos sistemas distintos de manejo, un sistema cerrado en túnel con aireación forzada y un sistema abierto de pila con volteos periódicos, son las siguientes:

- El sistema de compostaje cerrado en túnel favorece un mayor índice exotérmico ($EXI_2=277,9$) frente a la pila exterior ($EXI_2=191,6$), es decir, una mayor ganancia acumulada de calor respecto de la temperatura ambiente. El sistema abierto de pila con volteo desarrolla un perfil térmico más homogéneo y constante en el tiempo.
- El sistema de compostaje cerrado de túnel con aireación forzada ofrece mayor garantía del cumplimiento de los criterios de higienización del compost que el sistema abierto de pila con volteo. Ya que se alcanzaron valores de temperatura máximos superiores en la pila túnel ($T_{máx}=78,6$) que en la pila exterior ($T_{máx}=70,9$).
- El tipo de sistema de compostaje utilizado ha influido estadísticamente en los parámetros de pH y conductividad eléctrica, pero no sobre la humedad.
- La evolución de la materia orgánica (MO) no presenta diferencias significativas entre ambos tipos de compostaje estudiados al punto final, aunque sí se observa una mayor pérdida de MO en los primeros 23 días en la pila túnel frente a la pila exterior.
- La definición de la mezcla en función de los residuos utilizados, así como las técnicas de compostaje realizadas, han seguido procedimientos válidos para que el producto final de compost sea potencialmente aplicable en el entorno de la Agricultura Ecológica.
- Los residuos orgánicos utilizados en el proceso de co-compostados cumplirían con el principio de economía circular en el ámbito municipal de Villena al generar un recurso a partir de flujos residuales locales.

6. BIBLIOGRAFÍA

Beltrán, F.J., García Araya, J.F., Álvarez, P.M. Wine distillery wastewater degradation. 1. Oxidative treatment using ozone and its effect on the wastewater biodegradability. *J. Agric. Food Chem.* 1999. vol. 47, p. 3911-3918.

Bueno, P., Díaz, M. J., Cabrera, F. Factores que afectan al proceso de compostaje. En: Moreno Casco, J., Moral Herrero, R., (Ed). *Compostaje Madrid: Editorial Mundi-Prensa*, 2008. p. 141-164.

Canet, R., Albiach, M. R. Aplicaciones del compost en Agricultura Ecológica. En: Moreno Casco, J., Moral Herrero, R., (Ed). *Compostaje Madrid: Editorial Mundi-Prensa*, 2008. p. 379-396.

Cegarra, J., Paredes, C. Residuos agroindustriales. En: Moreno Casco, J., Moral Herrero, R., (Ed). *Compostaje Madrid: Editorial Mundi-Prensa*, 2008. p. 519-552.

Chica, A., García, J. L. Aspectos técnicos en el desarrollo y control del proceso de compostaje. En: Moreno Casco, J., Moral Herrero, R., (Ed). *Compostaje Madrid: Editorial Mundi-Prensa*, 2008. p. 141-164.

Cárdenas, R.R. y Wang, L.K. Composting process. En: *Handbook of Environmental Engineering*. Vol. II. New York: The Human Press. 1980. p. 269-327.

Chanyasak, V. y Kubota, H. Carbon organic nitrogen ratio in water extract as measure of compost degradation. *J. Ferment. Technol.* 1981. vol. 59, p. 215-219.

Favoino, E. y Hogg, D. The potential role of compost in reducing greenhouse gases. *Waste Management Research*. 2008. vol. 26, p. 61-69.

Finstein, M. S. y Miller, F. C. Principles of composting leading to maximization of decomposition rate, odor control and cost effectiveness. En: Gaser, J. K. R. (Ed.), *Composting of Agricultural and other Wastes*. London & New York: Elsevier App. Sci. Publ. 1985. p. 13-26.

Gacía-Morales, J. L., Alvarez, C. J., Paredes, C., López, E., Fernández, F. J., Bustamante, M. A, Barrena, R., Seoane, S. Estudio de casos: problemática y soluciones. En: *De residuo a recurso*, I.3. Madrid: Editorial Mundi-Prensa, 2015. p. 237-324.

Golueke, C.G. Principles of biological resource recovery. *BioCycle*. 1981. vol. 22, p. 36-40.

Iglesias, E. y Pérez, V. Evaluation of city refuses compost maturity: a review. *Biol. Wastes*. 1989. vol. 27, 115-142.

Iglesias, E. y Pérez, V. Composting of domestic refuse and sewage sludge. II. Evolution of carbon and some "humification" indexes. Resources, Conservation and Recycling. 1992 a. vol. 6, p. 243-257.

Iglesias, E. y Pérez, V. Determination of maturity indices for city refuse composts. Agr. Ecosyst. Environ. 1992 b. vol. 38, p. 331-343.

Iglesias, E., Barral M. T., Maruenda, F. C. Indicadores de estabilidad y madurez del compost. En: Moreno Casco, J., Moral Herrero, R., (Ed). Compostaje Madrid: Editorial Mundi-Prensa, 2008. p. 243-285.

Juste, C. Avantages et inconvenients de l'utilisation des composts d'ordures ménagères comme amendement organique des sols on support. En Jornadas Internacionales sobre el Compost. Madrid. 1980.

Kitson, R.E., Mellon, M.G. Colorimetric determination of P as a molibdovanadato phosphoric acid. Ind Eng. Chem. Anal. 1944. vol. 16, p. 379-383.

Lax, A., Roig, A. y Costa, F. A method for determining the cation-exchange capacity of organic materials. Plant and Soil. 1986. vol. 94, p. 349-355.

Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Boletín Oficial del Estado (BOE). <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2011-13046>

Masaguer, A., Benito, M. Evaluación de la calidad del compost. En: Moreno Casco, J., Moral Herrero, R., (ed). Compostaje Madrid: Editorial Mundi-Prensa, 2008. p 286-304.

Martínez, F. X. Gestión y tratamiento de residuos agrícolas. InfoAgro.com. 2006. http://www.infoagro.com/hortalizas/residuos_agricolas.htm.

Michel, F.C., Pecchia, J.A. y Rigot, J. Mass and nutrient losses during the composting of dairy manure amended with sawdust or straw. Compost Sci. Util. 2004. vol. 12(4), p. 323-334.

Morel, J. L., Colin, F., Germon, J.C., Godin, P. y Juste, C. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost. En: Gasser, J.K.R. (Ed.), Composting of Agricultural and other Wastes. London & New York: Elsevier App. Sci. Publ, 1985. p. 56-72.

Navarro, A.F., Cegarra, J., Roig, A., Bernal, M.P. An automatic microanalysis method for the determination of organic carbón in wastes. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 1991. vol. 22, p. 2137-2144.

Navarro, A.F., Cegarra, J., Roig, A., García, D. Relationship between organic matter and carbón contents of organic wastes. Bioresource Technol. 1993. vol. 44, p. 203-207.

Navarro, J., Moral, R., Gómez, I. y Mataix, J. Residuos orgánicos y agricultura. Alicante: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Alicante. 1995. 155p.

Poincelot, R.P. A scientific examination of the principles and practice of composting. *Compost Sci.* 1974. vol. 15, p. 24-31.

Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. *Boletín Oficial del Estado (BOE)*. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1990-26490>

Real Decreto 1039/2012, de 6 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo. *Boletín Oficial del Estado (BOE)*. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2012-10153

Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes. *Boletín Oficial del Estado (BOE)*. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2013-7540

Real Decreto 999/2017, de 24 de noviembre, sobre productos fertilizantes. *Boletín Oficial del Estado (BOE)*. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2017-14332

Roig, A., Lax, A., Cegarra, J., Costa, F. y Hernández., M.T. Cationexchange capacity as a parameter for measuring the humification degree of manures. *Soil Sci.* 1988. vol. 146, p. 311-316.

Sánchez-Monedero, M. A., Roig A., Paredes, C y Bernal, M. P. Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Biores. Technol.* 2001. vol. 78(3):301-308.

Soliva, M. *Compostatge i gestió de residus orgànics. Estudis i Monografies, 21.* Servei de Medi Ambient de la Diputació de Barcelona, 2001. 111p.

Sugahara, K., Harada, Y. e Inoko, A. Color change of city refuse during composting process. *Soil Sci. Plant Nutr.* 1979. vol. 25, p 197-208.

Vico, A. Pérez, M.D., Bustamante, M.A., Agulló, E., Marhuenda-Egea, F.C., Sáez, J.A., Paredes, C., Pérez-Espinosa, A., Moral, R. Valorization of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) pruning biomass by co-composting with urban and agri-food sludge. *Journal of Environmental Management.* 2018. vol. 226, p. 408-415.

Viel, M., Sayag, D., Peyre, A., André, L. Optimization of in-vessel co-composting through heat recovery. *Biol. Wastes.* 1987. vol. 20, p. 167-185.

Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., de Bertoldi, M. Evaluating toxicity of immature compost. *BioCycle.* 1981. vol. 22, p. 54-57.

Zucconi, F, De Bertoldi, M. 1987. Specifications for solid waste compost. *Biocycle.* 1987. vol. 28(5/6), p. 56-61.