

GESTIÓN DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DE RECOGIDA SELECTIVA MEDIANTE COMPOSTAJE EN PLANTA DESCENTRALIZADA: SEGUIMIENTO DEL PROCESO Y CALIDAD DEL COMPOST FINAL



NATALIA MANRIQUE CÓRDOBA

2023

**Gestión de la fracción orgánica de residuos sólidos
urbanos de recogida selectiva mediante
compostaje en planta descentralizada:
seguimiento del proceso y calidad del compost
final**

Vº Bº DIRECTOR

Vº Bº CODIRECTOR

María Dolores Pérez Murcia

María Ángeles Bustamante Muñoz

ALUMNO

Firmado por
NATALIA
MANRIQUE
CORDOBA -

Natalia Manrique Córdoba



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Se autoriza a la alumna **D^a. Natalia Manrique Córdoba**, a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: “Gestión de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos de recogida selectiva mediante compostaje en planta descentralizada: seguimiento del proceso y calidad del compost final”, bajo la dirección de D^a. Maria Dolores Pérez Murcia y de D^a. M^a Angeles Bustamante Muñoz, debiendo cumplir las normas establecidas para la redacción del mismo que están a su disposición en la página Web específica del Master.

Orihuela, 19 de junio de 2023

La Directora del Máster Universitario de Investigación en Gestión, Tratamiento y Valoración de Residuos Orgánicos



Fdo.: Concepción Paredes Gil

TRIBUNAL	
FECHA:	
PRESIDENTE:	FIRMA:
VOCAL:	FIRMA:
VOCAL:	FIRMA:

REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MASTER

IDENTIFICACIONES

Autor: Natalia Manrique Córdoba

Título: Gestión de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos de recogida selectiva mediante compostaje en planta descentralizada: seguimiento del proceso y calidad del compost final.

Title: Management of the organic fraction of municipal solid waste from selective collection through composting in a decentralized plant: monitoring of the process and quality of the final compost.

Director/es del TFM: María Dolores Pérez Murcia y María Ángeles Bustamante Muñoz

Año: 2023

Titulación: Máster Universitario de Investigación en Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos

Tipo de proyecto: Trabajo Fin de Máster

Palabras claves: Compost, fracción orgánica, residuos sólidos urbanos, recogida selectiva, desarrollo del proceso, calidad compost.

Keywords: Compost, organic fraction, municipal solid waste, selective collection, process development, compost quality.

Nº citas bibliográficas: 44

Nº de tablas: 11

Nº de figuras: 17

Nº de anexos: 0

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo se centró en llevar a cabo un estudio exhaustivo sobre el tratamiento de residuos sólidos urbanos, centrándose en una de las innovadoras metodologías de compostaje: el compostaje en plantas descentralizadas. A través de este enfoque, se buscó comprender en detalle los diversos aspectos del proceso que influyen en su eficacia y rendimiento. Esto se logró realizando un análisis detallado de los factores que afectan el funcionamiento del compostaje en plantas descentralizadas. Esto incluyó considerar aspectos como la temperatura, la humedad, la relación carbono-nitrógeno y el tiempo de compostaje. Al comprender cómo estos factores se interrelacionan y afectan el proceso de descomposición de

los residuos, se podrá optimizar el funcionamiento de las plantas descentralizadas y mejorar la eficiencia del tratamiento.

Además, se prestó especial atención a las características de los materiales de partida utilizados en el compostaje, evaluando las características físico-químicas y químicas de dichos materiales, siendo estos aspectos fundamentales para comprender su impacto en el proceso de compostaje y cómo afectan la calidad del compost final.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis exhaustivo del producto obtenido, es decir, el compost final, evaluando parámetros como la estabilidad, el contenido de nutrientes, la presencia de agentes patógenos y la presencia de sustancias tóxicas. Esta evaluación nos permitió determinar la calidad del compost y su idoneidad para su uso en distintas aplicaciones, como la agricultura, la jardinería o la restauración de suelos degradados.

ABSTRACT

The main objective of this work was to carry out a comprehensive study on the treatment of urban waste, focusing on one of the innovative composting methodologies: composting in decentralized plants. Through this approach, we tried to understand in detail the various aspects of the process that influence its efficiency and performance. This was achieved by conducting a detailed analysis of the factors that affect the performance of composting in decentralized plants. This included considering aspects such as temperature, humidity, carbon-to-nitrogen ratio and composting time. By understanding how these factors interrelate and affect the waste decomposition process, it will be possible to optimize the operation of decentralized plants and improve treatment efficiency.

In addition, especial attention was paid to the characteristics of the starting materials used in composting, evaluating the physico-chemical and chemical characteristics of these materials, which are fundamental to understanding their impact on the composting process and how they affect the quality of the final compost.

Finally, an exhaustive analysis of the product obtained, i.e., the final compost, was carried out, evaluating parameters such as stability, nutrient content, presence of pathogens and presence of toxic substances. This evaluation allowed us to determine the quality of the compost and its suitability for use in the production process.

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer a mi familia por el acompañamiento, el apoyo y las oportunidades que nos han brindado en este largo camino, por estar presente en cada paso de alegrías y tristezas para poder formarnos como Master en Gestión, Tratamiento y Valorización de Residuos Orgánicos.

Agradezco las tutoras de este proyecto de fin de máster D^a María de los Ángeles Bustamante y D^a María Dolores Pérez por creer en mí y hacer posible la elaboración de este proyecto, por la dedicación de su tiempo, su conocimiento y su paciencia que engrandeció el crecimiento como estudiantes con el trabajo realizado. También quiero agradecer a la estudiante doctoral Cristina Álvarez Alonso, por guiarme en el laboratorio y al tiempo dedicado a explicarme.

Quiero agradecer a mis compañeros de laboratorio por haber sido parte de este transcurso de alineación y por todos los recuerdos dentro y fuera de la universidad.

Deseo agradecer a la Universidad Miguel Hernández por dejarme cursar y hacer uso de las instalaciones en el trayecto del master, también agradecer a cada uno de los docentes que hicieron parte de la formación por aportar todos sus conocimientos.

Por último, agradecemos a los evaluadores de este proyecto, quienes con sus críticas y correcciones hicieron de este un mejor proyecto.



INFORME DE EVALUACIÓN DE INVESTIGACIÓN RESPONSABLE DE 2. TFM (Trabajo Fin de Máster)

Elche, a 20/03/2023

Nombre del tutor/a	Maria de los Ángeles Bustamante Muñoz
Nombre del alumno/a	Natalia Manrique Cordoba
Tipo de actividad	1. Adherido a un proyecto autorizado
Título del 2. TFM (Trabajo Fin de Máster)	Gestión de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos de recogida selectiva mediante compostaje en planta descentralizada: seguimiento del proceso y calidad del compost final
Evaluación Riesgos Laborales	No procede
Evaluación Ética	No procede
Registro provisional	230316043339
Código de Investigación Responsable	TFM.MGT.MDLABM.NMC.230316
Caducidad	2 años

Se considera que la presente actividad no supone riesgos laborales adicionales a los ya evaluados en el proyecto de investigación al que se adhiere. No obstante, es responsabilidad del tutor/a informar y/o formar al estudiante de los posibles riesgos laborales de la presente actividad.

La necesidad de evaluación ética del trabajo titulado: **Gestión de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos de recogida selectiva mediante compostaje en planta descentralizada: seguimiento del proceso y calidad del compost final** ha sido realizada en base a la información aportada en el formulario online: "TFG/TFM: Solicitud Código de Investigación Responsable (COIR)", habiéndose determinado que no requiere ninguna evaluación adicional. Es importante destacar que si la información aportada en dicho formulario no es correcta este informe no tiene validez.

Por todo lo anterior, **se autoriza** la realización de la presente actividad.

Atentamente,

Alberto Pastor Campos
Secretario del CEII
Vicerrectorado de Investigación

Domingo L. Orozco Beltrán
Presidente del CEII
Vicerrectorado de Investigación

Información adicional:

- En caso de que la presente actividad se desarrolle total o parcialmente en otras instituciones es responsabilidad del investigador principal solicitar cuantas autorizaciones sean pertinentes, de manera que se garantice, al menos, que los responsables de las mismas están informados.
- Le recordamos que durante la realización de este trabajo debe cumplir con las exigencias en materia de prevención de riesgos laborales. En concreto: las recogidas en el plan de prevención de la UMH y en las planificaciones preventivas de las unidades en las que se integra la

Contenido

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	11
2. INTRODUCCIÓN	13
2.1. Los residuos sólidos urbanos y su gestión	13
2.2. El compostaje: aspectos teóricos y técnicos.....	17
2.2.1. Definición y fases del proceso	17
2.2.2. Parámetros de control al inicio del proceso	19
2.2.3. Parámetros básicos de control del proceso.....	21
2.3. Nuevos escenarios de compostaje: el compostaje descentralizado.....	23
2.4. Indicadores de calidad del compost y normativa asociada	25
2.4.1. Indicadores de calidad de compost	25
2.4.2. Normativa española asociada a los compost.....	28
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	32
3.1. Diseño experimental.....	32
3.1.1. Características de los residuos utilizados.....	35
3.1.2. Descripción de la planta objeto de estudio	39
3.2. Desarrollo experimental	42
3.3. Métodos analíticos	43
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1. Evolución de factores relativos al propio proceso de compostaje	46
4.2. Evolución de los parámetros físico-químicos.....	49
4.2.1. pH	49
4.2.2. Conductividad eléctrica	51
4.3. Evolución de la materia orgánica y de su fracción sólida	52
4.3.1. Materia orgánica total	52
4.3.2. Carbono orgánico total	54
4.3.3. Nitrógeno total	55
4.3.4. Relación C orgánico total /N total.....	56
4.4. Calidad del compost	57

4.4.1.	Calidad agronómica	57
4.4.2.	Parámetros de madurez y/o estabilidad.....	58
4.4.3.	Calidad a nivel medioambiental e higiénico-sanitario	59
5.	CONCLUSIONES.....	61
6.	BIBLIOGRAFÍA	62

Contenido de tablas:

Tabla 2. 1.	Modelos de separación de residuos de competencia municipal en España teniendo a las distintas fracciones principales separadas en origen. Fuente: MITECO (2021).	15
Tabla 2. 2.	Cantidad de residuos de competencia municipal recogidos en España 2020. Fuente MITECO (2021).....	16
Tabla 2.4.	Parámetros del compostaje. Fuente FAO (2013).....	23
Tabla 3.1.	Residuos utilizados en el proceso de compostaje realizado en la planta de compostaje descentralizado de Sort (Lérida). 36	
Tabla 3.2.	características microbiológicas de los residuos utilizados en el proceso de compostaje realizado en la planta de compostaje descentralizado de Sort (Lérida)	38
Tabla 3.3.	Temperaturas necesarias para la eliminación de algunos patógenos. Fuente: FAO (2013).	39
Tabla 4. 1	Principales características agronómicas de los compost finales obtenidos. 58	
Tabla 4.2.	Parámetros de madurez y estabilidad del compost en los dos ciclos de compostaje.	59
Tabla 4.3.	Contenido en elementos potencialmente tóxicos y calidad higiénico-sanitaria de los compost maduros.	60

Contenido de Figuras

Figura 2.1.	Ciclo del compostaje. Fuente: Universidad UNIMINUTO (2018).	17
Figura 2.2.	Etapas de Compostaje. Fuente: FAO (2013).	19
Figura 3.1.	Fracción orgánica de los residuos municipales.....	34
Figura 3.2.	Poda forestal y urbana.....	34
Figura 3.3.	Ubicación de la planta de Sort. Fuente: Google Earth.....	40
Figura 3.4.	Interior de la Planta de Sort.	40

Figura 3.5. Esquema de funcionamiento en la planta de SORT para la obtención de compost a partir de la fracción orgánica de los residuos urbanos. RCV: Rechazo; FO: Fracción Orgánica; FV: Fracción Vegetal.	41
Figura 3.6. Residuos en la planta de Sort.	43
Figura 4.1. Evolución de la temperatura durante el ciclo 1 del compostaje	46
Figura 4.2. Evolución de la temperatura durante el ciclo 2 del compostaje	47
Figura 4.3. Evolución de la densidad en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$). DMS ciclo 1 = 0,035; DMS ciclo 2: = 0,042 (DMS: diferencia mínima significativa).	49
Figura 4.4. Evolución del pH en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$). DMS ciclo 1 = 0,2; DMS ciclo 2: = 0,17 (DMS: diferencia mínima significativa)	50
Figura 4.5. Evolución de la conductividad eléctrica en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$). DMS ciclo 1 = 0,4; DMS ciclo 2: = 0,6 (DMS: diferencia mínima significativa)	51
Figura 4.6. Evolución de la materia orgánica total en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$). DMS ciclo 1 = 4,9; DMS ciclo 2: = 11,7 (DMS: diferencia mínima significativa).	53
Figura 4.7. Evolución del carbono orgánico total en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$). DMS ciclo 1 = 1,0; DMS ciclo 2: = 1,50 (DMS: diferencia mínima significativa).	54
Figura 4.8. Evolución del nitrógeno total en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$). DMS ciclo 1 = 0,14; DMS ciclo 2: = 0,2 (DMS: diferencia mínima significativa).	55
Figura 4.9. Evolución de la relación C/N en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$). DMS ciclo 1 = 0,2; DMS ciclo 2: = 1.4 (DMS: diferencia mínima significativa).	57

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

A nivel mundial se está experimentando una escasez de recursos naturales, principalmente debido a un ritmo de consumo de productos mayor que el de generación de dichos recursos, produciendo un desequilibrio en la naturaleza que puede comprometer el abastecimiento en el futuro. Con el fin de mantener un equilibrio de estos recursos, los líderes mundiales adoptaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), un conjunto de 17 objetivos para el 2030 que permitirán minimizar los impactos negativos que se ocasionan con por el cambio climático y el desequilibrio ambiental (ONU, 2022). Uno de los objetivos de los ODS es el 12 “Producción y Consumo Responsable” donde se habla de una economía circular, la cual implica reutilizar, reparar, renovar y reciclar los diferentes tipos de materiales, sustancias u objetos de tal forma que el ciclo de vida se extienda el mayor tiempo posible (ONU, 2022). Este tipo de economía se puede llevar a cabo en las diferentes industrias considerando los residuos producidos como la principal fuente en un nuevo proceso con el objetivo de generar un valor añadido mediante tratamientos.

En España, se generan aproximadamente 22,4 millones de toneladas de residuos urbanos (INE, 2020). Sin embargo, solo se recoge de manera selectiva un porcentaje muy bajo, tan solo el 1,6%. La recogida selectiva implica la separación de los residuos en diferentes materiales o fracciones, con el objetivo de obtener recursos y materiales útiles o someterlos a tratamientos o procesos para obtener nuevas materias primas y convertirlos en recursos materiales o energéticos.

La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos se origina principalmente en los hogares, en particular en las cocinas, como resultado de la manipulación y preparación de alimentos. Durante las comidas, también se generan residuos de excedentes o restos de alimentos no consumidos, así como alimentos en mal estado o caducados. Además, en actividades de jardinería, mantenimiento de patios, jardines, balcones o terrazas también se generan residuos orgánicos (MTERD, 2005).

En el ámbito comercial, uno de los principales generadores son los establecimientos de alimentos, como fruterías, verdulerías, carnicerías, supermercados, mercados fijos y ambulantes, entre otros. Estos residuos pueden surgir tanto por los estándares de calidad de los alimentos como por productos en mal estado o caducados, de manera similar a lo que ocurre en los hogares (MTERD, 2005).

En el sector de la restauración y la hostelería, la mayoría de los residuos orgánicos se generan durante la preparación de comidas y su consumo. Por último, pero no menos importante, los lugares públicos, como huertos urbanos, dependencias municipales y centros escolares, también generan residuos orgánicos, principalmente a través de actividades de jardinería,

desperdicio de alimentos o restos de comida, aunque en menor medida en comparación con los otros sectores (MTERD, 2005).

De esta manera es importante destacar que la adecuada gestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos es fundamental para promover prácticas sostenibles, como el compostaje o la producción de biogás, y reducir la cantidad de residuos destinados a los vertederos. Una de las formas de gestionar estos flujos residuales orgánicos es mediante el uso del compostaje. Este proceso biológico no sólo permite la gestión de estos residuos, sino también su valorización, ya que le concede un valor al convertirlo en un fertilizante orgánico con un potencial uso agrícola. En este sentido, en los últimos años están emergiendo nuevos modelos de compostaje basados en un compostaje de proximidad, más descentralizado, que no sólo permite una gestión más sostenible de estos residuos, al evitar su transporte hacia otras zonas de gestión, sino también su circularización en el propio entorno donde son generados. Sin embargo, al tratarse de nuevos escenarios de gestión, todavía existe poca información respecto a las características de los compost obtenidos, lo cual requiere de un control de dichos procesos que asegure su calidad e inocuidad para su posterior uso agrícola.

Por tanto, el **principal objetivo** de este proyecto es el seguimiento de procesos de compostaje descentralizado para la gestión de la fracción orgánica de los residuos urbanos de recogida selectiva, mediante la verificación de los requisitos convencionales en estos nuevos escenarios de gestión de residuos orgánicos, que garanticen su uso seguro para una producción agrícola sostenible en el marco de la economía circular. Para lograr el objetivo principal de seguimiento de procesos de compostaje descentralizado y gestión de la fracción orgánica de los residuos urbanos, es fundamental abordar los siguientes objetivos específicos:

- Evaluación de las características de los residuos iniciales utilizados en los procesos de compostaje desarrollados en la planta de compostaje descentralizado objeto de estudio para evaluar su efecto en el proceso y en la calidad del compost resultante.
- Seguimiento de la evolución de factores relativos al propio proceso de compostaje, así como de las muestras correspondientes a las diferentes etapas del proceso, para confirmar el adecuado desarrollo del proceso y así asegurar la calidad y seguridad del compost.
- Determinación de la calidad del compost final para su uso en una producción agrícola sostenible, mediante la detección de posibles contaminantes, como metales pesados o patógenos, que puedan representar un riesgo para la salud humana, los cultivos o el medio ambiente.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Los residuos sólidos urbanos y su gestión

La generación de residuos sólidos municipales es un desafío significativo a nivel mundial. Según las estimaciones del Banco Mundial en 2018, se generaban alrededor de 2.010 millones de toneladas de estos residuos. Los residuos sólidos abarcan una amplia gama de desechos provenientes de actividades domésticas, comerciales e institucionales, así como de áreas verdes como jardines y parques (Banco mundial, 2018).

Estos residuos pueden incluir una variedad de materiales, como restos de alimentos, papel, cartón, plásticos, vidrio, textiles y materiales de construcción, entre otros. La gestión adecuada de estos residuos es esencial para minimizar su impacto ambiental y promover prácticas sostenibles.

En muchos países, la cantidad de residuos sólidos está en aumento debido al crecimiento de la población, el desarrollo urbano y los cambios en los hábitos de consumo. Por lo que, si no se toman medidas adecuadas para abordar este problema, se estima que para el año 2050 la generación de residuos sólidos podría aumentar hasta un 70%, alcanzando aproximadamente 3.400 millones de toneladas anuales (Banco Mundial, 2018).

Este aumento significativo en la generación de residuos presenta una serie de desafíos y consecuencias negativas para el medio ambiente y la sociedad. Entre las posibles consecuencias se encuentran problemas de salud, impacto ambiental, deterioro paisajístico, escases de recursos, entre otros (Vargas, J.M., 2020).

Para evitar las posibles consecuencias negativas de la creciente generación de residuos sólidos municipales, es esencial adoptar sólidas estrategias de gestión de residuos. Esto incluye fomentar la reducción en la fuente, promover el reciclaje, el compostaje y otras prácticas sostenibles (Banco mundial, 2018).

El estado español por la **Ley 7/2022**, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular define **residuo** como “cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseché o tenga la intención o la obligación de desechar” (BOE, 2022). Esta ley tiene por finalidad prevenir y reducir de la generación de residuos y los impactos adversos de su generación y gestión, reducir del impacto global del uso de los recursos y mejorar la eficiencia de dicho uso con el objeto de, en última instancia, proteger el medio ambiente y la salud humana y efectuar la transición a una economía circular y baja en carbono con modelos empresariales, productos y materiales innovadores y sostenibles para garantizar el funcionamiento eficiente del mercado interior y la competitividad de España a largo plazo. También prevenir y reducir el impacto de

determinados productos de plástico en la salud humana y en el medio ambiente, con especial atención al medio acuático.

En la nueva ley de residuos se establecen grupos de residuos a fin de clarificar estrategias de gestión.

Los **residuos domésticos**, son generados en los hogares como consecuencia de actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias. También se incluyen en esta categoría los residuos generados en los hogares como aparatos eléctricos y electrónicos, ropa, pilas, acumuladores, muebles y enseres, así como residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria. Los residuos procedentes de limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas y los animales domésticos muertos y los vehículos abandonados se consideran también residuos domésticos.

Los **residuos comerciales** son generados por la actividad propia del comercio al por mayor y al por menor, de los servicios de restauración y bares, de las oficinas y los mercados.

Los **residuos industriales** son los resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o mantenimiento generados por la actividad industrial (BOE, 2022).

El término **Biorresiduo** también aparece en dicha ley y se define como “residuo biodegradable vegetal de hogares, jardines, parques y del sector servicios, así como residuos alimentarios y de cocina procedentes de hogares, oficinas, restaurantes, mayoristas, comedores, servicios de restauración colectiva y establecimientos de consumo al por menor, entre otros, y residuos comparables procedentes de plantas de transformación de alimentos.”.

Una zona urbana es aquella porción geográfica altamente poblada, característica de las grandes ciudades acompañadas del comercio y la tecnología. Existe una demografía mayor habitantes (RAE, 2022), sin embargo, la definición puede variar según el país.

Por ende, los residuos sólidos urbanos (RSU) son aquellos objetos o sustancias desechados provenientes de las zonas urbanas, de las diferentes actividades, comerciales, domésticas, industriales que se encuentran en la zona. Por lo cual se pueden encontrar diferentes tipos de residuos como restos de limpieza de vías públicas, zonas verdes, animales domésticos, muebles, escombros, comida, entre otros.

Estos residuos pueden presentar un problema ambiental si no se hace una correcta gestión, debido a que su acumulación puede ocasionar la proliferación de vectores, daños paisajísticos, lixiviados, infiltración de lixiviados en el suelo y en las escorrentías. Por esta razón es

fundamental clasificar los residuos de acuerdo con su origen y características, de manera que se puedan aplicar medidas más eficaces para su gestión.

Los RSU engloban la fracción orgánica derivada de los restos de comida y residuos de jardín, así como papel, plástico y envases, vidrio, metales (como latas) y textiles, entre otros elementos. Una significativa cantidad de estos materiales pueden ser valorizados por un método de tratamiento. Pero para que sean correctamente tratados para su valorización, reciclado o reutilizado deben tener correcta separación en su origen para facilitar un sistema eficiente de su gestión.

De esta manera, la clasificación de los residuos nos permite maximizar su aprovechamiento y minimizar su impacto ambiental, al tiempo que se promueve una gestión más sostenible y responsable de los recursos naturales.

En España la gestión de los RSU comienza desde el domicilio. Donde los usuarios separan de manera autónoma las diferentes fracciones propuestas por el Ministerio, las cuales son 6 (Tabla 2.1). Donde las más habituales son el tipo 1 sobre todo en Cataluña, tipo 4 y principalmente el tipo 5 en el resto de las comunidades Autónomas.

Tabla 2. 1. Modelos de separación de residuos de competencia municipal en España teniendo a las distintas fracciones principales separadas en origen. Fuente: MITECO (2021).

Tipo 1 5 Fracciones	Tipo 2 Húmedo - seco	Tipo 3 Multiproducto	Tipo 4 4 Fracciones + poda	Tipo 5 4 Fracciones	Tipo 6 3 Fracciones
Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio	Vidrio
Papel - Cartón	Papel - Cartón	Papel - Cartón + Envases ligeros	Papel - Cartón	Papel - Cartón	Papel - Cartón
Envases ligeros	Restos + Envases ligeros		Envases ligeros	Envases ligeros	
Resto		Resto	Resto (Incluye FO)	Resto (Incluye FO)	Resto (Incluye FO + Envases ligeros)
Fracción orgánica	Fracción orgánica	Fracción orgánica	Residuos de jardinería	-	-

FO: Fracción Orgánica; Resto: fracción indiferenciada no considerada como recogida separada

Estas recogidas ordinarias se complementan con otras específicas de residuos voluminosos, pilas, textil, aceites u otros. Además, muchos municipios ya disponen de servicios de punto limpio (fijo, móvil, de barrio, etc.).

En la Tabla 2.2 se presentan las cantidades de residuos de competencia municipal recogidos en España en 2020, según la modalidad de recogida mezclados o por fracciones de forma selectiva y en la Tabla 2.3 se presentan datos más completos de dicha recogida, así como su gestión. Los

datos incluyen la información definitiva comunicada a EUROSTAT y a la OCDE sobre generación y tratamiento de “residuos municipales” correspondiente a España en el año 2020, que integra la proporcionada por el MITECO y por el INE (datos en toneladas).

En el año 2020 la cantidad de residuos de competencia municipal recogidos en España fue de casi **22 M de toneladas**, estas cantidades corresponden a residuos domésticos y comerciales, procedentes de hogares y del sector servicios (comercio, oficinas e instituciones) gestionados por las Entidades Locales, no incluyéndose los residuos comerciales gestionados por canales privados distintos al municipal, ni residuos procedentes de la industria.

Tabla 2. 2. Cantidad de residuos de competencia municipal recogidos en España 2020. Fuente MITECO (2021).

CANTIDAD DE RESIDUOS DE COMPETENCIA MUNICIPAL RECOGIDOS EN ESPAÑA. 2020				
Modalidad de recogida	Código LER - RESIDUO		t/año	%
Residuos mezclados	20 03 01	Mezclas de residuos municipales	16.452.778	79
	20 01 01	Papel y cartón	1.340.017	
Residuos recogidos selectivamente*	20 01 02	Vidrio	13.569	21
	20 01 08	Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes	890.479	
	20 02 01	Residuos biodegradables de parques y jardines	362.733	
	15 01 06	Envases mezclados	887.731	
	15 01 07	Envases de vidrio	815.296	
	TOTAL			

Tabla 2.3. Cantidad de residuos generados y tratados. Fuente MITECO (2021).

CANTIDAD DE RESIDUOS DE COMPETENCIA MUNICIPAL RECOGIDOS EN ESPAÑA. 2020							
Fuente	Código LER - RESIDUO		Generación	Reciclado	Compostaje	Vertido	Incineración
MITECO	20 03 01	Mezclas de residuos municipales	16.452.778	684.917	3.572.237	10.171.708	2.023.917
	20 01 01	Papel y cartón	1.340.017	1.340.017	0	0	0
	20 01 02	Vidrio	13.569	13.569	0	0	0
	20 01 08	Residuos biodegradables de cocinas y restaurantes	890.479	0	611.047	208.373	71.060
	20 02 01	Residuos biodegradables de parques y jardines	362.733	0	240.610	106.158	15.965
	15 01 06	Envases mezclados	887.731	551.309	0	266.803	69.620
	15 01 07	Envases de vidrio	815.296	815.296	0	0	0
INE	20 01 40	Residuos metálicos	46.296	46.123	0	144	29
	20 01 39	Residuos de plástico	14.254	9.408	0	3.209	1.637
	20 01 38	Residuos de madera	149.713	142.200	0	2.011	5.502
	20 01 10	Residuos textiles	39.972	23.137	0	14.448	2.387
	20 01 11						
	20 01 21	Equipos desechados	99.486	89.473	0	9.997	16
	20 01 23						
	20 01 35						
	20 01 36						
	20 01 33	Residuos de pilas y acumuladores	2.197	2.197	0	0	0
	20 01 34						
20 03 02	Residuos de mercados	874.794	778.283	0	76.174	20.337	
20 03 07	Residuos voluminosos	0	0	0	0	0	
20 02 02	Tierras y piedras de parques y jardines	0	0	0	0	0	
TOTAL			21.989.316	4.495.928	4.423.894	10.859.025	2.210.469
%				20,4	20,1	49,4	10,1

Los residuos sólidos urbanos, cuando no se gestionan adecuadamente, pueden tener consecuencias negativas significativas. La acumulación de estos residuos puede atraer vectores

portadores de enfermedades que afectan a las comunidades cercanas. Además, la acumulación conlleva la generación de olores y lixiviados, los cuales deterioran la calidad de vida en las áreas urbanas al llegar a las zonas residenciales o contaminar los recursos naturales a través de infiltraciones en el suelo o escorrentías. Además, esta acumulación causa un impacto negativo en el paisaje (Kofalusi, G., y Agilar, E. 2006).

2.2. El compostaje: aspectos teóricos y técnicos

2.2.1. Definición y fases del proceso

El compostaje es un proceso biológico natural que implica la degradación de residuos orgánicos mediante la acción de microorganismos. Se puede definir como la creación de las condiciones adecuadas para que, a partir de los residuos orgánicos, los organismos descomponedores como bacterias y hongos fabriquen un abono de alta calidad conocido como compost (MMAMRM, 2008) (Fig. 1).



Figura 2.1. Ciclo del compostaje. Fuente: Universidad UNIMINUTO (2018).

Esta técnica forma parte de la economía circular, ya que aprovecha los residuos orgánicos para producir un producto útil y beneficioso. El compost resultante es un abono rico en nutrientes y macronutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Al utilizar el compost, se enriquece el suelo de jardines y cultivos, mejorando su calidad y aumentando la producción de plantas (MMAMRM, 2008).

El proceso de compostaje requiere la creación de las condiciones adecuadas, como la correcta proporción de materiales orgánicos, la presencia de oxígeno y la humedad adecuada. Los

residuos orgánicos, como restos de alimentos, poda de jardín, hojas, entre otros, se mezclan y se colocan en pilas o contenedores especiales para llevarse a cabo el proceso biológico y obtener un compost de calidad.

El principal objetivo del compostaje es la higienización y la estabilización de la materia orgánica, mediante la eliminación de patógenos y materiales no deseados, también hace referencia a la reducción el volumen y el peso de la materia orgánica compostada con el fin de obtener un material final de buena calidad (Moreno y Mormeneo, 2008).

Sin embargo, es evidente que debido a una inadecuada comprensión de los aspectos físico-químico-biológicos del proceso o/y falta de mantenimiento de las condiciones de operación adecuadas, pueden conducir a generar compost inmaduros, que no cumple con los estándares. La aplicación de compost inmaduro afectaría al (i) al crecimiento de las plantas debido a la fitotoxicidad, la deficiencia de N y oxígeno (O), (ii) conduciría a la eutrofización debido al lavado de N y presencia de herbicidas, pesticidas y (iii) afectan negativamente al medio ambiente (Azim et al., 2018; Soudejani et al., 2019; Xiao et al., 2017; Wu et al., 2017; Zbytniewski y Buszewski, 2005).

El proceso de compostaje se divide en cuatro etapas o fases y este depende de la temperatura, lo que significa que la temperatura define la etapa en la que se encuentra el compostaje y la evolución de la materia orgánica (FAO, 2013).

1. **Fase mesófila:** El proceso de compostaje comienza a temperatura ambiente con el material de partida, y en un corto período de tiempo, que puede ser de horas o pocos días, la temperatura se eleva a unos 45°C. Este aumento de temperatura es resultado de la actividad microbiana, en la cual los microorganismos utilizan fuentes simples de carbono y nitrógeno para generar calor. Durante esta fase, la descomposición de compuestos solubles, como los azúcares, produce ácidos orgánicos, lo que puede disminuir el pH del ambiente hasta aproximadamente 4,0 o 4,5. Esta fase tiene una duración breve, que oscila entre dos y ocho días.
2. **Fase termófila o de higienización:** Este se da cuando el material alcanza temperaturas mayores que los 45°C, lo cual significa que para esta fase solo resisten los microorganismos que se adaptan a estas temperaturas mayores, principalmente bacterias termófilas. Estas actúan degradando los compuestos más complejos de C, como lo son celulosa y la lignina. Por las altas temperaturas presente en esta fase aumenta la emisión de CO₂, H₂O, compuestos inorgánicos y fitotóxicas. En esta fase se eliminan patógenos, larvas y semillas no deseados. Este proceso puede durar entre

algunos días como hasta meses, todo depende del material, condiciones climáticas, lugar, entre otras cosas.

3. **Fase de Enfriamiento:** Cuando se acaban las fuentes de carbono y el nitrógeno en los materiales compostados, las temperaturas decrecen nuevamente por debajo de los 45 °C. Continúa la degradación de polímeros como la celulosa. Cuando las temperaturas se encuentran por debajo de los 40 °C, los microorganismos mesófilos vuelven a tener actividad generando que el pH este ligeramente alcalino. Esta fase puede tardar algunas semanas
4. **Fase de maduración:** Es la última etapa del compostaje lo cual puede variar entre algunos meses donde la temperatura debe estar igual a la del ambiente, esto produce reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para formar ácidos húmicos y fúlvicos.

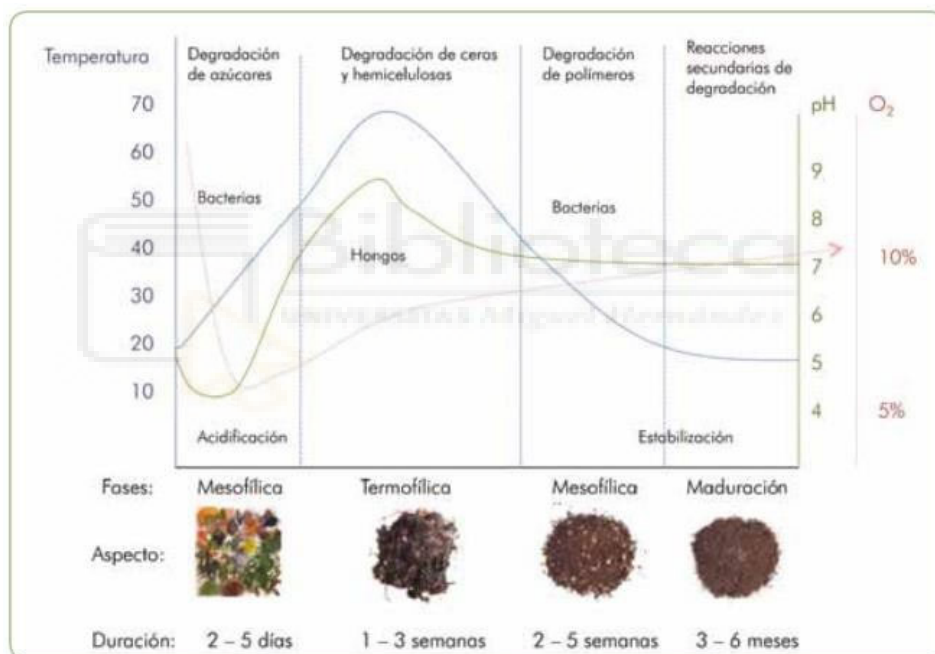


Figura 2 2. Etapas de Compostaje. Fuente: FAO (2013).

2.2.2. Parámetros de control al inicio del proceso

Para que el proceso de compostaje se lleve de manera adecuada. Se debe tener en cuenta las características de los residuos sólidos recogido en las urbanizaciones esto con el fin de conocer el estado de estos, y tener en cuenta si tienen las condiciones adecuadas para el proceso de compostaje óptimo.

Para lograr una ejecución adecuada del proceso, es esencial considerar los factores relacionados con las características del sustrato y tomar medidas de control al inicio de este (Márquez P., et al, 2008). Los cuales son:

- **Tamaño de partícula:** El tamaño de las partículas al inicio del proceso de compostaje es crucial para la eficiencia de este. Triturar el material aumenta la velocidad de la reacción al permitir un mayor contacto de los microorganismos con la superficie de las partículas. Sin embargo, un tamaño de partícula muy pequeño puede limitar la difusión de oxígeno y dióxido de carbono, lo que puede causar un colapso microbiano. Existen diferentes dimensiones que se consideran óptimas. Por lo cual la más óptima depende del criterio del autor o de la persona encargada del proceso. Los rangos se encuentran entre 1 y 5 cm (Márquez P, et al, 2008).
- **Relación C/N:** este es un factor crucial en el proceso de compostaje, ya que influye tanto en la velocidad de la reacción como en la pérdida de amonio. Cuando la relación C/N se ve afectada y hay un exceso de carbono, la actividad biológica disminuye. En el compostaje, los microorganismos necesitan aproximadamente 30 partes de carbono por cada una de nitrógeno. Por lo tanto, se establece un rango óptimo de relación C/N de 25-35 para asegurar una descomposición adecuada del material (Saña P, et al, 1987).
- **Nutrientes:** La composición elemental de los sustratos es la característica química más importante. Dado que los microorganismos solo pueden aprovechar compuestos simples las moléculas más complejas se rompen en otras más simples en las que se destacan, C, N y P. Estos son macronutrientes fundamentales para el desarrollo microbiano, cuya concentración aumenta a medida que se degradan los residuos (Márquez P., et al, 2008).
- **Conductividad eléctrica (CE):** esta está influenciada por la naturaleza y composición del material de partida, especialmente por la concentración de sales, y en menor medida por la presencia de iones amonio o nitrato producidos durante el proceso de compostaje. En general, la CE aumenta durante el compostaje debido a la mineralización de la materia orgánica y el aumento de la concentración de nutrientes. Sin embargo, a veces la CE disminuye debido a la lixiviación causada por una humedad excesiva. La cantidad de compost que se debe agregar al suelo debe ser proporcional a la CE del compost, ya que un exceso de salinidad puede dificultar la absorción de agua por las raíces de las plantas, lo que limita el crecimiento de especies sensibles (Márquez P., et al, 2008).

- pH: se pueden compostar materiales dentro de un amplio rango de valores de pH (3-11). No obstante, los comprendidos entre 5,5 y 8 son los que se consideran óptimos, ya que en general los hongos toleran un amplio margen de pH (5-8) mientras que las bacterias tienen un margen más estrecho de pH (6-7,5) (Costa y col., 1991).

2.2.3. Parámetros básicos de control del proceso

Cuando los parámetros de inicio del proceso de compostaje están correctamente y se puede dar inicio al proceso de compostaje. A medida que avanza el proceso también se debe tener en cuenta ciertos parámetros para que el compost final tenga unas condiciones óptimas para una correcta aplicación (Tabla 4.2). Los parámetros principales son:

- **Temperatura:** Si las condiciones son adecuadas, se da inicio la actividad microbiana en el proceso. Al inicio todo el material se encuentra a la misma temperatura, pero a medida que los microorganismos tienen mayor actividad, generan calor, lo que provoca un aumento en la temperatura. El incremento de la temperatura en el compostaje es un indicador de la actividad microbiana y, por tanto, se considera una variable esencial en el control del proceso de compostaje (Liang C., et al, 2002).

Con la temperatura se puede obtener la eficiencia y el grado de estabilización que lleva el proceso debido a que existe una relación directa entre la temperatura y la degradación de la materia orgánica. Por lo que se observan tres fases en el proceso de descomposición de la materia relacionados con la temperatura. Se inicia con la fase mesófila a temperaturas inferior a los 45 °C en la cual se generan ácidos orgánicos, seguida esta la fase termófila a temperaturas superiores a los 45°C y finaliza con la fase de enfriamiento donde el proceso vuelve a una temperatura ambiente (Bueno P., et al, 2008).

- **Humedad:** La presencia de agua en el proceso de compostaje es fundamental para los microorganismos ya que de esta manera es transportada algunas sustancias solubles que sirven como alimento, también ayuda con las necesidades fisiológicas de estos (Haug R., 1993). Es necesario que la humedad del compostaje se mantenga en un nivel en el que el agua no llene por completo los espacios porosos de la masa para permitir la correcta circulación de oxígeno sin que se creen zonas anaerobias que afecten de forma negativa.

La humedad óptima para el crecimiento microbiano está entre el 50% - 70%. Si la humedad desciende por debajo del 30%, la actividad biológica se reduce considerablemente. Por otro lado, cuando la humedad supera el 70%, el agua ocupa los

espacios libres entre las partículas, lo que limita la transferencia de oxígeno y da lugar a condiciones anaeróbicas. En estas condiciones, se generan malos olores y se ralentiza el proceso de compostaje (Bueno P., et al, 2008).

- **pH:** La dinámica del proceso microbiano se ve afectada directamente por el pH. El seguimiento del pH proporciona una medida indirecta del control de la aireación de los residuos. Si las condiciones no son óptimas y se presentan condiciones anaeróbicas, se liberan ácidos que provocan una disminución en el pH. Esta disminución en el pH afecta directamente la actividad microbiana y puede indicar la necesidad de ajustar las condiciones de aireación para mantener un proceso saludable (Bueno P., et al. 2008). Al igual que la temperatura, pasa por tres fases distintas durante el proceso de compostaje. En la primera fase, el pH disminuye debido a la producción de ácidos orgánicos por parte de los microorganismos, que se alimentan de la materia orgánica fácilmente oxidable. En la segunda fase el pH aumenta dado que los microorganismos utilizan los ácidos orgánicos producidos en la primera fase y la generación de amoníaco producido por la hidrólisis de las proteínas. Por último, en la tercera fase, el pH se estabiliza en valores cercanos a la neutralidad gracias a la producción de compuestos húmicos (Bohórquez W.,2019).
- **Relación C/N:** Una elevada relación de C/N tiene un impacto negativo debido a que disminuye la actividad biológica, mientras que la relación C/N bajas no afectan el proceso de compostaje. En este caso el exceso de nitrógeno se pierde en forma de amoníaco (Clemente F, 2013).
- **Aireación:** Este parámetro es fundamental para el proceso debido a que oxida las moléculas orgánicas presente y permite el ingreso de oxígeno a la pila para los microorganismos en los residuos. Es indeseable que se generen zonas anaerobias durante el compostaje, debido a que conduce a una degradación incompleta y permite la aparición de olores desagradables. La aireación durante el proceso ayuda a minimizar los olores asociados con la descomposición anaeróbica y promueve la descomposición completa de los subproductos parcialmente degradados, como los ácidos orgánicos. Estos ácidos orgánicos pueden contribuir a la fitotoxicidad cuando el compost se utiliza finalmente (Rodríguez, 2011).

Es importante evitar un exceso de aireación, ya que esto puede aumentar los costos de producción y provocar una evaporación excesiva, lo cual inhibiría la actividad microbiológica. La aireación debe mantenerse en niveles adecuados y variar a lo largo

del proceso. En las fases mesófilas, la aireación debe ser baja, mientras que en la fase termófila se debe alcanzar el máximo nivel de aireación (Bueno P., et al., 2008).

Tabla 2.3. Parámetros del compostaje. Fuente FAO (2013).

Parámetro	Rango ideal al comienzo (2 -5 días)	Rango ideal para compost en fase termofílica II (2 - 5 Semanas)	Rango ideal de compost maduro (3 - 6 Meses)
C:N	25:1 - 35-1	15/20	
Humedad	50 - 60%	45%-55%	
Concentración de oxígeno	~10%	~10%	~10%
Tamaño de partícula	<25 cm	~15 cm	
pH	6,5 - 8,0	6,0-8,5	
Temperatura	45 - 60 °C	45°C Temperatura ambiente	
Densidad	250-400 kg/m ³	<700 kg/m ³	<700 kg/m ³
Materia orgánica (Base seca)	50%-70%	>20%	>20%
Nitrógeno total (Base seca)	2,5-3%	1-2%	~1%

2.3. Nuevos escenarios de compostaje: el compostaje descentralizado

Cuando se habla de compostaje a gran escala de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU) es más frecuente referirse al compostaje centralizado. Este es un proceso en el cual los residuos se recogen de los lugares donde se generan y se transportan a una instalación centralizada para su previo tratamiento. Los residuos son recogidos de diversas fuentes, como lo son los hogares, empresas, instituciones, etc. Y se llevan a un lugar específico para iniciar el proceso de compostaje (Plana R., 2018).

El compostaje descentralizado es un enfoque del compostaje que se lleva a cabo a nivel local, generalmente en el lugar donde se generan los residuos orgánicos. A diferencia del compostaje centralizado, donde los residuos se recogen y se procesan en instalaciones a gran escala, el compostaje descentralizado se realiza en pequeños contenedores o sistemas de compostaje en el mismo lugar donde se generan los residuos (Plana R., 2018).

La FORS ofrece la posibilidad de practicar el compostaje descentralizado en diversas escalas y utilizando diferentes técnicas. Dependiendo del grado de descentralización y del tamaño deseado, las opciones pueden variar desde miniplantas municipales hasta soluciones más pequeñas diseñadas para el compostaje en el interior de los hogares domésticos (Storino F,

2017). Las plantas deben situarse cerca de los lugares de generación de los residuos y de las zonas en las que posteriori se pueda reciclar el compost obtenido.

El compostaje descentralizado tiene varias ventajas. Permite reducir los costos y la energía asociados al transporte de los residuos a instalaciones centrales, así como reducir las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con el transporte. Además, el compostaje descentralizado facilita la gestión y el aprovechamiento de los residuos orgánicos a nivel local, lo que puede fomentar la participación comunitaria y la conciencia ambiental (Storino F, 2017). La idea directriz es cerrar el ciclo de la materia orgánica de forma sostenible teniendo en cuenta los principios de la economía circular.

Para implementar el compostaje descentralizado es necesario un cambio de gestión de los biorresiduos que incluya un sistema de recogida selectiva entre los que destacan el Puerta a Puerta en pequeños municipios o el contenedor marrón en municipios de más envergadura, además de la construcción de una instalación de compostaje descentralizada.

El compostaje descentralizado puede realizarse en diferentes formas, como pilas de compostaje en jardines, patios traseros o grandes espacios al aire libre, compostaje en vermicomposteras (utilizando lombrices), o mediante sistemas de compostaje en pequeñas instalaciones o comunidades. Dependiendo del tamaño y la escala de la operación, el compostaje descentralizado puede generar compost de alta calidad que se puede utilizar en la fertilización de suelos, en jardinería o en agricultura urbana.

Por lo tanto, en numerosos países se han realizado investigaciones sobre el compostaje descentralizado de residuos. Se han publicado artículos en distintas revistas como lo son la *Bioresource Technology*, *Waste and Biomass Valorization*, *Journal of Environmental Managemen*, entre otras. También se ha presenta estudios en diferentes congresos internacionales como lo son el *RAMIRAN (Research Network on Recycling of Agricultural and Industrial Residues in Agriculture)* de la FAO.

Una de las plantas de compostaje descentralizado que se puede encontrar en España, es la de Sort, localizada en la provincia de Lérida en la comunidad autónoma de Cataluña la cual fue inaugurada en el 2015. La construcción de la planta se encuentra dentro del proyecto europeo SCOW (Selective Collection of the Organic Waste in Tourist Areas and Valorisation in Small-Scale Composting Plants).

Para garantizar el funcionamiento eficiente de la planta, se implementó la recogida selectiva de la materia orgánica mediante la instalación de puntos limpios con nuevos contenedores. Esta medida ha facilitado la correcta separación de los residuos en su lugar de origen, lo que asegura

que lleguen a la planta únicamente residuos orgánicos de alta calidad, con un índice de impropios máximo del 2%.

La buena adecuada separación de residuos en los hogares permite que la planta de compostaje pueda aumentar su capacidad de procesamiento a 750 toneladas de fracción orgánica al año. Esto ha permitido la producción de compost de alta calidad que puede ser utilizado en campos, huertos y jardines, fomentando así la economía circular.

2.4. Indicadores de calidad del compost y normativa asociada

2.4.1. Indicadores de calidad de compost

La calidad de un compost está relacionada con el grado de madurez y estabilidad alcanzado, así como su composición química. El concepto de madurez cubre distintos grados de estabilidad según vaya a ser el destino del compost. Por ello es recomendable realizar un seguimiento completo del desarrollo del proceso de compostaje, ya que de esta forma se puede obtener una idea más clara y segura de la madurez del producto, de la eficacia del proceso de compostaje. La aplicación agrícola de compost sin un adecuado grado de madurez, puede ocasionar efectos negativos muy graves, como disminución del contenido de oxígeno a nivel de las raíces, bloqueo de nitrógeno en el suelo por C/N, excesivo aumento de la temperatura del suelo, acumulación de sustancias fitotóxicas, la no eliminación de microorganismos patógenos, etc.

Destacan diversos métodos para evaluar el grado de madurez de un compost, como son:

A. Métodos de observación:

1. Olor: Los materiales frescos desprenden compuestos como amoníaco, aminos y ácidos orgánicos que producen malos olores, pero que a medida que el compost madura tienden a desaparecer. La evaluación de estos compuestos ha sido utilizada como criterio de madurez (Iglesias y Pérez, 1989).
2. Temperatura. El control y seguimiento de la curva de temperatura durante el compostaje puede dar información de la fase en la cual se encuentra el proceso, dado que se supone que en la fase final de estabilización se alcanza de forma continua la temperatura ambiente (Stickelberger, 1975).
3. Color. La evaluación colorimétrica puede ser considerada como un criterio de madurez para determinados materiales (Sugahara y col., 1979).

B. Métodos basados en el estudio de la actividad microbiana:

1. Métodos respirométricos: absorción de oxígeno o desprendimiento de anhídrido carbónico. Consideran maduro un compost que no consuma más de 40 mg de oxígeno por kg de materia seca en una hora, después de incubarlo durante 3 días (Iglesias y Pérez, 1989).
2. Métodos de análisis bioquímico. Están basados en el estudio de enzimas indicadores de la actividad celular y otros se basan en la identificación de la microflora específica de cada fase del compostaje.

C. Métodos de análisis físicos y físico-químicos:

Basados en una evaluación cualitativa o cuantitativa de las sustancias que durante el proceso de compostaje experimentan una descomposición o humificación.

1. Contenido de carbono orgánico hidrosoluble: García y col (1992) consideraron que un compost estaba maduro cuando el contenido de carbono orgánico hidrosoluble era $<0,5\%$. Sin embargo, Hue y Liu, (1995) encontraron que el porcentaje de carbono orgánico del extracto acuoso tenía que ser $<1\%$ para establecer que un compost había alcanzado un grado de madurez aceptable, mientras que Bernal y col, (1998) propusieron que un compost estaba maduro cuando su contenido en carbono orgánico hidrosoluble era $<1,7\%$.
2. Relación C/N en la muestra sólida. Es el criterio que más se ha empleado para determinar el grado de madurez del compost y definir su calidad agronómica. Algunos autores han propuesto una relación C/N por debajo de 20 como indicativa de un aceptable nivel de madurez (Poinceot, 1974; Cárdenas y Wang, 1980; Golueke, 1991) o con un valor menor de 15 (Juste, 1980).
3. Relación C/N en el extracto acuoso. Teniendo en cuenta que la mayor parte de las reacciones que ocurren en el proceso de compostaje son transformaciones bioquímicas de la materia orgánica de los residuos, llevadas a cabo por los microorganismos cuyo metabolismo ocurre en fase acuosa, Hue y Liu (1995) consideraron que un compost había alcanzado un grado de madurez aceptable cuando la relación de C_{org} soluble en agua/ N_{org} total era $<0,70$; mientras que Bernal y col (1998) consideraron que el valor de esta relación tenía que ser $<0,55$.
4. Nitrificación. Bernal y col. (1998) establecieron que un compost estaba maduro cuando su relación NH_4/NO_3 era $<0,16$.
5. Estudio de la materia orgánica humificada. Los principales índices para evaluar el grado de humificación de la materia orgánica de los compost, a partir de los porcentajes de carbono extraíble (C_{ext}), carbono de ácidos húmicos (C_{AH}) y de los ácidos fúlvicos (C_{AF}) se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Índices de madurez y humificación de compost maduro.

Parámetro	Valor límite	Fuente
Carbono extraíble, C _{ex} (g/kg)	<60	Bernal et al (1998)
Relación de humificación, RH (%), $C_{ex}/C_{OT} \times 100$	> 7	Roletto y col. (1985) BioCycle, 26 (2), 46-47.
Índice de humificación, IH (%), $C_{ah}/C_{OT} \times 100$	> 3,5	Roletto y col. (1985) BioCycle, 26 (2), 46-47.
	> 13	Iglesias Jiménez y Pérez García (1992) Agr. Ecosyst. Environ., 38, 331-343.
Porcentaje de ácidos húmicos, Pah (%), $C_{ah}/C_{ex} \times 100$	> 62	Iglesias Jiménez y Pérez García (1992) Agr. Ecosyst. Environ., 38, 331-343.
Relación de polimerización, RP (%), ah/C_{af} ,	> 1	Roletto y col. (1985) BioCycle, 26 (2), 46-47.
	> 1,6	Iglesias Jiménez y Pérez García (1992) Agr. Ecosyst. Environ., 38, 331-343.

Los índices descritos anteriormente son útiles para seguir el proceso de compostaje de una determinada pila, por lo que se deberá estudiar su evolución en el tiempo más que los valores finales ya que según la naturaleza de los materiales iniciales el proceso puede variar.

6. Capacidad de intercambio catiónico. Si es >60 meq/100 g, sobre la materia orgánica, indica que el compost está maduro (Harada y col., 1981). Sin embargo, Iglesias-Jiménez y Pérez-García (1992b) encontraron que el valor de este parámetro tenía que ser >67 meq/100 g, sobre la materia orgánica, para considerar al compost maduro. Además, Iglesias-Jiménez y Pérez-García (1992b) propusieron la relación capacidad de cambio catiónica/carbono orgánico total (CCC/C_{OT}) como índice de madurez más fiable que la capacidad de cambio sola, considerando que un compost es maduro cuando esta relación es >1,9; mientras García y col. (1992) encontraron un valor más alto, debía de ser >3,5.

D. Ensayos sobre vegetales

Son métodos muy fiables ya que ponen de manifiesto la presencia de productos fitotóxicos que no son detectados por los métodos anteriores.

1. Test de germinación. Zucconi y col. (1981) utilizó semillas de *Lepidium sativum* para calcular un índice de germinación combinando el porcentaje de germinación y la longitud media de las raíces.

2. Test de crecimiento. Supone la evaluación del efecto del compost sobre distintos vegetales, siendo los más corrientes el rye-grass, el maíz y la cebada.

2.4.2. Normativa española asociada a los compost

Dentro del marco del Plan Nacional Integrado de residuos, la legislación específica sobre residuos sólidos urbanos establece como obligatorio el objetivo de prohibir el abandono, vertido o eliminación descontrolada de los residuos (BOE nº 49 de 26 de febrero de 2009, pp. 19893-20016). Este estableció como prioridad las opciones de gestión desde la prevención, reutilización, reciclaje, valorización energética y por último la eliminación.

Por lo cual el compostaje se considera un método de gestión de residuos superior a los vertederos, ya que implica un proceso controlado de descomposición de materiales orgánicos. En consecuencia, se han establecido diversas normativas para regular y optimizar su implementación.

En España, existen normativas específicas que abordan el compostaje como una alternativa sostenible y eficiente en la gestión de residuos. Estas normativas se enfocan en establecer requisitos técnicos, procedimientos de autorización y directrices para la producción y uso adecuado del compost.

La ley 7/ 2022, de 28 de julio tiene como objetivo regular el régimen jurídico aplicable a la puesta en el mercado de productos en relación con el impacto en la gestión de sus residuos, así como el régimen jurídico de la prevención, producción y gestión de residuos, incluyendo el establecimiento de instrumentos económicos aplicables en este ámbito, y el régimen jurídico aplicable a los suelos contaminados. También prevenir y reducir la generación de residuos y de los impactos adversos de su generación y gestión, reducir el impacto global del uso de los recursos y mejorar la eficiencia de dicho uso con el objeto de, en última instancia, proteger el medio ambiente y la salud humana y efectuar la transición a una economía circular y baja en carbono con modelos empresariales, productos y materiales innovadores y sostenibles para garantizar el funcionamiento eficiente del mercado interior y la competitividad de España a largo plazo. Asimismo, esta ley tiene por finalidad prevenir y reducir el impacto de determinados productos de plástico en la salud humana y en el medio ambiente, con especial atención al medio acuático.

El Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivos, tiene como objetivo principal establecer normas básicas en relación con los sustratos utilizados en la agricultura, así como las disposiciones necesarias para coordinar su aplicación con las comunidades autónomas.

Esta normativa busca regular los requisitos técnicos y de calidad que deben cumplir los sustratos de cultivos utilizados en la producción agrícola. Establece criterios y parámetros específicos para garantizar la adecuada composición, propiedades físicas, químicas y biológicas de los sustratos, con el fin de asegurar su eficacia y seguridad en el desarrollo de los cultivos

El Real Decreto 506 del 2013, del 28 de junio tiene por objetivo el establecer la normativa básica para regular los productos fertilizantes en España, abarcando aspectos como la calidad, seguridad y etiquetado adecuado de dichos productos. Establece requisitos de composición, pureza y calidad, así como procedimientos de evaluación y autorización para su comercialización. También define responsabilidades y obligaciones de fabricantes, importadores y distribuidores, y establece mecanismos de control y seguimiento por parte de las autoridades competentes. En general, el decreto busca garantizar la calidad y seguridad de los productos fertilizantes, así como proteger a los consumidores y promover la transparencia en el sector.

El Real Decreto establece una clasificación de los fertilizantes utilizados como abono o enmienda en agricultura y jardinería, dividiéndolos en 7 grupos en función de su origen, composición y propiedades específicas:

Grupo1: Abonos inorgánicos nacionales

Grupo 2: Abono orgánicos

Grupo 3: Abono órgano-minerales.

Grupo 4: otros abonos y productos especiales

Grupo 5 enmiendas calizas

Grupo 6: enmiendas orgánicas

Grupo 7: Otras enmiendas.

Los compost se encuadran dentro del grupo 6 de enmiendas orgánicas. En este grupo se establece los criterios y requisitos técnicos y se definen los límites de parámetros y metales pesados necesarios para clasificar y regular los compost utilizados en la agricultura y jardinería. Estos límites son establecidos con el objetivo de garantizar la seguridad y la eficacia de los compost, evitando la presencia de sustancias perjudiciales o niveles excesivos de contaminantes (Tabla 2.6). En función del contenido en metales pesados se establecen 3 grupos distintos de compost.

El Reglamento (UE) 2019/1009 establece los requisitos para la comercialización de productos fertilizantes en la Unión Europea y modifica algunos reglamentos existentes. El marcado CE indica la conformidad de un producto fertilizante con este Reglamento. El capítulo IV del Reglamento trata sobre la notificación de organismos de evaluación de la conformidad, y este real decreto cumple con las obligaciones establecidas en ese capítulo.

El real decreto se aplica a los fertilizantes de la Unión Europea y establece las reglas necesarias para la aplicación en España en relación con los organismos involucrados. Sin embargo, no afecta

la vigencia del Real Decreto 506/2013, que establece la normativa básica para los productos fertilizantes nacionales y la coordinación con las comunidades autónomas.

Tabla 2.6. Parámetros establecidos en el Real Decreto. Fuente BOE, 2013.

Parámetro	RD 506/2013		
Materia orgánica mínima (%)	35		
Humedad máxima (%)	40		
C/N	<20		
Metales pesados (mg/kg m.s):	Clase A	Clase B	Case C
Cadmio	0,7	2	3
Cromo (total)	70	250	300
Cromo (VI)	n.d	n.d	n.d
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			
Salmonella sp.	Ausente en 25g de compost		
E. Coli	<1000NMP/g		
Partículas (%)	90(≤25 mm)		
Impurezas (%)	No puede contener		
Gravas y piedras (%)	No puede contener		
n.d.: no detectable según el método oficial; NMP: número más probable			

En la elaboración de este real decreto se han seguido los principios de buena regulación, como la necesidad, eficacia, proporcionalidad, seguridad jurídica, eficiencia y transparencia. Se ha consultado a las comunidades autónomas y a las entidades representativas de los sectores afectados.

El real decreto se basa en el artículo 149.1, regla 13ª de la Constitución Española, que otorga al Estado la competencia exclusiva sobre la planificación general de la actividad económica.

El Real Decreto 506/2013 del 28 de junio, sobre productos fertilizantes fue modificado y actualizado por el Real Decreto 999/ 2017 de 24, unas de las principales de las modificaciones que se hace, es donde el fabricante debe realizar un seguimiento analítico regular del producto final para asegurarse de que se mantienen las características garantizadas. Este seguimiento debe realizarse al menos dos veces al año. En el caso de productos con componentes orgánicos,

el fabricante debe asegurarse de que se mantenga la composición, riquezas y otras características garantizadas, cumpliendo las condiciones establecidas en la regulación del anexo V. Para esto, se deben realizar análisis de control al menos trimestralmente en estos casos. Además, el fabricante debe velar porque las materias primas utilizadas cumplan con los requisitos legales aplicables según su origen y naturaleza durante todo el proceso de fabricación. Por el lado de los microorganismos solo se pueden utilizar microorganismos que hayan demostrado capacidad para mejorar los procesos biológicos de las plantas, ya sea estimulando la absorción y uso de nutrientes, aumentando su tolerancia al estrés abiótico o mejorando la calidad de la cosecha. En el caso de los productos fertilizantes que contengan estos microorganismos, también deben cumplir con los requisitos especificados. Además, los productos que contengan materias primas de origen orgánico, animal, vegetal o microbiano no pueden exceder los valores máximos de microorganismos patógenos establecidos en el decreto.



3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Diseño experimental

En este trabajo experimental se pretende estudiar detalladamente el proceso de compostaje empleado para estabilizar la fracción orgánica de los residuos urbanos a fin de garantizar la obtención de compost de alta calidad en la planta de compostaje descentralizado de Sort. Mediante una caracterización exhaustiva de las materias residuales utilizadas, se busca obtener un producto final estabilizado, altamente humificado y con un valor añadido significativo. El seguimiento constante del compostaje permitirá identificar y controlar los parámetros clave que influyen en su calidad, como la temperatura, la humedad y la relación carbono/nitrógeno. La repetición de varios ciclos no permitirá ver y optimizar la reproducción de las características del compost. De esta manera, se pretende establecer pautas y recomendaciones para optimizar el proceso de compostaje y obtener un producto final de excelencia y que permita su reproducibilidad. Este trabajo está incluido en el proyecto RETOS NEOCOMP (ref. PID2020-113228RB-I00) financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033.

Para el desarrollo del estudio, se estableció el siguiente diseño experimental, dividido en 3 fases:

Fase 1: Estudio del sistema de compostaje in situ mediante visita a la planta de Sort.

Fase 2: Estudio de la evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje.

Fase 3: Caracterización inicial de los residuos a compostar durante dos ciclos de proceso.

Fase 4: Análisis de las características físico-químicas y químicas de los materiales a compostar a lo largo del proceso, así como del producto final obtenido, durante dos ciclos.

Fase 1: Estudio del sistema de compostaje in situ mediante visita a la planta de Sort

Durante las visitas a la planta de tratamiento de Sort se pudo estudiar el sistema de compostaje de silos, con unas dimensiones que alcanzan aproximadamente 15 metros de largo por 2,5 metros de ancho y 2,5 metros de altura. Estas estructuras están diseñadas específicamente para facilitar el proceso de descomposición de manera eficiente y efectiva.

Uno de los aspectos destacados de este sistema es la aireación por impulsión que se encuentra en la parte inferior de los silos. Esta técnica garantiza una óptima circulación de aire en el interior de la materia orgánica en descomposición, lo que acelera el proceso de compostaje y promueve la descomposición adecuada de los residuos.

Además, para asegurar que la humedad necesaria esté presente en el compostaje, se utiliza una manguera que rocía agua proveniente de la red sobre los silos. Para monitorear y regular la temperatura, se utiliza una sonda de temperatura. Si las temperaturas no alcanzan los niveles

deseados, se realiza un volteo manual con palas para asegurar una distribución uniforme del calor y estimular la actividad microbiana necesaria para el compostaje.

Durante el proceso de compostaje, se genera una cierta cantidad de rechazo que no es adecuada para su uso final. Para separar este rechazo, se emplea un trómel con una malla de 10 mm de tamaño, que actúa como una especie de filtro para separar los materiales no deseados del compostaje en proceso. Este rechazo se lleva a un vertedero apropiado, asegurando así una gestión adecuada de los residuos generados durante el proceso de compostaje.

Una vez que el compostaje alcanza una etapa madura y se considera apto para su uso, se traslada a una bodega designada. Esta bodega sirve como un espacio de almacenamiento temporal desde donde el compostaje será distribuido, controlado y dosificado de manera eficiente y precisa.

Fase 2: Estudio de la evolución de la temperatura durante el proceso de compostaje

Las condiciones del proceso relativas a humedad, temperatura y aireación son controladas por el personal de la planta de Sort. Para poder analizar la evolución de la temperatura y sus consecuencias el responsable de la planta proporcionó los datos de temperatura durante los dos ciclos evaluados.

Fase 3: Caracterización inicial de los residuos a compostar durante dos ciclos de proceso

Se pretende conocer la naturaleza de los residuos que van a intervenir en el proceso de co-compostaje, con el fin de establecer una estrategia de compostaje adecuada en función de la tipología de estos materiales. En este ensayo se han caracterizado 2 materiales distintos (Figura 3.1 y 3.2), en dos ciclos de compostaje diferentes:

1. Fracción orgánica de los residuos municipales (FORS): proviene de la comarca de Pallars Sobirà y su recogida se realiza puerta – puerta. La cantidad recogida es de aprox. 750 t/año.
2. Poda forestal y urbana: este material se consigue de zonas forestales del entorno de la planta y de zonas urbanas cercanas. La cantidad recogida es aprox. 500 t/año.



Figura 3.1. Fracción orgánica de los residuos municipales



Figura 3.2. Poda forestal y urbana.

Fase 4: Análisis de las características físico-químicas y químicas de los materiales a compostar a lo largo del proceso, así como del producto final obtenido, durante dos ciclos de tratamiento

En las muestras de los materiales iniciales se determinó:

- Densidad aparente
- Humedad
- pH
- Conductividad eléctrica
- Materia orgánica total (MO)
- Carbono orgánico total (Corg)
- Nitrógeno total (NT)
- Relación Corg/NT
- Sodio

- Macronutrientes, micronutrientes y metales pesados: P, K, Fe, Mn, Mo, Ca, Mg, S, Mn, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn, Cr

En las muestras de compost se estudió:

- Evolución de la materia orgánica y de su fracción sólida: materia orgánica total, carbono orgánico total, nitrógeno total, relación entre el carbono orgánico total y el nitrógeno total, contenido de fósforo, potasio y sodio.
- Calidad del compost: parámetros asociados a la madurez y estabilidad del compost (: índice de germinación, índices de humificación y test de autocalentamiento), así como los asociados a potenciales riesgos medioambientales (metales pesados y patógenos).

3.1.1. Características de los residuos utilizados

La fracción orgánica de residuos municipales de recogida selectiva (FORS) proviene de la comarca de Pallars Sobirà y su recogida se realiza puerta – puerta. La cantidad recogida es unas 750 t/año. El estructurante es poda forestal y urbana de la zona cercana a la planta. La cantidad recogida es de unos 500t/año.

En la Tabla 3.1. se detallan las características de la FORS que se encuentran en la planta de compostaje de Sort. Una de las principales características a tener en cuenta es el nivel de humedad. En el ciclo 1, se observa que la humedad se encontraba ligeramente por encima de los niveles recomendados para un proceso óptimo. En el ciclo 2, la humedad es aún más alta de lo recomendado. En ambos casos, es necesario agregar un material estructurante que absorba el exceso de humedad y permita que la FORS alcance las condiciones óptimas para un mejor proceso de compostaje.

Además, al agregar el material estructurante, es importante tener en cuenta la relación entre el Carbono Orgánico Total (COT) y el Nitrógeno Total (NT), ya que esto es crucial para el desarrollo de los microorganismos implicados en el compostaje. La relación óptima se sitúa dentro del rango de 25-35. Sin embargo, según la tabla, tanto en el ciclo 1 como en el ciclo 2, esta relación en la FORS se encuentra por debajo de 20, por lo que la adición de poda ayuda a compensar esta relación.

Tabla 3.1. Residuos utilizados en el proceso de compostaje realizado en la planta de compostaje descentralizado de Sort (Lérida).

<i>Tipo Residuo</i>	FORS	ESTRUCTURANTE	FORS	ESTRUCTURANTE
<i>Ciclo</i>	Ciclo 1		Ciclo 2	
<i>Clave</i>	174	175	1125	1126
<i>Humedad (%)</i>	61,8	46,0	74,6	23,4
<i>Densidad (kg/L)</i>	0,326	0,224	0,468	0,372
<i>pH</i>	5,6	6,9	5,3	7,2
<i>CE (dS/m)</i>	6,0	1,6	6,8	1,7
<i>MO (%)</i>	81,8	77,1	87,7	54,1
<i>N (%)</i>	2,4	1,0	3,5	1,1
<i>COT (%)</i>	44,9	42,2	46,4	29,9
<i>COT/NT</i>	18,7	42,3	13,2	28,2
<i>Na (g/kg)</i>	4,6	0,4	4,8	0,6
<i>K (g/kg)</i>	15,3	8,0	11,8	7,9
<i>P (g/kg)</i>	8,7	1,5	7,3	1,4
<i>Ca (g/100g)</i>	3,8	2,9	2,0	3,1
<i>Mg (g/100g)</i>	0,2	0,3	0,1	0,4
<i>S (g/100g)</i>	0,2	0,2	0,2	0,2
<i>Fe (mg/Kg)</i>	788	5746	271	14275
<i>Mn (mg/Kg)</i>	74	173	30	249
<i>Mo (mg/Kg)</i>	1,6	2,5	1,3	3,2
<i>Cd (mg/Kg)</i>	0,1	0,3	0,1	0,7
<i>Co (mg/Kg)</i>	0,7	3,2	0,3	9,7
<i>Cr (mg/Kg)</i>	37,1	85,6	8,9	128
<i>Cu (mg/Kg)</i>	14,2	16,2	8,4	22,6
<i>Ni (mg/Kg)</i>	9,4	20,8	2,7	36,5
<i>Pb (mg/Kg)</i>	2,0	10,8	1,3	22,8
<i>Zn (mg/Kg)</i>	38,0	60,2	40,0	87,5

FORS: fracción orgánica de residuos municipales de recogida selectiva. CE: conductividad eléctrica. MO: materia orgánica. COT: carbono orgánico total. NT: nitrógeno total.

Es importante tener en cuenta la cantidad de materia orgánica presente en la mezcla. Esto es un factor importante para considerar en el compostaje. La materia orgánica es la principal fuente de energía y alimentación para los microorganismos involucrados en el proceso.

Además de la cantidad de materia orgánica, es relevante analizar los nutrientes y macronutrientes presentes en la mezcla. Estos nutrientes son fundamentales para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos descomponedores. Los macronutrientes, como el nitrógeno, fósforo y potasio, son especialmente cruciales en el compostaje, ya que desempeñan un papel clave en la síntesis de proteínas, el metabolismo celular y la proliferación de los microorganismos.

Por lo tanto, es esencial tener en cuenta tanto la cantidad de materia orgánica como la disponibilidad de nutrientes y macronutrientes en la mezcla de compostaje. Esto permitirá brindar las condiciones óptimas para el desarrollo y actividad de los microorganismos, favoreciendo así un proceso de compostaje eficiente y la obtención de un compost de alta calidad.

Por último, pero no menos importante, es necesario mencionar la presencia de metales pesados, como el plomo, cobre, zinc, entre otros, en la mezcla. Estos metales, cuando se encuentran en grandes cantidades, pueden ocasionar daños o incluso inhibir el proceso de compostaje.

La presencia excesiva de metales pesados puede ser perjudicial para los microorganismos y afectar negativamente su actividad metabólica. Además, estos metales pueden persistir en el compost final, lo que podría limitar su uso en aplicaciones agrícolas o de jardinería. Por lo tanto, es esencial monitorear y controlar los niveles de metales pesados en la mezcla de compostaje. De esta manera, se garantiza un proceso de compostaje más seguro y se obtiene un compost de mayor calidad, libre de concentraciones perjudiciales de metales pesados.

Como se puede ver en la Tabla 3.1, el FORS es un material poco estabilizado con una humedad un poco alta para el proceso de compostaje por lo cual es necesario un estructurante como la poda forestal para poder sopesar esta humedad y llevarla a una humedad más óptima para que los microorganismos puedan tener una mayor eficiencia. Presentaba un pH ligeramente ácido en ambos ciclos, así como mayor contenido en sales, materia orgánica y nutrientes que el material usado como estructurante. Cabe destacar el bajo contenido en metales pesados en todos los residuos utilizados a pesar de tratarse de residuos municipales, lo cual puede ser principalmente debido al tipo de recogida (recogida selectiva), que permite una mayor calidad en los residuos iniciales.

En la tabla 3.2 se muestra la parte microbiológica presente en los residuos destinados al proceso de compostaje. Como es habitual en residuos orgánicos sin estabilizar, los residuos iniciales del proceso mostraron diversos microorganismos patógenos con potencial de transmitir enfermedades a los seres humanos. Sin embargo, cabe destacar la ausencia de Salmonella en todos los residuos iniciales, así como el hecho de un adecuado desarrollo del proceso de compostaje implica su eliminación debido a las altas temperaturas alcanzadas durante el compostaje. Estos microorganismos no presentan una buena resistencia al incremento de las temperaturas y tienden a ser eliminados cuando comienzan la fase termófila.

Tabla 3.2. características microbiológicas de los residuos utilizados en el proceso de compostaje realizado en la planta de compostaje descentralizado de Sort (Lérida).

<i>Tipo Residuo</i>	FORS	ESTRUCTURANTE	FORS	ESTRUCTURANTE
<i>LISTERIA MONOCYTOGENES</i>	Detectado en /25g	Detectado en /25g	No detectado en /25g	Detectado en /25g
<i>SALMONELLA spp.</i>	No detectado en /25 g	No detectado en /25 g	No detectado en /25 g	No detectado en /25 g
<i>CLOSTRIDIUM PERFRINGENS (UFC/g)</i>	$1,5 \cdot 10^2$	$1,1 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^3$	<10
<i>COLIFORMES FECALES (NMP/g)</i>	$2,4 \cdot 10^6$	$4,3 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^5$	$4,3 \cdot 10^4$
<i>COLIFORMES TOTALES (NMP/g)</i>	$4,6 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^7$	$4,3 \cdot 10^5$
<i>ENTEROCOCOS INTESTINALES (UFC/g)</i>	$4,1 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^8$

FORS: fracción orgánica de residuos municipales de recogida selectiva.

Durante el proceso de compostaje, las altas temperaturas que se generan en la fase termófila, generalmente por encima de los 45°C, ayudan a eliminar los microorganismos patógenos presentes en los residuos. Las altas temperaturas son un resultado de la actividad microbiana y la descomposición de la materia orgánica, lo que favorece la desactivación de los patógenos y su eventual eliminación, sin embargo, algunos microorganismos necesitan temperaturas mayores a 55 °C y un tiempo de exposición mayor para poder ser eliminados (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Temperaturas necesarias para la eliminación de algunos patógenos. Fuente: FAO (2013).

Microorganismos	Temperatura (°C)	Tiempo de exposición
<i>Salmonella spp</i>	55	1 hora
	65	15-20 minutos
<i>Escherichia coli</i>	55	1 hora
	65	15 -20 minutos
<i>Brucella abortus</i>	55	1 hora
	62	3 minutos
<i>Parvovirus bovino</i>	55	1 hora
<i>Huevos de ascaris lumbricoides</i>	55	3 días

Es importante destacar que el proceso de compostaje debe ser adecuadamente monitoreado y controlado para garantizar que las temperaturas necesarias se alcancen y mantengan durante el tiempo suficiente para eliminar los microorganismos patógenos. Además, se deben seguir buenas prácticas de compostaje, como mantener una relación carbono/nitrógeno equilibrado, proporcionar suficiente aireación y humedad, y utilizar una mezcla adecuada de materiales orgánicos, para optimizar el proceso y garantizar la seguridad del compost resultante.

3.1.2. Descripción de la planta objeto de estudio

La planta de tratamiento de residuos de Sort se encuentra integrada en las instalaciones del Punto Limpio (Deixalleria) y la Planta de Transferencia, la cual se encuentra ubicada en la Ctra. d'Enviny km 0,5. Esta obra forma parte del proyecto europeo SCOW (Selective Collection of the Organic Waste in tourist areas and valorisation in small-scale composting plants), financiado por el programa ENPI CBC MED, el cual es liderado por la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. Además, ha contado con el respaldo del Consell Comarcal del Pallars Sobirà y la Agencia de Residuos de Catalunya (Residus, 2021). En la figura 3.3. muestra la ubicación y la distribución de la planta y en la figura 3.4 se muestran detalles del funcionamiento de la planta en el interior. En la planta de tratamiento de Sort, se utiliza un enfoque específico que se detalla a continuación. En primer lugar, se realiza la mezcla de ingredientes en un sistema llamado "Unifeed", donde se agrega una palada de material fresco con tractor, seguida de dos paladas de poda. A veces, se incorpora una palada de poda y otra de recirculado, que es el rechazo generado al tamizar el compost maduro. Este recirculado se utiliza durante tres ciclos y luego se envía a incineración o vertedero. Las pilas se construyen en silos de un tamaño total de 15 metros, con aireación por impulsión en la parte inferior y se riegan con agua de la red mediante

mangueras y a demanda. Próximamente, se instalará un sistema de riego por aspersión en el techo. Durante la formación de las pilas, se controla la temperatura y se considera que el proceso de descomposición es adecuado cuando se superan los 55°C durante tres días consecutivos. Si no se alcanza esta temperatura, se realiza un volteo con una pala. La duración aproximada de este proceso es de 8 a 9 semanas.

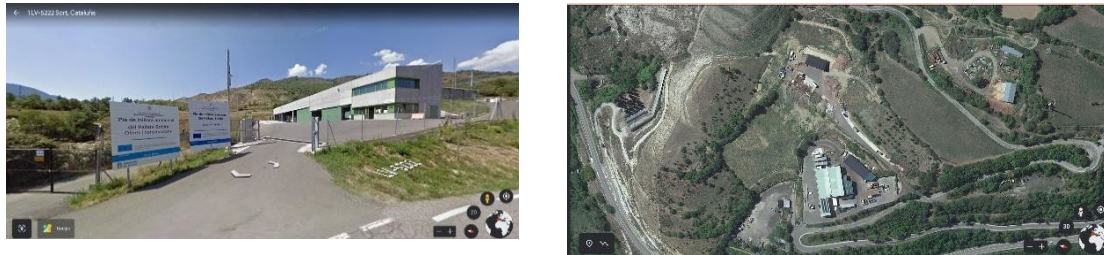


Figura 3.3. Ubicación de la planta de Sort. Fuente: Google Earth.

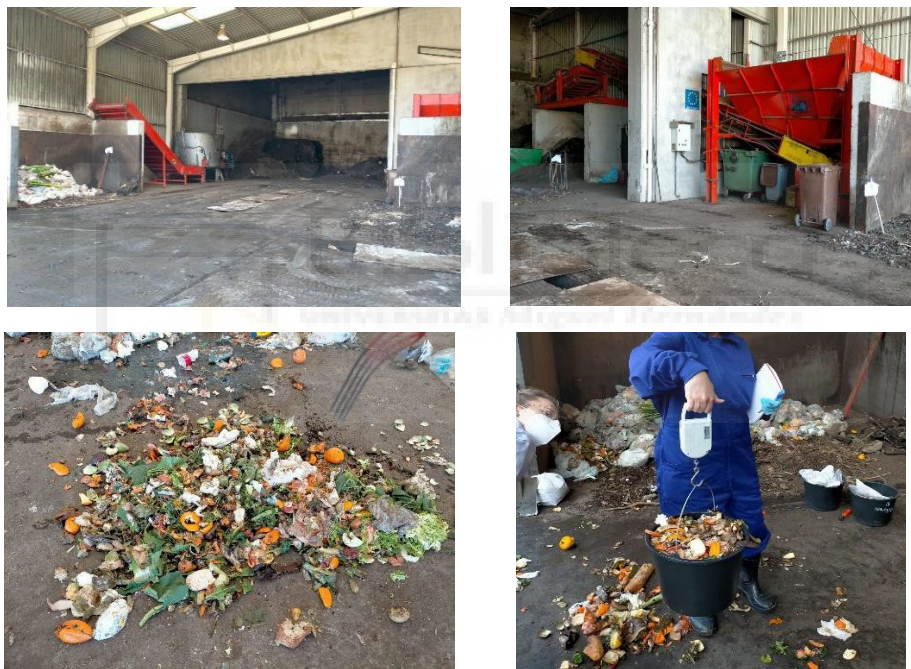


Figura 3.4. Interior de la Planta de Sort.

Una vez que se cumple este parámetro, el material se lleva a un proceso de maduración en otros seis silos, durante un período de tiempo necesario, mínimo dos meses. Durante este período, se humedece, se realiza el volteo y se controla la temperatura. Posteriormente, se tamiza con un trómel con una malla de 10 mm. El material rechazado se utiliza como recirculado en la mezcla inicial. El compost resultante se traslada a una zona de almacenamiento superior (bodega) durante un período de entre 2 y 6 meses. Cuando la temperatura desciende por debajo de los 40°C, se considera que el compost está maduro y se entrega a los vecinos, controlando su uso y

dosificación. La planta de tratamiento de Sort consiguió un rendimiento de 636 toneladas de FORS (residuos sólidos orgánicos fermentables) y 70 toneladas de compost en el año 2021.

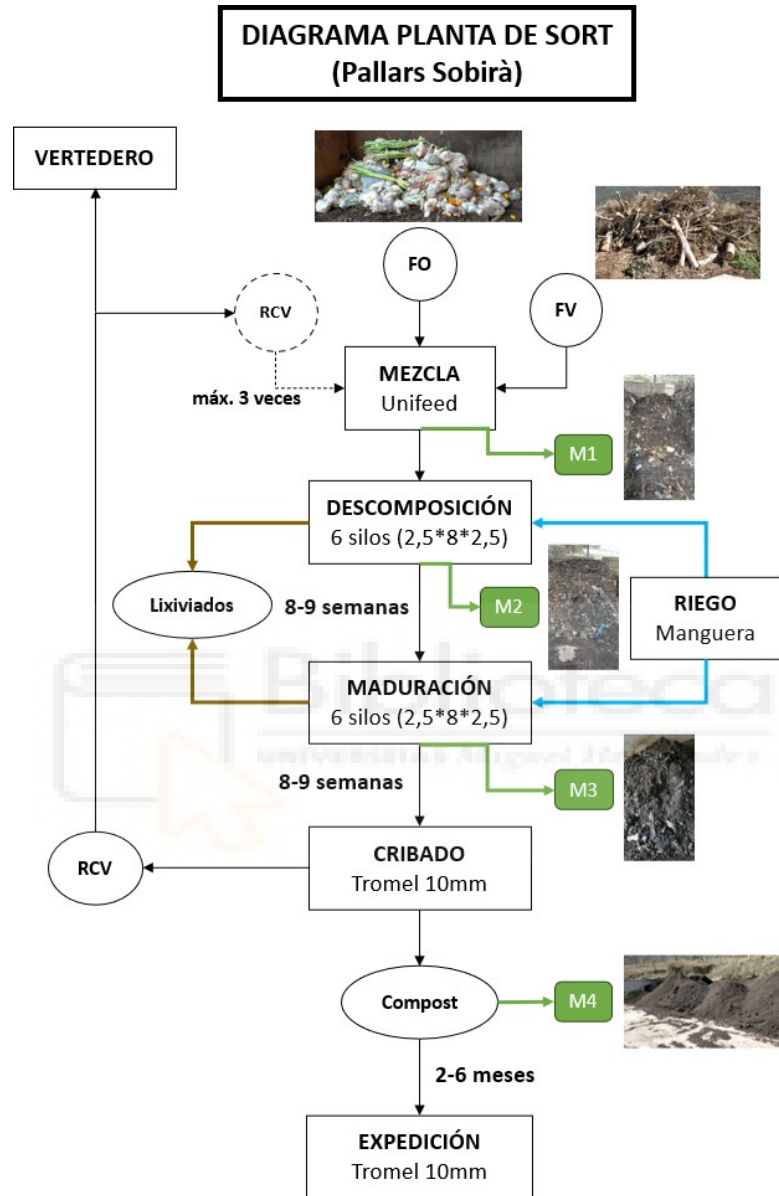


Figura 3.5. Esquema de funcionamiento en la planta de SORT para la obtención de compost a partir de la fracción orgánica de los residuos urbanos. RCV: Rechazo; FO: Fracción Orgánica; FV: Fracción Vegetal.

3.2. Desarrollo experimental

Durante las dos visitas que se realizaron a la planta de tratamiento de Sort, se realizó el muestreo de los materiales iniciales del proceso (FORS y poda) y también se tomaron muestras del compost en diferentes fases del proceso. Para cada una de las muestras se realizó in situ la determinación de la densidad.

Las muestras se obtuvieron a partir de un número representativo de submuestras tomadas en diferentes puntos de las pilas, considerando todo el perfil (desde la parte superior hasta la parte inferior de las pilas) y a tres profundidades diferentes de modo que la muestra final tomada fuese representativa de la totalidad del material en el momento de la recogida. El número de submuestras a tomar depende del peso de la pila (Reglamento (CE) nº 2003/2003):

- Pilas con peso < 2,5 toneladas, se toman 7 submuestras.
- Pilas con peso > 2,5 toneladas y < 80 toneladas se toman $(20 \times \text{toneladas de la pila})^{1/2}$

En cada una de las ubicaciones de cada fase se tomaron 7 submuestras que se homogeneizaron mediante el método de cuarteo y se tomó una muestra final. Previamente a su análisis las muestras de compost se secaron con estufa de aire a 60°C y se molieron a 0,5 mm para su análisis.

En la Tabla 3.4. se muestran las fechas de muestreo y el tipo de muestra recogida para su análisis y evaluación.

Tabla 3.4. Fechas de muestreo y tipo de muestra recogida.

Ciclo	Fecha muestreo	Muestras tomadas
1	3/3/2022	FORS Estructurante M1: inicio de proceso M2: descomposición anaerobia M3: descomposición enfriamiento M4: Maduración
2	14/02/2023	FORS Estructurante M1: inicio de proceso M2: descomposición anaerobia M3: descomposición enfriamiento M4: Maduración

En los materiales iniciales se analizó la densidad aparente, la humedad, el pH, la conductividad eléctrica, la materia orgánica, el carbono orgánico total, el nitrógeno total, la relación Corg/NT, y el contenido de Na, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn y Mo y metales pesados como Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd y Pb. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

En las muestras de compostaje se determinaron los parámetros anteriores y además, el carbono extraíble, el carbono de ácidos húmicos y carbono de ácidos fúlvicos y el índice de germinación (IG). Todos los análisis se realizaron por triplicado.



Figura 3. 6 Residuos en la planta de Sort.

3.3. Métodos analíticos

A continuación, se describen los métodos utilizados para determinar las características del compost:

- **Preparación de la muestra:** Se fraccionaron las muestras obtenidas en dos submuestras: a) una submuestra se utilizó en fresco para la determinación de microorganismos patógenos; b) la otra submuestra se secaba a 60 °C, se molía en un molino con una malla de 0,5 mm y se volvía a secar a 105 °C. Posteriormente, se almacenaba en un desecador de vacío.

- **Humedad original:** Se determinó el porcentaje de agua con relación a la masa de la muestra mediante la diferencia de pesaje entre el material húmedo y seco a 105 °C.
- **Pérdida de peso por calcinación (cenizas):** Se utilizó la pérdida de peso por calcinación a 430 °C como medida de la materia orgánica. Este valor se determinó según el método de Navarro et al. (1993) y se expresó como porcentaje de la muestra seca.
- **Medida del pH:** Se midió el pH en una suspensión acuosa obtenida mediante agitación mecánica durante 2 horas en una proporción de 1:10 (sólido/líquido) utilizando un pH-metro.
- **Conductividad eléctrica:** Se determinó la conductividad eléctrica en la suspensión acuosa previamente centrifugada y filtrada utilizando un conductímetro.
- **Carbono orgánico total y nitrógeno total:** Se realizó la quema de la muestra a 1020 °C en un analizador elemental para determinar el carbono orgánico total y el nitrógeno total (Navarro et al., 1991).
- **Carbono extraíble:** Mediante la extracción de la muestra con hidróxido sódico y la determinación del carbono extraído en un analizador elemental, se determinó el carbono extraíble (Sánchez-Monedero et al., 1996).
- **Fraccionamiento y determinación del C ácidos húmicos y ácidos fúlvicos:** Se llevó a cabo la precipitación de los ácidos húmicos a pH 2 en el extracto de carbono extraíble y posteriormente se determinó el carbono extraído mediante un analizador elemental (Sánchez-Monedero et al., 1996).
- **Determinación de elementos totales:** mediante espectrometría de emisión por plasma (ICP) tras digestión ácida de las muestras, con ácido nítrico contrato y agua oxigenada al 33%, en microondas. La técnica de ICP está basada en la medición de la emisión atómica por medio de una técnica de espectroscopia óptica. Las muestras se nebulizan y el aerosol formado se transporta hasta la antorcha de plasma en donde tiene lugar la excitación electrónica. Un plasma de radiofrecuencia acoplado inductivamente (ICP) genera los correspondientes espectros de líneas de emisión atómicas. Los haces de luz son dispersados por un espectrómetro de red de difracción y los detectores se encargan de medir las intensidades de las líneas. Las señales originadas en los detectores se procesan y controlan mediante un sistema informático.
- **Mineralización de la muestra:** Se realizó la digestión nítrico-perclórica de las muestras según el método recomendado por Bustamante et al. (2008).

- **Fósforo total:** Se determinó el fósforo total mediante la medida espectrofotométrica de la intensidad de coloración amarilla producida por el complejo fosfovanadato molibdato amónico, utilizando una fracción del extracto de mineralización (Kitson y Mellon, 1944).
- **Índice de germinación (IG):** Se determinó el índice de germinación utilizando semillas de *Lepidium sativum* L. según el método descrito por Zucconi et al. (1981).
- **Capacidad de cambio catiónico (CCC):** determinó la capacidad de cambio catiónico mediante la saturación del complejo de cambio con bario y la determinación gravimétrica del catión retenido por diferencia con un blanco (Lax et al., 1986).
- **Grado de estabilidad térmica del compost (test autocalentamiento):** El test Dewar (TMECC 0.5-0.8D) mide el incremento de temperatura producido por la actividad microbiana de una muestra en condiciones de laboratorio dentro de un recipiente aislado térmicamente, tomando como referencia la temperatura ambiente. Este método permite determinar el grado de madurez de un compost (Brinton y col., 1995).
- **Determinaciones microbiológicas:** las determinaciones de microorganismos patógenos (*Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*, coliformes totales y fecales (*Escherichia coli*), enterococos intestinales (*Streptococcus* fecales) y *Clostridium perfringens*) se realizaron en un laboratorio acreditado para este tipo de análisis (laboratorios KUDAM S.L.).

3.4. Métodos estadísticos

El análisis estadístico aplicado a los datos obtenidos consistió, por un lado, en un ANOVA de una sola vía para evaluar si existían diferencias significativas para cada fase del compostaje entre cada uno de los ciclos estudiados. Por otro lado, la evolución a lo largo del proceso de compostaje de los parámetros estudiados se evaluó mediante un ANOVA y posterior contraste post-hoc utilizando la técnica de la Diferencia Mínima Significativa (DMS o LSD en inglés). Estos análisis se realizaron con el sistema operativo IBM SPSS Statistics v. 29.0

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evolución de factores relativos al propio proceso de compostaje

La temperatura es un factor fundamental en el proceso de compostaje, desempeñando un papel significativo en la evaluación de su estado y eficacia. Permite discernir en qué fase específica se encuentra dicho proceso, proporcionando indicaciones esenciales sobre la actividad de los microorganismos implicados en la descomposición de la materia orgánica (Stentiford., 1996). Cuando monitoreamos la temperatura en un montón de compost, podemos obtener valiosos datos sobre la continuidad de la actividad microbiana. Una temperatura elevada en el compost generalmente sugiere que los microorganismos aún están en plena actividad, descomponiendo los materiales orgánicos. Por otro lado, una temperatura que se mantiene constante o disminuye puede indicar que la fase activa del compostaje ha concluido, y es hora de considerar la fase de maduración.

A continuación, se ha representado visualmente la evolución de los perfiles térmicos a lo largo de diversos ciclos en las siguientes gráficas. Enfocándonos específicamente en la figura 4.1, esta nos brinda información detallada sobre el comportamiento térmico del ciclo 1.

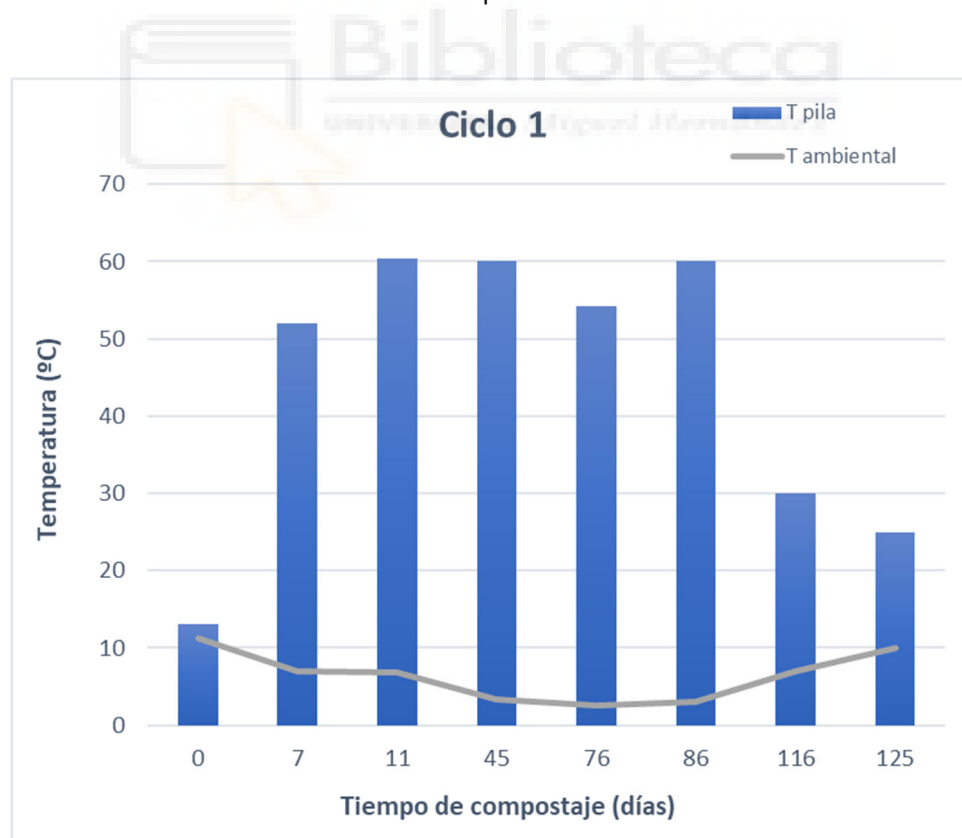


Figura 4.1. Evolución de la temperatura durante el ciclo 1 del compostaje.

Dentro de esta gráfica, podemos observar cómo se desarrollan las temperaturas a lo largo del tiempo. Los días 11 al 45 se destacan como el período en el que se alcanzan las temperaturas más elevadas por encima de los 55°C, lo que indica que se encuentra en la fase termófila. Este intervalo muestra una marcada tendencia al aumento térmico, indicando una fase en la que las condiciones caloríficas prevalecen. Adicionalmente, es interesante notar que el día 86 también presenta una alta temperatura en este ciclo. Esto sugiere la existencia de otro punto significativo en el ciclo donde las condiciones térmicas son notables. En contraste, se registra la temperatura más baja al comienzo del ciclo, donde esta se sitúa apenas por encima de los 10°C, ligeramente cercana a la temperatura ambiente.

En el ciclo 2, se evidencia en la figura 4.2 una marcada fluctuación en los rangos de temperatura a lo largo de su duración. Específicamente, el día 10 se destaca como un momento crucial en este ciclo, ya que exhibe un rango de temperatura excepcionalmente amplio, con valores que superan los 60°C. Este fenómeno puede atribuirse a una intensa actividad biológica o a reacciones químicas relevantes en ese período. A partir de los 60 °C aparecen bacterias que pueden producir esporas y enterobacterias, las cuales se encargan de descomponer las ceras, hemicelulosas y otros compuestos de C complejos (ONUAA, 2013)

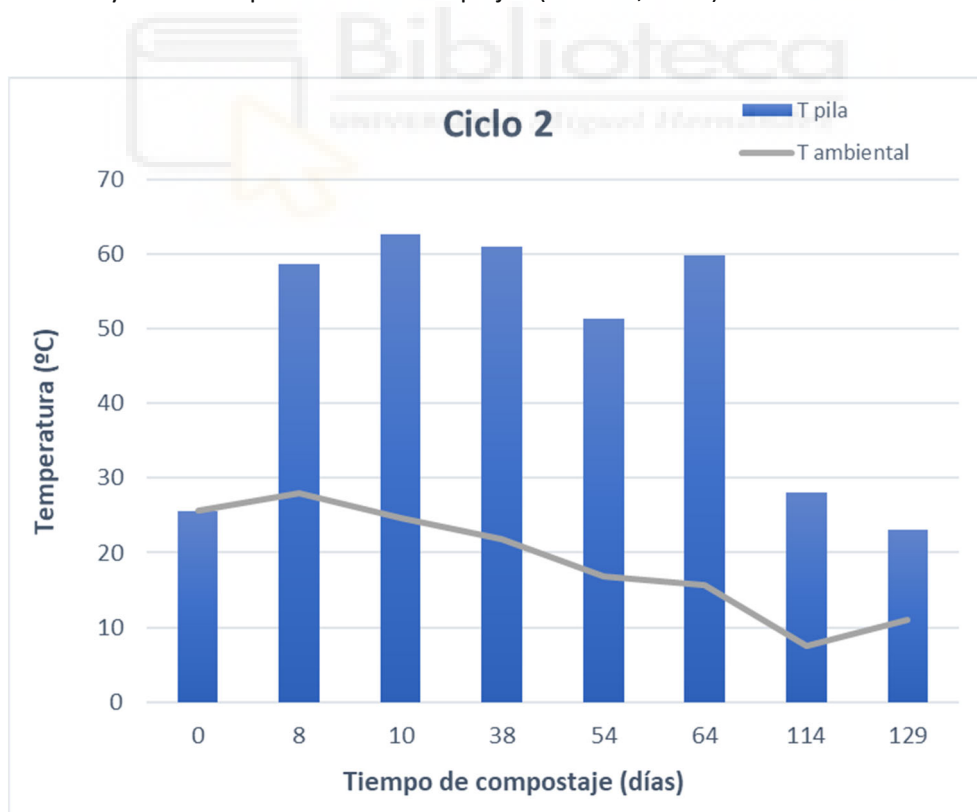


Figura 4.2. Evolución de la temperatura durante el ciclo 2 del compostaje.

Por otro lado, contrastando con esta alta variabilidad, se encuentra el día 129, marcando el final del ciclo. Aquí, se observa una notable disminución en el rango de temperatura, indicando una etapa de estabilización en el proceso.

Tal como se ha observado en ambos ciclos, la temperatura ha alcanzado valores superiores a 55°C durante más de dos semanas, mostrando un adecuado desarrollo de la fase termófila, y asegurando de esta forma la higienización de las pilas (Bustamante, 2007), tal como se podrá confirmar en apartados posteriores al hacer el análisis microbiológico de los compost finales obtenidos. Por otra parte, no se han observado grandes diferencias entre los perfiles térmicos en los dos ciclos de proceso, mostrando una adecuada reproducibilidad a nivel térmico del proceso.

4.1.2 Densidad aparente

En la figura 4.3, se presenta la evolución de la densidad durante las distintas fases del proceso de compostaje en los ciclos 1 y 2. Este análisis comparativo permite observar cómo varía la densidad en cada etapa y cómo se comporta en ambos ciclos. Es importante señalar que la densidad es un indicador clave del progreso del compostaje, ya que está relacionada con la descomposición de la materia orgánica y la formación de los nutrientes esenciales para las plantas (Moreno-Casco y Moral, 2008). Por lo tanto, un seguimiento preciso de la densidad en cada etapa es crucial para asegurar la calidad y eficiencia del proceso.

La identificación de los puntos de mayor y menor densidad aparente en los ciclos 1 y 2 durante el proceso de compostaje es de gran relevancia para comprender la dinámica de este proceso y tomar decisiones para su mejora. En el ciclo 1 del proceso de compostaje (Fig. 4.4), se registró la mayor densidad aparente durante la fase termófila, caracterizada por una intensa actividad microbiana y aumento significativo de la temperatura. La menor densidad aparente se observó en la fase bio-oxidativa, donde los materiales orgánicos menos degradables son sometidos a la acción de microorganismos.

Por otro lado, en el ciclo 2 (Fig. 4.4), la mayor densidad aparente se encontró en la fase de maduración, donde los materiales han experimentado una descomposición avanzada. La menor densidad aparente en el ciclo 2 se presenta en la fase termófila. Estos hallazgos son cruciales para optimizar el compostaje, asegurando un producto final de alta calidad y sostenible, y subrayan la importancia de un monitoreo y control rigurosos en cada etapa del proceso.

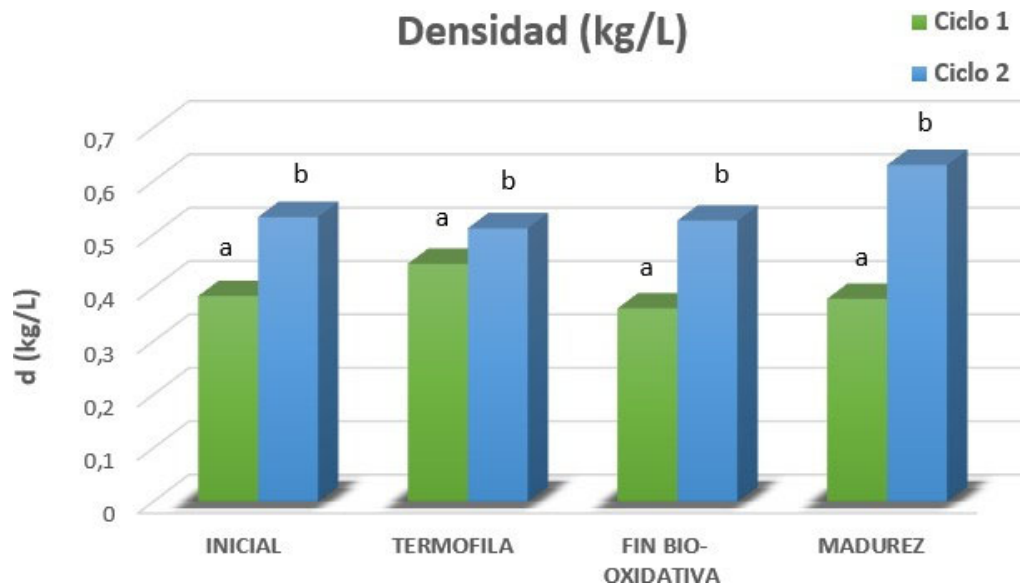


Figura 4.3. Evolución de la densidad en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$). DMS ciclo 1 = 0,035; DMS ciclo 2: = 0,042 (DMS: diferencia mínima significativa).

4.2. Evolución de los parámetros físico-químicos

4.2.1. pH

La variación del pH a lo largo del compostaje se ha considerado también como un parámetro indicativo de la evolución del proceso. En general, el pH disminuye al inicio del proceso por la liberación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, procedentes de la descomposición de las fracciones más lábiles de la materia orgánica. Posteriormente el pH aumenta, debido a la degradación de compuestos con grupos carboxílicos y fenólicos, de carácter ácido, y la mineralización de proteínas, aminoácidos y péptidos a amoníaco (Iglesias-Jiménez y Pérez-García, 1991), el cual se protonará durante el proceso de amonificación para formar amonio, que contribuye a un aumento del pH. Por último, el pH disminuye, ya que los procesos de degradación no son tan intensos y se produce la nitrificación del amonio originado en la etapa anterior, que conlleva la liberación de iones H^+ (Gagnon y col., 1993)

Adicionalmente, el pH puede indicar indirectamente la calidad de la aireación en el compostaje. Cuando la aireación es insuficiente, se pueden liberar ácidos, lo que disminuye el pH. Esto sugiere que los microorganismos podrían estar operando en condiciones anaeróbicas, lo que no es ideal para un proceso de compostaje efectivo (Stentiford y col., 1985).

En la figura 4.4, se presenta la evolución del pH durante las distintas fases del proceso de compostaje en los ciclos 1 y 2. Este análisis comparativo permite observar cómo varía el pH en cada etapa y cómo se comporta en ambos ciclos.

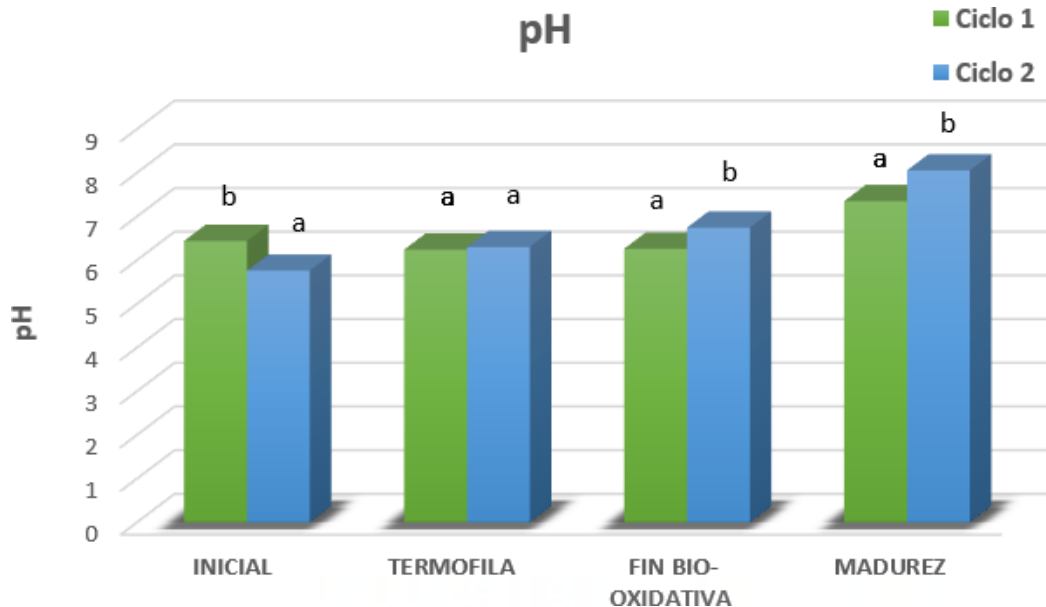


Figura 4.4. Evolución del pH en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$).

DMS ciclo 1 = 0,2; DMS ciclo 2: = 0,17 (DMS: diferencia mínima significativa)

En el ciclo 1 del compostaje, se observó un pH neutro, con valores entre 6 y 7,5, durante todas las etapas del proceso. Por otro lado, en el ciclo 2, también se mantiene un pH neutro, pero en la fase inicial, el pH es ligeramente ácido, con un valor de 5,8. Estos valores estuvieron dentro o cercanos al intervalo de valores de pH adecuado ($\text{pH}=6-9$) para el desarrollo de las bacterias y hongos que degradan la materia orgánica durante el proceso de compostaje (Moreno y Mormeneo, 2008).

A medida que avanzó el ciclo 2 y se alcanzaba la fase final de madurez, el pH se volvió básico y neutro, con un valor de 8,1. Estos resultados muestran que ambos ciclos mantienen un pH adecuado para el compostaje, pero el ciclo 2 presenta variaciones en los valores durante sus distintas etapas. El control preciso del pH es esencial para promover una actividad microbiana óptima y una descomposición eficiente de la materia orgánica, asegurando así la producción de un compost de alta calidad para su uso en la agricultura y la jardinería. Al final del proceso en

ambos ciclos, el pH de los compost finales se situó dentro del rango adecuado para su uso agrícola (6,0-8,5) (Hogg y col., 2002).

4.2.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica se origina principalmente debido a la concentración de sales y la presencia de iones de amonio o nitrato. En términos generales, este parámetro tiende a aumentar a lo largo del proceso de compostaje, especialmente durante la etapa de mineralización de la materia orgánica (Bustamante, 2007).

En la figura 4.5, se presenta la evolución de la conductividad eléctrica durante las distintas fases del proceso de compostaje en los ciclos 1 y 2. Este análisis comparativo permite observar cómo varía la conductividad eléctrica en cada etapa y cómo se comporta en ambos ciclos.

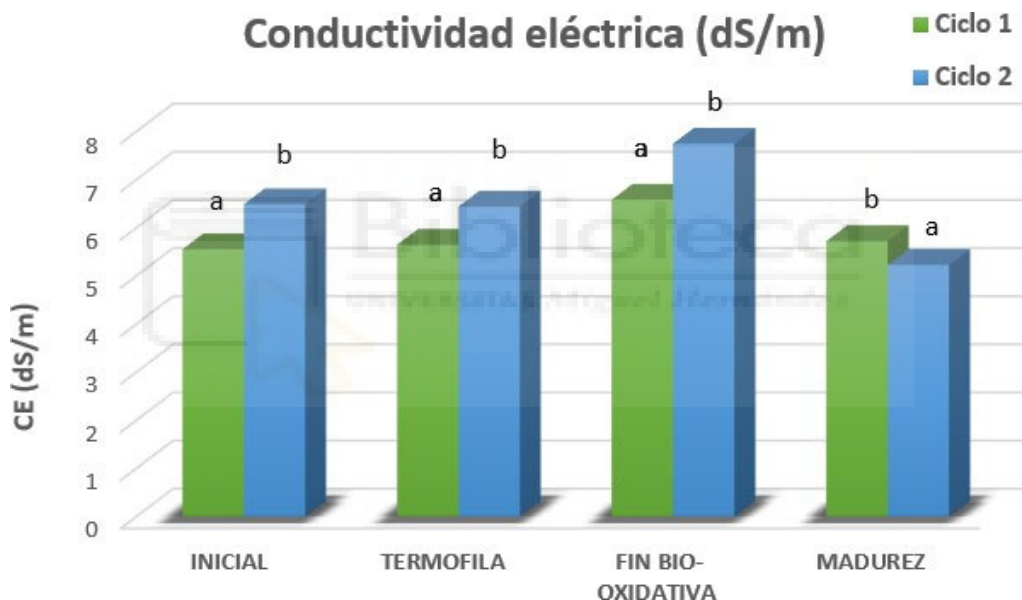


Figura 4.5. Evolución de la conductividad eléctrica en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$). DMS ciclo 1 = 0,4; DMS ciclo 2: = 0,6 (DMS: diferencia mínima significativa)

La conductividad eléctrica en el compostaje está influenciada por la naturaleza y composición del material utilizado, así como por la presencia de sales, iones amonio o nitrato. Durante el ciclo 1 y el ciclo 2 del proceso de compostaje, se han registrado valores de CE que se encuentran por encima de 5,5 dS/m y por debajo de 7,8 dS/m.

En concreto, en el ciclo 1 se ha observado que el valor más bajo de conductividad eléctrica es de 5,6 dS/m, mientras que en el ciclo 2, el valor más alto alcanzaba 7,7 dS/m. Estos resultados

indican que la conductividad eléctrica es mayor en el ciclo 2 en comparación con el ciclo 1, lo que podría atribuirse a diferencias en la composición de los materiales utilizados en cada ciclo o a variaciones en el proceso de compostaje. Meseguer (2016) también observó en pilas de compostaje elaboradas con lodos de depuradora de aguas urbanas y residuos de palmera una evolución similar en la conductividad eléctrica, con un descenso en los valores de este parámetro al final del proceso, posiblemente debido a potenciales lavados de sales con eventos de lluvia al estar las pilas al aire libre durante la etapa de madurez.

Es importante destacar que la conductividad eléctrica es un indicador clave para evaluar la calidad del compost producido y su idoneidad para su uso en la agricultura o jardinería. Un rango adecuado de este asegura una adecuada disponibilidad de nutrientes para las plantas y evita posibles problemas de salinidad que podrían afectar el crecimiento y desarrollo de las especies cultivadas. Según Lasaridi y col. (2006), el valor de conductividad eléctrica que un compost debe tener para no provocar efectos adversos no ha de superar los 3 dS/m. En estos compost se superaba dicho valor límite. Sin embargo, compost con valores más altos de conductividad eléctrica podrían ser utilizados mediante mezclas con otros materiales y / o lavando el compost con agua de riego en las primeras etapas del proceso para reducir dicha salinidad (Cáceres y col., 2015).

4.3. Evolución de la materia orgánica y de su fracción sólida

4.3.1. Materia orgánica total

La materia orgánica desempeña un papel central en el proceso de compostaje, siendo el principal sustrato que se somete a transformación. A medida que avanza el proceso de compostaje, esta materia orgánica es degradada y reestructurada por medio de un conjunto de reacciones bioquímicas, siendo la mineralización una de las más destacadas. En este proceso, los microorganismos descomponen los componentes orgánicos, como los carbohidratos, proteínas y lípidos, liberando nutrientes esenciales y generando calor en el proceso lo que da lugar al proceso obteniendo al final un compost.

En la figura 4.6, se presenta la evolución de la materia orgánica durante las distintas fases del proceso de compostaje en los ciclos 1 y 2. Este análisis comparativo permite observar cómo varía la fracción orgánica en cada etapa y cómo se comporta en ambos ciclos.

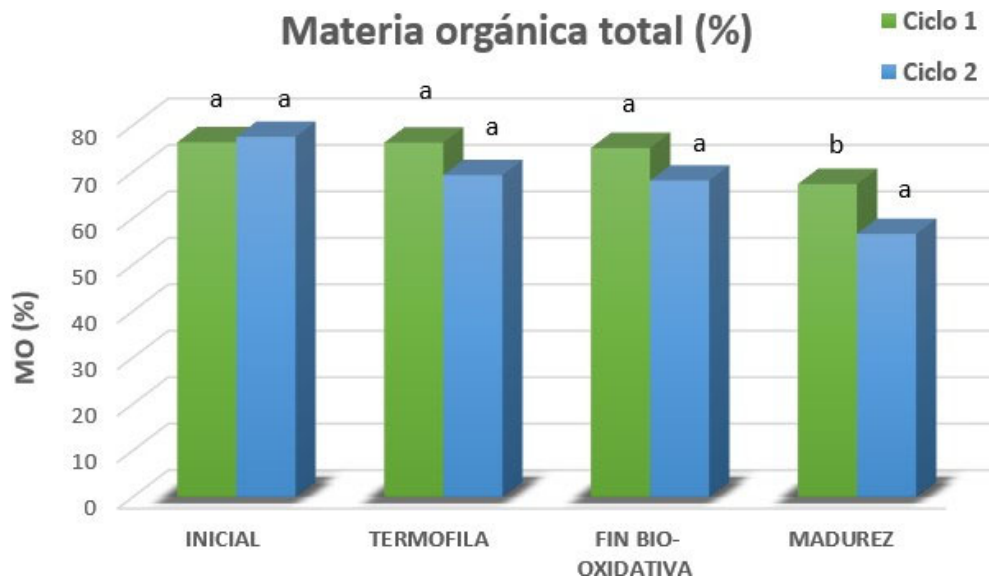


Figura 4.6. Evolución de la materia orgánica total en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$). DMS ciclo 1 = 4,9; DMS ciclo 2: = 11,7 (DMS: diferencia mínima significativa).

La materia orgánica es un factor fundamental para determinar la calidad agronómica del compost, por lo que es sumamente beneficioso mantenerla en niveles óptimos durante el proceso. La figura 4.6 muestra que tanto en el ciclo 1 como en el ciclo 2, se mantuvo un nivel de materia orgánica superior al 50%. No obstante, es importante destacar que en el ciclo 2, específicamente durante la fase de maduración, se observó un ligero descenso en el porcentaje de materia orgánica, llegando a un valor del 56.6%. Sin embargo, ambos ciclos se encuentran en rangos óptimos en el proceso.

El mayor descenso de MO se observó durante la etapa termófila, especialmente en el ciclo 2, debido a la máxima actividad microbiana asociada a esta etapa, donde se produce la máxima degradación. Los valores de materia orgánica en los compost finales son altos, con valores superiores al 40%, comparables a los alcanzados en plantas de compostaje industriales en España (Huerta-Pujol y col, 2011) y en compost de restos de poda urbana (López y col., 2014), así como superiores al mínimo establecido en la legislación para compost ($MO \geq 35\%$) (RD 506/2013).

Es esencial tener en cuenta estos datos para asegurar que el compost mantenga su calidad y proporcione los beneficios deseados en el ámbito agrícola. Al mantener un adecuado nivel de materia orgánica a lo largo del proceso, se asegura una mejor fertilidad del suelo y, por ende,

un mejor rendimiento de los cultivos. Por tanto, es relevante tomar las medidas necesarias para mantener un equilibrio óptimo de materia orgánica y garantizar así un compost de alta calidad.

4.3.2. Carbono orgánico total

En la figura 4.7, se presenta la evolución del carbono orgánico total durante las distintas fases del proceso de compostaje en los ciclos 1 y 2. Este análisis comparativo permite observar cómo varía el pH en cada etapa y cómo se comporta en ambos ciclos.

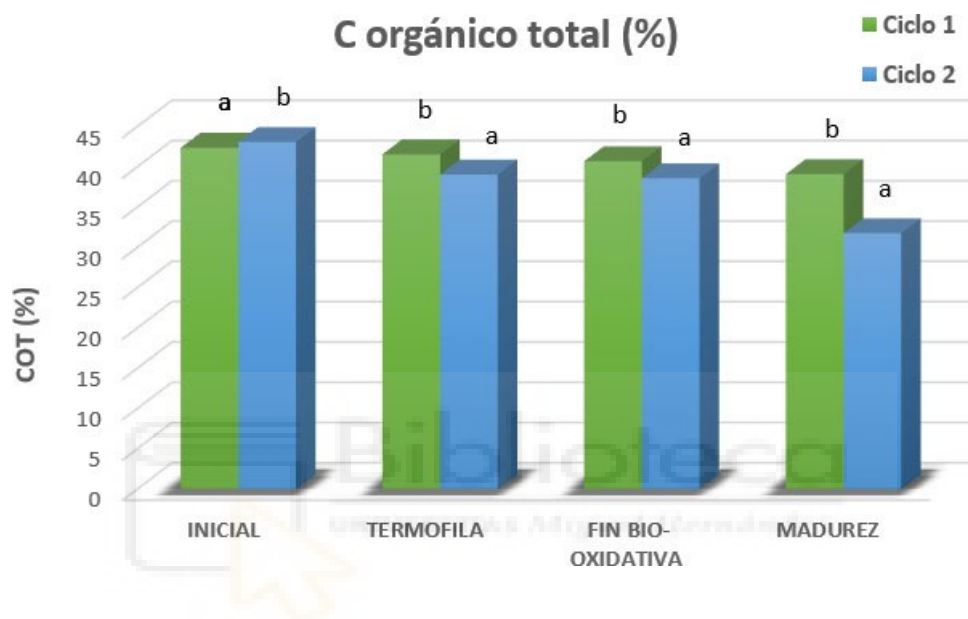


Figura 4.7. Evolución del carbono orgánico total en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$). DMS ciclo 1 = 1,0; DMS ciclo 2: = 1,50 (DMS: diferencia mínima significativa).

El carbono orgánico total es un parámetro crítico para mantener una relación C/N (Carbono/Nitrógeno) adecuada en el compostaje, con el propósito de evitar el exceso de calor en la pila y los malos olores.

Se observa que el ciclo 1 en la fase inicial tiene el mayor porcentaje de carbono orgánico total, alcanzando un valor de 42,3%. Esto es importante, ya que la fase inicial es crucial para proporcionar suficiente material carbonáceo para el desarrollo de la actividad microbiana y el proceso de compostaje.

Por otro lado, en el ciclo 2, específicamente durante la fase de maduración, se presenta el menor porcentaje de carbono orgánico total, con un valor de 31,7%. Es fundamental tener en cuenta este dato, ya que la fase de maduración es esencial para que el compost alcance su estabilidad y calidad adecuada.

4.3.3. Nitrógeno total

Al igual que el carbono, el nitrógeno también tiene un papel fundamental en la relación C/N (Carbono/Nitrógeno) durante el proceso de compostaje. El nitrógeno es esencial para el crecimiento y actividad de los microorganismos que descomponen la materia orgánica y transforman el compost en un producto final rico en nutrientes.

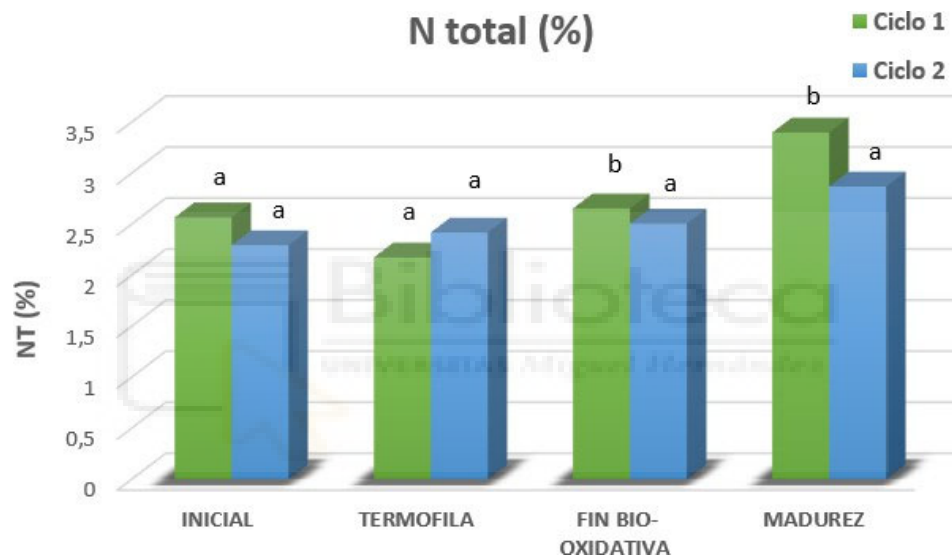


Figura 4.8. Evolución del nitrógeno total en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$). DMS ciclo 1 = 0,14; DMS ciclo 2: = 0,2 (DMS: diferencia mínima significativa).

En el caso del ciclo 1, se observa que el menor porcentaje de nitrógeno se presenta durante la fase termófila. Esta fase es una etapa de alto consumo de energía y actividad microbiana intensa, por lo que el nitrógeno se utiliza rápidamente para descomponer y estabilizar la materia orgánica en el compost. Es común que, durante esta fase, el contenido de nitrógeno disminuya debido a su intensa demanda por los microorganismos (Moreno-Casco y Moral, 2008).

Por otro lado, el ciclo 1 también mostró que el mayor porcentaje de nitrógeno se encontraba en la fase de madurez. Durante esta etapa, el compost ha alcanzado una mayor estabilidad y los microorganismos han completado gran parte del proceso de descomposición. Como resultado, se libera menos dióxido de carbono y se retiene una mayor proporción de nitrógeno en el compost. La tendencia general en ambos ciclos fue el incremento en los contenidos de este parámetro, probablemente debido a un efecto concentración a consecuencia de la pérdida de peso de la pila por degradación de materia orgánica, además de la posible fijación biológica de nitrógeno (Paredes y col., 2002).

Los valores en el compost final fueron superiores al 3 %, valores similares a los observados en compost de este tipo de residuos (Huerta-Pujol y col, 2011) y a compost elaborados con otros materiales, como los digeridos anaerobios de residuos ganaderos, que alcanzaron valores de 3,5% de nitrógeno total (Bustamante y col., 2012) y a otros materiales utilizados frecuentemente como enmiendas de suelos, tales como residuos agroindustriales o estiércoles (Bustamante y col., 2010).

4.3.4. Relación C orgánico total /N total

La relación C/N es un factor crucial para el desarrollo microbiano adecuado durante el compostaje. Esta relación indica la disponibilidad relativa de carbono y nitrógeno en el compost, lo que afecta directamente la actividad y eficiencia de los microorganismos descomponedores. al desarrollo del proceso. La importancia de esta relación está en que, para que el proceso de compostaje se desarrolle de forma adecuada, se considera que el material de partida debe de tener una relación C_{org}/N_{total} entre 25-35 (Hamoda y col., 1998). Valores elevados de esta relación originarían un alargamiento del proceso, debido a que es necesario el desarrollo de varios ciclos de microorganismos para degradar el exceso de carbono, empleándose el único nitrógeno disponible, que será el de los microorganismos que han muerto, mientras que valores muy bajos pueden conducir a pérdidas importantes de nitrógeno por volatilización como amoníaco.

En los resultados obtenidos, se observa que la relación C/N se encontraba en un rango entre 16 y 18 al inicio del proceso, dependiendo del ciclo. En general, la tendencia de este parámetro fue disminuir a lo largo del proceso, mostrando unos valores finales en ambos ciclos próximos a 11, sin observar diferencias significativas entre ambos ciclos, siendo valores dentro del valor límite de C/N inferior a 12 establecido por Iglesias Jiménez y Pérez García (1992), para compost de RSU y Bernal y col., (1988) para compost de diversos orígenes, estableciendo la legislación española valores de dicha relación inferiores a 20 (BOE, 2013).

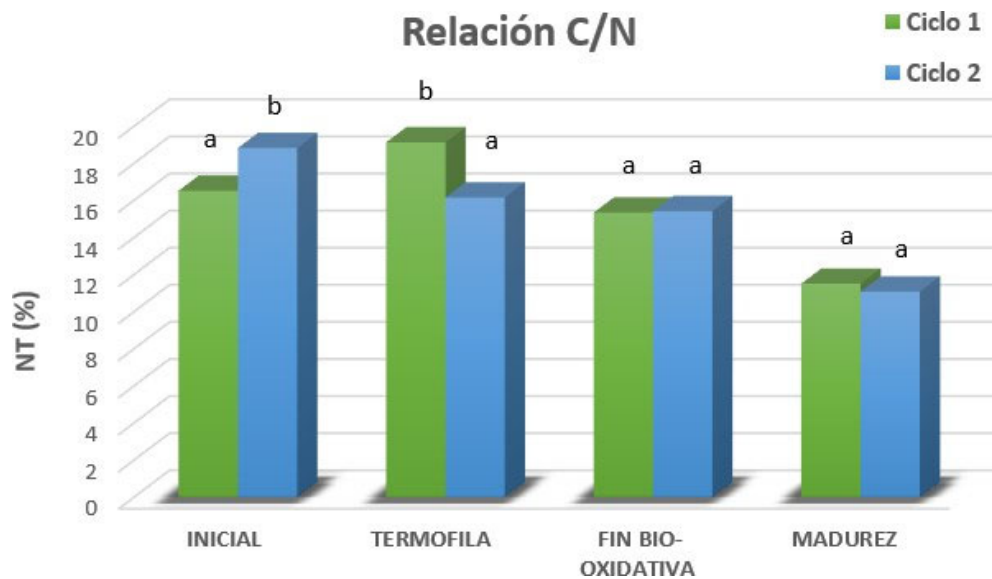


Figura 4.9. Evolución de la relación C/N en las pilas de compostaje durante los dos ciclos de compostaje. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ciclos en el mismo muestreo ($P < 0,05$). DMS ciclo 1 = 0,2; DMS ciclo 2: = 1.4 (DMS: diferencia mínima significativa).

4.4. Calidad del compost

4.4.1. Calidad agronómica

A continuación, se muestran las características finales desde el punto de vista agronómico para los compost obtenidos en cada uno de los ciclos de proceso estudiados en la planta descentralizada de Sort (Tabla 4.1). En general, ambos compost mostraron adecuadas características agronómicas, con un importante contenido en macronutrientes NPK, ausencia de fitotoxicidad y un importante contenido en materia orgánica, excepto por el valor de CE, algo superior al límite establecido para su uso agrícola.

Por otra parte, los resultados obtenidos en los compost de los ciclos 1 y 2 muestran las mayores diferencias en los niveles de humedad y densidad aparente (relacionada con dicha humedad), siendo bastante más altos en el compost del ciclo 2, posiblemente debido a la diferencia estacional de cada uno de los ciclos estudiados, así como en el parámetro indicativo de potencial fitotoxicidad, el índice de germinación (IG), aunque ninguno de los compost finales fue fitotóxico.

Respecto al resto de parámetros agronómicos, como los contenidos en materia orgánica y nutrientes, así como en parámetros físico-químicos como el pH y la CE, no se observaron

notables diferencias, mostrando en general, el compost del ciclo 1 un mayor contenido en nutrientes y materia orgánica, posiblemente debido a las características iniciales de la FORS y estructurantes utilizados en ese ciclo. Esta similitud muestra una reproducibilidad en ambos ciclos de proceso, lo cual es algo esencial para el uso final del material, al poder garantizar unas características similares en los productos finales obtenidos en la planta.

Tabla 4. 1 Principales características agronómicas de los compost finales obtenidos.

Parámetro	Compost Ciclo 1	Compost Ciclo 2
Humedad (%)	17,7	44,0
Densidad (kg/L)	0,380	0,631
pH	7,4	8,1
CE (dS/m)	5,7	5,2
Materia orgánica total (%)	67,4	56,6
C orgánico total (%)	39,1	31,7
N total (%)	3,4	2,9
Relación C/N	11,5	11,1
P ₂ O ₅ (%)	2,67	2,19
K ₂ O (%)	1,78	1,35
Na (g/kg)	7,15	5,49
Índice de germinación (%)	66,1	99,1

CE: conductividad eléctrica.

4.4.2. Parámetros de madurez y/o estabilidad

Existen diversos métodos para evaluar la calidad y estabilidad del compost maduro. Uno de estos métodos implica el estudio de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), que proporciona una medida de las cargas negativas en las superficies minerales (FAO, 2013). Diversos autores (Harada e Inoko, 1980 e Iglesias Jiménez y Pérez García, 1992) han mostrado la capacidad de cambio catiónico en el compost aumentaba conforme progresaba el proceso de compostaje hasta alcanzar un valor estable, concluyendo que si éste se sitúa en el rango de $CCC > 60-67$ meq/100 g, sobre materia orgánica, indicaba que el compost estaba maduro. Por otra parte, Iglesias Jiménez y Pérez García, 1992a y García y col., 1992) también propusieron la relación capacidad de cambio catiónico/carbono orgánico total ($CCC/Corg$) como índice de

madurez más fiable, fijando valores de madurez adecuados superiores a 1,9 y 3,5 meq/g, respectivamente.

Otro indicador relevante es el índice de germinación, que nos brinda información sobre los factores que pueden inhibir la germinación debido a un alto contenido de fitotoxinas (Francesco, 2017), estableciendo un valor límite $\geq 50\%$ para un compost maduro (Zucconi y col., 1987). Además, se pueden medir parámetros como el carbono orgánico total, el carbono de ácidos húmicos y el carbono de ácidos fúlvicos para obtener una comprensión más completa de la calidad y composición del compost maduro, así como el grado de estabilidad térmica para evaluar la estabilidad del material. Estos métodos son esenciales para asegurar que el compost esté listo para su uso en la agricultura y la jardinería, garantizando su efectividad y seguridad. La Tabla 4.2 muestra los indicadores relativos a la madurez y estabilidad del compost en los distintos ciclos. Esto posibilita la observación y evaluación del estado actual del compost, determinando si se encuentra en su fase final de madurez y estabilidad, o si aún presenta actividad biológica y cambios en su composición. Tal como se muestra en esta tabla, en general, los compost de ambos ciclos verificaron todos los criterios de madurez y estabilidad, exceptuando la estabilidad térmica en el caso del compost del ciclo, que mostraba todavía una cierta actividad biológica.

Tabla 4.2. Parámetros de madurez y estabilidad del compost en los dos ciclos de compostaje.

Parámetro	Ciclo 1	Ciclo 2
CCC (meq/100 g MO)	74,4	99,5
CCC/COT (meq/g COT)	1,29	1,78
% Cah	6,68	10,8
% Caf	5,56	2,40
IG (%)	66,1	99,1
Grado de estabilidad térmica ¹	II, Activo	V, Estable

¹ Brinton y col. (1995). CCC: capacidad de cambio catiónico; COT: carbono orgánico total; Cah: carbono de ácidos húmicos; Caf: carbono de ácidos fúlvicos; IG: índice de germinación.

4.4.3. Calidad a nivel medioambiental e higiénico-sanitario

En la tabla 4.3 se detallan diversos tipos de elementos potencialmente tóxicos y de microorganismos patógenos que podrían presentar riesgos ambientales en los compost de ambos ciclos. En concordancia con los parámetros establecidos en el Real Decreto 506 del 2013

el cual fue actualizado por el Real Decreto 999 del 2017, se establecen criterios y límites específicos para determinar la idoneidad de un fertilizante para su aplicación en el suelo, para garantizar que su uso no conlleve riesgos biológicos ni medioambientales. Tal como se observa, ambos compost verifican los criterios respecto al contenido de metales pesados, así como los criterios de carácter higiénico-sanitario, como es la ausencia de *Salmonella* en 25 g de material fresco y 1000 NMP/g compost.

Tabla 4.3. Contenido en elementos potencialmente tóxicos y calidad higiénico-sanitaria de los compost maduros.

Parámetro	Ciclo 1	Ciclo 2
<i>Metales pesados</i>		
Cd (mg/kg)	0,45	0,52
Cr (mg/kg)	42,7	52,8
Cu (mg/kg)	47,8	39,1
Ni (mg/kg)	11,1	18,6
Pb (mg/kg)	13,8	15,9
Zn (mg/kg)	115	102
As (mg/kg)	2,48	4,13
<i>Microorganismos patógenos</i>		
<i>Salmonella</i> spp ¹	Ausencia	Ausencia
<i>E. coli</i> (NMP/g)	< 3	2,30·10 ²
<i>Listeria monocytogenes</i> ¹	Ausencia	Ausencia
<i>Clostridium perfringens</i> (UFC/g)	< 10	< 10
Coliformes totales (NMP/g)	< 3	9,30·10 ²
Enterococos (UFC/g)	1,30·10 ²	2,90·10 ⁴

NMP: número más probable; UFC: unidades formadoras de colonias.

El hecho de que ambos compost se sitúen dentro de estos límites reglamentarios sugiere que cumplen con los estándares de calidad y seguridad exigidos por la legislación. Esto implica que estos fertilizantes han sido evaluados y probados para asegurar que no presenten un riesgo significativo para la salud humana, el medio ambiente o la biodiversidad cuando se aplican correctamente en el suelo.

5. CONCLUSIONES

El proceso de compostaje llevado a cabo en esta investigación se caracteriza por su enfoque en la producción sostenible, a través de un tipo de gestión descentralizado de la fracción orgánica procedente de la recogida selectiva de los residuos sólidos generados en el entorno urbano cercano. Las principales conclusiones obtenidas en este trabajo son las siguientes:

- El proceso de compostaje se desarrolló de forma adecuada en ambos ciclos, con un adecuado desarrollo de la etapa termófila, asegurando de esta forma la higienización de las pilas. Los perfiles térmicos en los dos ciclos no mostraron grandes diferencias, lo que demuestra una adecuada reproducibilidad a nivel térmico en el desarrollo del proceso.
- En general, los compost obtenidos en los dos ciclos de proceso mostraron adecuadas características agronómicas, con un importante contenido en macronutrientes NPK, ausencia de fitotoxicidad y un importante contenido en materia orgánica, excepto por la salinidad, algo superior al límite establecido para su uso agrícola.
- Los compost de ambos ciclos verificaron todos los criterios de madurez y estabilidad, exceptuando la estabilidad térmica en el caso del compost del ciclo 1, que mostraba todavía una cierta actividad biológica.
- Respecto a los parámetros de potencial riesgo sanitario y/o medioambiental derivado del uso de los compost, ambos compost verificaron los criterios establecidos en la legislación, de carácter higiénico-sanitario y respecto al contenido de metales pesados, por lo que su uso agrícola implicaría un beneficio agronómico y ningún tipo de riesgo ambiental y/o sanitario.

Como conclusión general, el escenario de compostaje descentralizado para la gestión de la fracción orgánica de recogida selectiva de residuos orgánicos municipales es un modelo sostenible que cierra el ciclo de economía circular y proporciona beneficios medioambientales derivados de la gestión y valorización de este tipo de residuos. Los procesos estudiados permitieron la obtención de compost maduros y alta calidad agronómica, con adecuadas características que garantizan su uso agrícola sin ningún tipo de riesgo sanitario y/o medioambiental.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bohórquez, W. 2019. El proceso de compostaje. Universidad de la Salle.
- Bueno Márquez, P.; Díaz Blanco, M. J.; Cabrera, F. 2008. Factores que afectan al proceso de compostaje. IRNAS <http://hdl.handle.net/10261/20837>
- Bueno, P., Díaz, M., Cabrera, F. 2008 Compostaje, Factores que afectan al proceso de compostaje ISBN 978-84-8476-346-8, págs. 93-110.
- Bustamante, M.A. 2007. Compostaje de los residuos generados en la industria vinícola y alcoholera. Valoración agronómica de estos materiales. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández.
- Bustamante, M.A.; Restrepo, A.P.; Albuquerque, J.A., Pérez-Murcia, M.D.; Paredes, C. Moral, R. Bernal, M.P. 2012. Recycling of anaerobic digestates by composting: effect of the bulking agent used. *Journal of Clean Production*, 47: 61-69.
- Cáceres, R., Coromina, N., Malińska, K., Marfà, O. 2015. Evolution of process control parameters during extended co-composting of green waste and solid fraction of cattle slurry to obtain growing media. *Bioresource Technology*, 179: 398-406.
- Euskal Estatistika Erakundea Instituto Vasco de Estadística (Eustat), 2022. Residuos Urbanos (RU).
- Fan, S., Anran, L., Annemiek, T. H, Cees, J.N., Wei-Shan, C. 2021. Heat Potential, Generation, Recovery, and utilization from composting.
- FAO, 2013. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Manual de Compostaje del Agricultor. Experiencias en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para Alimentación y la Agricultura.
- Fondo Europeo de Desarrollo Regional “Una manera de hacer Europa”, 2018. Compostaje como estrategia de gestión descentralizada
- Francesco, S. 2017. Compostaje descentralizado de residuos orgánicos domiciliarios a pequeña escala: Estudio del proceso y del producto obtenido. Tesis doctoral, Universidad Pública de Navarra. Biblos-e Archivo.
- Gagnon, B., Rioux, C. y Chagnon, J. 1993. Evolution of chemical composition and microbial activity during storage of compost-based mixes. *Compost Science and Utilization*, 1 (3), 15-21.
- Harada, Y., Inoko, A. 1980. The measurement of the cation-exchange capacity of composts for estimation of degree of maturity. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 26, 127-134.

- Huerta-Pujol, O., Gallart, M., Soliva, M., Martínez-Farré, X, López, M. 2011. Effect of collection system on mineral content of biowaste. *Resources, Conservation and Recycling*, 55: 1095–1099.
- Iglesias Jiménez, E. y Pérez García, V. 1991. Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation-exchange capacity. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 45-60.
- Iglesias Jiménez, E. y Pérez García, V. 1992a. Composting of domestic refuse and sewage sludge. II. Evolution of carbon and some “humification” indexes. *Resources, Conservation and Recycling*, 6, 243-257.
- Iglesias Jiménez, E. y Pérez García, V. 1992b. Determination of maturity indices for city refuse composts. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 38, 331-343.
- Instituto Nacional de Estadística, 2022. Estadística sobre recogida y tratamiento de residuos (INE).
- Kodalusi, G.K., Agilar, E.G. 2006. Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. Centro Nacional de Investigación y capacitación Ambiental de Investigación en Residuos y Sitios Contaminados.
- Lasaridi, K.; Protopapa, I.; Kotsou, M.; Pilidis, G.; Manios, G.; Kyriacou, A. 2006. Quality assessment of composts in the Greek market: The need for standards and quality assurance. *Journal of Environmental Management*, 80: 58-65.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (BOE núm. 181, de 29 de julio 2011)
- MITECO, 2020. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Memoria Anual de Generación y Gestión de Residuos.
- MITECO, 2020. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Introducción a los modelos de gestión de Residuos
- MITECO, 2021. Ministerio Para La Transición Ecológica y El Reto Demográfico. Introducción a los Modelos de Gestión de Residuos.
- MITECO, 2021. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Biorresiduos ¿Cuánto y donde se generan?
- MMARM, 2009. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Manual de Compostaje: Gobierno de España.
- Moreno Casco, C. y Moral, Herrero, R. 2008. Compostaje. Mundi- Prensa. Madrid.
- Moreno Casco, J.M., Mormeneo, S. 2008. Microbiología y bioquímica del proceso. En: Compostaje, (eds) Moreno Casco, J. y Moral Herrero, R. Mundi-Prensa, pp. 111-140.

- Morton, J., Renan Poveda, A., (Eds). 2018. What a Waste 2.0 A global snapshot on solid waste management to 2050.
- Paredes, C., Bernal, M.P., Cegarra, J. y Roig, A. 2002. Bio-degradation of olive mill wastewater sludge by its co-composting whit agricultural wastes. *Bioresource Technology* 85,1-8.
- Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo (BOE núm. 170, de 14 de julio de 2010).
- Real Decreto 999/2017, de 24 de Noviembre, por el que se modifica el Real Decreto de 506/2013, de 28 de Junio, sobre productos fertilizantes. (BOE núm. 295, de 6 de diciembre de 2017).
- Reglamento (EU) 2019/1009 del parlamento Europeo y del consejo de 5 de junio de 2019.
- Residus, 2021. Campanya 2021 de lliurament i difusió del Compost Pallars Sobirà. <https://www.pallarssobira.cat/>
- Rodríguez Bueno, D. 2011. Estación Depuradora de Aguas Residuales y Planta de Compostaje de ESPE. [Trabajo de Fin de Master, Universidad de Alicante]. Biblos-e Archivo.
- Roger T. Haung. (Eds) 1999. The practical handbook of compost engineering.
- Stentiford, E.I. 1996. Composting control: principles and practice. En: M. De Bertoldi (Ed.), *The Science of Composting. Part I*. Blakie Academic and Professional, Glasgow, UK.
- Stentiford, E.I., Mara, D.D. y Taylor, P.L. 1985. Forced aeration co-composting of domestic refuse and sewage sludge in static piles. En: *Composting of Agricultural and Other Wastes*. Ed.: J.K.R. Gasser. Elsevier. Barking. pp. 42-54.
- Tovar Martínez, F. (2013). Determinación de las curvas de temperatura de mezclas de restos de poda de jardinería publica y estiércol de vaca para su compostaje. [Trabajo de Fin de Master, Universidad Miguel Hernández de Orihuela]. Biblos-e Archivo.
- Vargas Rosas, J.M. 2020. Diagnostico ambiental de la disposición de residuos sólidos en el municipio de Vallegrande (Bolivia). Tesis doctoral, Escuela Tecnica Superior de Ingenieria Universidad de Sevilla]. Biblos-e Archivo
- Zucconi, F. y de Bertoldi, M. 1987. Compost specifications for the prodictation and characterization of compost form municipal solid waste. En: *Compost production, Quality and Use*. Ed.: M., de Bertoldi, M.P., Ferranti, P L'Hermite y F., Zucconi. Elsevier. Barking. pp 30-50.
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. y de Bertoldi, M. 1981. Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle* 22: 54–57. NFY Tam, S Tiquia.