

# Influencia de la proporción de materiales estructurantes en el co-compostaje de lodos de EDAR

 Biblioteca



**José Luis Juan Terente**

**2021**



## UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Se autoriza al alumno D. José Luis Juan Terente, a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: "Influencia de la proporción de material estructurante en ensayos de co-compostaje de lodos de EDAR", bajo la dirección de D. Jose Luis García Morales del Departamento de Tecnologías del Medio Ambiente, Universidad de Cádiz, debiendo cumplir las normas establecidas para la redacción del mismo que están a su disposición en la página Web específica del Master.

Orihuela, 6 de septiembre de 2021

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

CONCEPCION  
|PAREDES|GIL

Firmado digitalmente por  
CONCEPCION|PAREDES|GIL  
Fecha: 2021.09.06 13:42:13  
+02'00'

Fdo.: Concepción Paredes Gil

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



**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE ORIHUELA**

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



**INFLUENCIA DE LA PROPORCIÓN DE MATERIALES ESTRUCTURANTES EN  
EL CO-COMPOSTAJE DE LODOS DE EDAR**



**ALUMNO**

**José Luis Juan Terente**

## REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MASTER

### **IDENTIFICACIONES**

**Autor:** José Luis Juan Terente

**Título:** Influencia en la proporción de materiales estructurantes en el co-compostaje de lodos de EDAR

**Title:** The influence of the proportion of bulking agent in testing of co-composting of sewage sludge.

**Director/es del TFM:** José Luis García Morales

**Año:** 2021

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

**Tipo de proyecto:** Experimental

**Palabras claves:** Lodos de depuradora, estructurante, compostaje, compost.

**Keywords:** Sewage sludge, bulking agent, composting, compost

**Nº citas bibliográficas:** 27

**Nº de planos:** 0

**Nº de tablas:** 10

**Nº de figuras:** 26

**Nº de anexos:** 0



## **RESUMEN**

El objetivo general de este trabajo experimental es, mediante la realización de distintos ensayos de compostaje a escala real, determinar cuál es la mezcla más adecuada de lodo EDAR y materiales estructurantes (residuos vegetales triturados y astilla de pallets) para la obtención de un producto final -compost- que cumpla los parámetros de calidad exigidos en la normativa vigente sobre fertilizantes, con la máxima eficiencia del proceso en cuanto a rendimientos en el tratamiento de lodos EDAR.

Para alcanzar el objetivo planteado se diseñan cinco ensayos a escala real, de compostaje de lodos de EDAR con diferentes mezclas y proporciones de materiales estructurantes.

El diseño experimental seguido consiste en: caracterización inicial de los residuos; planteamiento de las mezclas a compostar; compostaje en trincheras con aireación forzada y cubiertas con una membrana semipermeable que permite la transpiración reteniendo gases que puedan provocar malos olores y aislando el sistema de agentes climatológicos adversos; control y análisis de los parámetros fundamentales para el correcto desarrollo del proceso y de los relativos a la naturaleza del sustrato, tomando para ello muestras que se caracterizan en cuatro momentos del proceso: inicio, mitad de la fase de fermentación, inicio de la maduración y compost final.

La conclusión final es que de los cinco ensayos de co-compostaje de lodos EDAR con dos tipos de materiales estructurantes en diferentes proporciones, de la mezcla del Ensayo 2 consistente en 3 volúmenes de astilla de madera por 2 volúmenes de lodos de depuradora, se obtuvo la máxima eficiencia del proceso en cuanto a rendimientos (t) de lodos EDAR tratados, cumpliendo los parámetros de calidad exigidos en la normativa vigente sobre fertilizantes en el compost final.

## **ABSTRACT**

The general aim of this experimental work is, by performing different tests of composting at real scale, to determine the most suitable mixture of sewage sludge and bulking agent (crushed vegetal waste and splinter of pallets) for the obtaining of a final product -compost- which meets the quality parameters demanded by the regulations in force about fertilizers, with the maximum efficiency of the process regarding performance in the treatment of sewage sludge.

In order to reach the objective set, five real scale tests are designed of composting of sewage sludge with different mixtures and proportions of bulkin agent.

The experimental design followed consists of: initial characterization of the waste; approach to the mixtures to be composted; composting in trenches with forced aeration and covered with a semipermeable membrane which allows transpiration by holding back gases which can cause bad smells and isolating the system of adverse climatological agents; control and analysis of the essential parameters for the correct development of the process and the related to the substration nature, by taking samples that are characterized in four stages of the process: beginning, half of the fermentation phase, start of the maturation and final compost.

The final conclusion is that, of the five tests of co-composting of sewage sludge with two kinds of bulkin agent in different proportions, from the mixture of Test 2, consisting of 3 volumes of wood splinter by 2 volumes of purifying plant sludge, the maximum efficiency was obtained regarding performance of sewage sludge treated, accomplishing in the final compost the quality parameters demanded by the regulations in force about fertilizers.

## **ÍNDICE**

<b>1.- INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1- LODOS DE DEPURADORA .....</b>	<b>9</b>
1.1.1.- Definición .....	10
1.1.2.- Características generales .....	10
1.1.3.- Generación y gestión .....	11
1.1.4.- Ámbito normativo para la aplicación agronómica de los lodos de depuración .....	14
<b>1.2.- GESTIÓN DE LOS LODOS DE DEPURADORA EN EL PRINCIPADO DE     ASTURIAS .....</b>	<b>17</b>
1.2.1.- Generación y gestión .....	18
1.2.2.- Modelo de gestión actual .....	19
<b>1.3.- COMPOSTAJE DE LODOS DE DEPURADORA .....</b>	<b>21</b>
1.3.1.- Descripción .....	21
1.3.2.- Sistemas de compostaje .....	24
1.3.3.- Valorización agronómica del compost .....	25
<b>2.- OBJETIVOS.....</b>	<b>27</b>
2.1.- OBJETIVO GENERAL.....	27
2.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	27
<b>3.- MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.- SISTEMA DE COMPOSTAJE EMPLEADO .....</b>	<b>28</b>
3.1.1.-Pretratamiento de los residuos .....	29
3.1.2.- Preparación de la mezcla .....	30
3.1.3.- Carga de la trinchera de compostaje.....	31
3.1.4.- Colocación/Retirada de la lona semipermeable .....	32
3.1.5.- Vaciado de trincheras. Formación de pila de maduración .....	33

---

3.1.5.1.- Postratamiento, cribado y almacenamiento.....	34
<b>3.2.- DISEÑO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>35</b>
3.2.1.- Residuos orgánicos de partida.....	35
3.2.2.- Establecimiento de los ensayos. Mezclas propuestas.....	38
3.2.3.- Análisis de los parámetros fisicoquímicos del material de inicio, durante el proceso y del producto final.....	39
<b>3.3.- DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LOS ENSAYOS.....</b>	<b>39</b>
3.3.1.- Características de los residuos de partida.....	40
3.3.2.- Mezclas.....	41
3.3.3.- Seguimiento del proceso de compostaje.....	42
3.3.4.- Muestreo de material.....	44
<b>4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>46</b>
4.1.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS.....	46
4.1.1.- Parámetros asociados al propio proceso de compostaje.....	46
4.1.1.1.- Humedad.....	46
4.1.1.2.- Temperatura.....	49
4.1.1.3.- pH.....	54
4.1.2.- Parámetros relativos a la naturaleza del sustrato.....	56
4.1.2.1.- Materia orgánica.....	56
4.1.2.2.- Carbono orgánico total.....	57
4.1.2.3.- Nitrógeno total.....	58
4.1.2.4.- Relación C/N.....	59
4.1.3.- Evaluación de la calidad agronómica de los compost obtenidos.....	61
<b>5.- CONCLUSIONES.....</b>	<b>64</b>
<b>6.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>



## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. LODOS DE DEPURADORA**

La importancia creciente de la producción de lodos procedentes de la depuración de aguas residuales domésticas o urbanas está planteando serios problemas para su almacenamiento y, sobre todo, para su eliminación. Por otra parte, la composición de estos lodos, aunque variable, los convierte en una fuente de materia orgánica y de elementos fertilizantes para su utilización en la actividad agraria, que resulta ser la vía más adecuada para su gestión al permitir su incorporación a los ciclos naturales de la materia y la energía.

Se produce así un doble beneficio, ambiental y agrario, consecuencia, por una parte, de su eliminación sin alteración relevante del equilibrio ecológico, y por otra, del efecto que se deriva de su aplicación en nuestros suelos, que observan en gran parte de España una acelerada y preocupante disminución de su contenido en materia orgánica con los problemas que este hecho lleva aparejado.

Hasta el momento actual, en España estos lodos han estado y están siendo utilizados con esa finalidad, aunque con un carácter geográfico y especialmente limitado que ha permitido adquirir una notable experiencia en relación con su naturaleza, forma, dosis de aplicación y efectos sobre el suelo, el agua, la cubierta vegetal y la salud humana.

Esta experiencia adquirida ha permitido, entre otras cosas, constatar el carácter perjudicial que pueden tener los lodos cuando determinadas especies químicas inorgánicas como los metales pesados, alcanzan concentraciones superiores a un cierto umbral y son aplicados de manera sistemática o discontinua, en determinados tipos de suelos, a dosis muy altas o en momentos determinados del ciclo vegetativo de las plantas que van a ser aprovechadas directamente por los animales domésticos o por el hombre.

Consecuencia de la experiencia anteriormente descrita, hoy en día la valorización agronómica directa se considera como un uso poco seguro debido al riesgo de contaminación del suelo, del agua y consecuentemente por la bioacumulación en las plantas, introduciéndose en la cadena trófica y haciendo que animales y seres humanos sufran también su toxicidad. Por tanto, se llevan a cabo previamente operaciones de estabilización de la materia orgánica como la digestión anaerobia, la digestión aerobia, la estabilización química o el compostaje.

### **1.1.1. DEFINICIÓN**

Se entiende por lodos de depuración, según el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario, a los lodos que se generan en estaciones de depuración que tratan aguas residuales domésticas, urbanas o de otros orígenes con composición similar a las anteriores; así como los lodos residuales de fosas sépticas y de otras instalaciones similares para el tratamiento de aguas residuales.

### **1.1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES**

Los lodos obtenidos como resultado de las distintas etapas de depuración de las aguas residuales urbanas constituyen un material semisólido, heterogéneo consistente en una mezcla de agua y sólidos separada del agua residual como resultado de procesos naturales o artificiales. Su composición es muy variable y viene determinada por las características del agua residual tratada, los procesos de depuración empleados y el tratamiento posterior al que se someta el lodo.

Los lodos procedentes de la limpieza de fosas sépticas y otras instalaciones primarias de depuración, y de la limpieza y desatasco de colectores, son de competencia municipal, y por su origen tienen en general menos de un 5% de materia seca y se producen de forma dispersa por todo el territorio. En cambio, los lodos procedentes de grandes infraestructuras de depuración con tratamiento primario y secundario no son residuo urbano sino un residuo industrial y se trata en general de lodos estabilizados sometidos a procesos de deshidratación mecánicos, y que por tanto alcanzan de media el 25% de materia seca.

Los lodos contienen amplia diversidad de materias suspendidas o disueltas. Algunas de ellas con alto valor agronómico (materia orgánica, nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) y en menor cantidad calcio (Ca), magnesio (Mg) y otros micronutrientes esenciales para las plantas) y otras con potencial contaminante como los metales pesados, entre ellos cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), los patógenos, y los contaminantes orgánicos. Los lodos generados en los procesos de tratamiento del agua residual poseen un mal olor y un alto contenido en patógenos por lo que deben ser tratados e higienizados.

Para reducir los costes de tratamiento, transporte y almacenamiento debe reducirse su volumen mediante la eliminación parcial de agua. El espesamiento, acondicionamiento, deshidratación y secado del lodo pueden disminuir el contenido de agua y aumentar el porcentaje de sólidos del 5 al 10%, reduciendo el volumen de lodo a la mitad (Pérez-Murcia y Moreno-Caselles, 2008).

### **1.1.3. GENERACIÓN Y GESTIÓN**

Las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) son productores de lodos y como tales productoras de residuos deben asegurar su correcta gestión y pueden realizarla directamente o encargarla a gestores autorizados, todo ello conforme a lo que establece la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. La orientación de su gestión debe realizarse respetando los principios de la política de residuos relativos a la protección del medio ambiente y la salud humana y aplicando la jerarquía en las opciones de gestión, priorizando la prevención sobre el reciclado, otros tipos de valorización incluida la energética y quedando en último lugar el depósito en vertedero.

En función del tratamiento a que se sometan los lodos, en la **Figura 1.1** puede verse un esquema de la gestión y tratamiento de lodos y, por tanto, en función del grado de estabilización que presenten, se distinguen dos tipos de lodos:

- Lodos frescos, son aquellos que no han recibido ningún tratamiento de fermentación y se caracterizan por un olor muy desagradable y por su alto contenido en gérmenes patógenos.
- Lodos digeridos, se tratan generalmente en la propia depuradora para reducir su contenido en agua, en patógenos y asegurar la estabilidad de la materia orgánica. En algunos casos estos lodos son tratados fuera de las depuradoras en instalaciones específicas de tratamiento de residuos.

Según los datos del Registro Nacional de Lodos, en España se producen anualmente alrededor de 1.200.000 toneladas (en materia seca, m.s). Si se considera una humedad media aproximada de un 80%, en España se generan alrededor de 6.000.000 t/año de lodos.

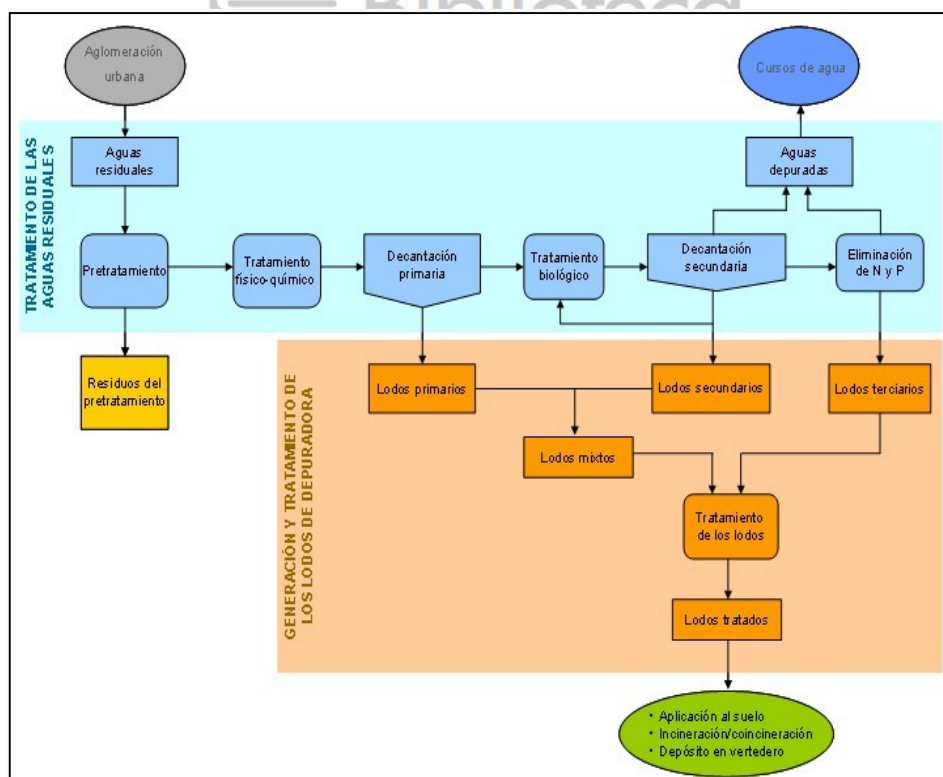
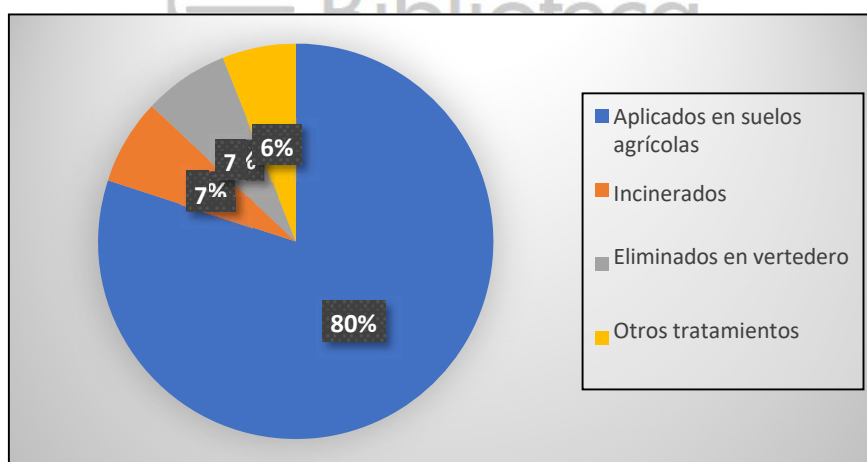


Figura 1.1. Esquema de la gestión y tratamiento de los lodos de depuración

Fuente: MITECO 2021

Durante los últimos años se ha realizado un notable esfuerzo para mejorar la información sobre la gestión de los lodos. En relación a los tratamientos intermedios que se aplican, hay que señalar que varían en función del tamaño de la estación depuradora, de modo que en las EDAR más pequeñas, menores a 5.000 hab-eq., el tratamiento más utilizado es la aireación prolongada, seguido del lagunaje. Sin embargo, en las EDAR de mayor tamaño, mayores a 50.000 hab-eq., el tratamiento más implantado es la digestión anaerobia.

En la **Figura 1.2** se muestra el tipo de valorización o el destino que se da a los lodos de depuradora. Como puede comprobarse, un 7% de estos acaban siendo depositados en el vertedero, lo cual, actualmente representa la última opción de gestión que se contempla debido a la problemática que acarrea por las grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la producción de lixiviados, el riesgo de contaminación de suelos y aguas y los costes asociados al proceso. A esto se le añade el carácter cada vez más restrictivo de la legislación europea.



**Figura 1.2.** Tratamientos finales o destinos de los lodos producidos en el año 2012 en España.

**Fuente:** PEMAR

Los objetivos que se propusieron alcanzar en España en 2020 según el PEMAR en cuanto al destino final de los lodos de depuradora fueron los siguientes:

- Valorización material (en los suelos u otro tipo de valorización) de al menos un 85% de los lodos producidos.

- Incineración / Coincineración y eliminación en vertedero como máximo un 15% de estos en total, llevando al vertedero un 7% como máximo.

En la actualidad, se les está dando cada vez más uso a aquellas aplicaciones que persiguen una economía circular. Aunque la aplicación con más uso continúa siendo, al igual que en la antigüedad, la aplicación agronómica, con la diferencia de que en la actualidad estos lodos deben someterse a procesos previos de estabilización como el compostaje.

#### **1.1.4. ÁMBITO NORMATIVO PARA LA APLICACIÓN AGONÓMICA DE LOS LODOS DE DEPURACIÓN**

La gestión de los residuos, y por tanto de los lodos de depuradora, debe realizarse conforme a lo establecido en la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Por ello, las estaciones depuradoras de aguas residuales, como productoras de estos residuos, deben asegurar su tratamiento adecuado, y pueden realizarlo directamente o encargarlo a gestores autorizados, todo ello conforme a lo que establece la Ley 22/2011, de 28 de julio.

Las diferentes operaciones de tratamiento deben llevarse a cabo conforme a lo establecido en la Ley 22/2011, de 28 de julio, y en la normativa específica aplicable a cada tipo de tratamiento.

Cuando el tratamiento final de los lodos de depuración es la aplicación en los suelos agrícolas, el gestor que realice la aplicación, además de disponer de la autorización para la operación de tratamiento de residuos R10 "Tratamiento de los suelos que produzca un beneficio a la agricultura o una mejora ecológica de los mismos" en cumplimiento de lo establecido en el artículo 27 de la Ley 22/2011 residuos y suelos contaminados, de 28 de julio, deberá cumplir con lo establecido en:

- Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, relativo a la prevención de la contaminación de las aguas por los nitratos de procedencia agraria. Actualmente se encuentra en fase de tramitación un nuevo Real Decreto,

“sobre protección de las aguas contra la contaminación difusa producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias”.

- Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre; mediante este decreto se regula la utilización de los lodos de depuradora en el sector agrario, decretándose un cierto seguimiento por parte de las respectivas Comunidades Autónomas y se funda el Registro Nacional de Lodos (RNL). Incorpora la Directiva 86/278 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura. Este Real Decreto marca los valores que no podrán sobrepasar los lodos tratados destinados a la utilización agraria en cuanto a metales pesados, los cuales vienen recogidos en la **Tabla 1.1**.

Parámetros	Valores límite	
	Suelos con pH menor de 7	Suelos con pH mayor de 7
<b>Cadmio</b>	20	40
<b>Cobre</b>	1.000	1.750
<b>Níquel</b>	300	400
<b>Plomo</b>	750	1.200
<b>Zinc</b>	2.500	4.000
<b>Mercurio</b>	16	25
<b>Cromo</b>	1.000	1.500

**Tabla 1.1.** Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria (mg/kg de materia seca)

**Fuente:** Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre. B.O.E. Nº 262 de 1 de noviembre de 1990

Además, las cantidades máximas de lodos que podrán aportarse al suelo por hectárea y año, serán las que de acuerdo con el contenido en metales pesados de los suelos y lodos a aplicar, no rebasen los valores límite de incorporación de los metales pesados que se presentan en la **Tabla 1.2**.

Parámetros	Valores límite
<b>Cadmio</b>	1
<b>Cobre</b>	50
<b>Níquel</b>	30
<b>Plomo</b>	50
<b>Zinc</b>	150
<b>Mercurio</b>	1
<b>Cromo</b>	100

**Tabla 1.2.** Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria (mg/kg de materia seca)

**Fuente:** Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre. B.O.E. Nº 262 de 1 de noviembre de 1990

Por otra parte, los suelos sobre los que podrán aplicarse los lodos tratados deberán de presentar una concentración de metales pesados inferior a los representados en la **Tabla 1.3.**

Parámetros	Valores límite	
	Suelos con pH menor de 7	Suelos con pH mayor de 7
<b>Cadmio</b>	1	3
<b>Cobre</b>	50	210
<b>Níquel</b>	30	112
<b>Plomo</b>	50	300
<b>Zinc</b>	150	450
<b>Mercurio</b>	1	1,5
<b>Cromo</b>	100	150

**Tabla 1.3.** Valor límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria (mg/kg de materia seca)

**Fuente:** Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre. B.O.E. Nº 262 de 1 de noviembre de 1990

- La Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario establece la información que deben proporcionar las instalaciones depuradoras de aguas residuales, las instalaciones de tratamiento de lodos y los gestores que realizan la aplicación en los suelos de los lodos de depuración tratados.



- Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo y, el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes; del ámbito de ellos se excluyen a los lodos de depuradora previstos en el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. En ambos figura en la lista de residuos orgánicos biodegradables con el código LER 19 08 05 “Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas”, con contenidos en metales pesados inferiores a los establecidos en el real decreto 1310/1990”, pudiendo formar parte de un sustrato o de un producto fertilizante previamente compostado, debiendo cumplir en cualquier caso con los límites que exijan estas normas.

## **1.2. GESTIÓN DE LOS LODOS DE DEPURADORA EN EL PRINCIPADO DE ASTURIAS.**

Según se refleja en el artículo 12.4 b) de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, sobre el reparto competencial en materia de residuos, corresponde a las Comunidades Autónomas la autorización, vigilancia, inspección y sanción de las actividades de producción y gestión de residuos.

La Directiva 2008/98/CE incorpora la obligación de establecer planes de prevención y gestión de residuos, que deben integrar en su proceso de desarrollo o revisión la toma en consideración de los impactos medioambientales asociados a su generación y gestión.

La *Ley 22/2011 de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados*, establece que corresponde a las comunidades autónomas la elaboración de los programas de prevención de residuos, y de los planes autonómicos de gestión de residuos. Los primeros son un instrumento novedoso introducido por la Directiva marco de residuos, incidiendo así en la trascendencia de las políticas de prevención.

El Anexo V de la Ley establece el contenido de los planes autonómicos de gestión de residuos.

En cumplimiento de la norma el Principado de Asturias implanta el Plan Estratégico de Residuos del Principado de Asturias (PERPA) con vigencia desde 2014 hasta 2024

La responsabilidad de la gestión de los lodos de depuradora, según la normativa básica de residuos, recae en el productor. La normativa vigente no recoge una definición precisa del productor de lodos de EDAR, que podrá ser bien el titular de la instalación, o bien la entidad explotadora de la misma, pública o privada, conforme se repartan las competencias y responsabilidades en el modelo de gestión suscrito en cada caso. Por tanto, según el caso, en el Principado de Asturias, se considerará productor y por tanto responsable de la gestión del residuo a:

- La Junta de Saneamiento, Organismo Autónomo del Principado de Asturias, adscrito a la Consejería de Fomento, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente.
- La entidad que explota las EDAR es a su vez el Consorcio de Aguas de Asturias (CADASA).
- El titular de la instalación, que en general es el Estado, en el caso de las grandes instalaciones de interés general; el Principado de Asturias.
- Los ayuntamientos en el caso de pequeñas instalaciones de depuración gestionadas autónomamente.
- COGERSA como entidad que efectúa el tratamiento de los lodos.

### **1.2.1. GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN**

El desarrollo del Plan Director de Obras de Saneamiento y Depuración del Principado de Asturias 2002-2013, integrado y ampliado por el Plan de Calidad de las Aguas en Asturias 2008- 2013, fruto de un convenio de cooperación entre el Principado de Asturias y la Administración del Estado, está muy avanzado, lo que significa que la mayoría de la población ya está conectada a uno de los sistemas existentes para el tratamiento de aguas residuales.

En Asturias existen más de 400 instalaciones de depuración de aguas, considerando desde las pequeñas fosas sépticas hasta el resto de EDAR (pequeñas, medianas y grandes).

Los lodos procedentes de la limpieza de fosas sépticas y otras instalaciones primarias de depuración, y de la limpieza y desatasco de colectores, son de competencia municipal, y por su origen tienen en general menos de un 5% de materia seca y se producen de forma dispersa por todo el territorio. En cambio, los lodos procedentes de grandes infraestructuras de depuración con tratamiento primario y secundario, no son residuo urbano sino un residuo industrial, y se trata en general de lodos estabilizados sometidos a procesos de deshidratación mecánicos, y que por tanto alcanzan de media el 25% de materia seca. La producción se concentra en las aproximadamente 23 EDAR principales. La mayor parte de las grandes infraestructuras de saneamiento y depuración están ubicadas en la Zona Central de la región, donde se ubica más del 70% de la población y el grueso de la industria.

Puesto que la totalidad de los lodos generados en las EDAR públicas se destinan a las instalaciones de COGERSA, se puede considerar que la cantidad de lodos de EDAR y fosas sépticas producida es equivalente a los lodos gestionados en las instalaciones de COGERSA.

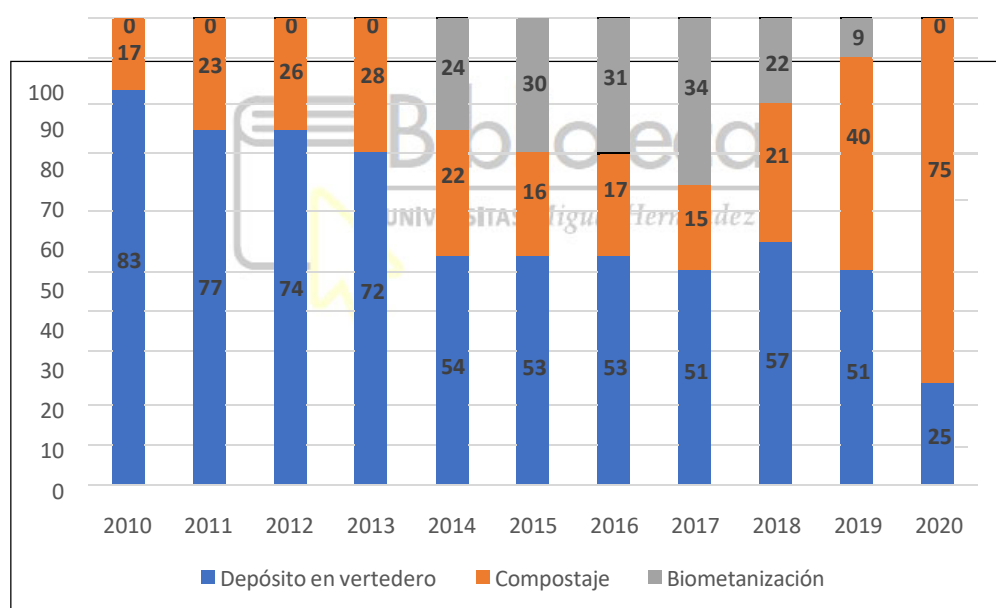
La evolución de las entregas de lodos de depuradora en COGERSA en los últimos años se presenta a continuación, si bien la determinación de la materia seca total es muy difícil de obtener, ya que no se mantienen los datos de porcentaje de materia seca entre las distintas plantas; y en función de parámetros de funcionamiento una misma planta pueden variar los niveles de humedad a lo largo del año.

### **1.2.2. MODELO DE GESTIÓN ACTUAL**

Las cantidades de lodos generados en las depuradoras públicas urbanas del Principado de Asturias, llegan en su totalidad a COGERSA en sus instalaciones de Serín, mediante acuerdo con el Consorcio de Aguas de Asturias, entidad que tiene encomendada la explotación de todo el sistema público de saneamiento de Asturias y mediante acuerdo con el Ayuntamiento de Gijón.

En cuanto al destino de los lodos en Asturias, tal como refleja la **Figura 1.3.**, existen dos alternativas de valorización y una de eliminación con depósito en vertedero. El compostaje se viene realizando desde el año 2010 y en el año 2019 se inauguró una planta con una capacidad de tratamiento de lodos por compostaje de 49.000 t/año. El lodo se trató también en la planta de biometanización desde su puesta en marcha en 2014 hasta mediados de 2019 en que pasó a tratar únicamente FORS que era su función original.

Durante el año 2020 se llegó a tratar mediante compostaje un 75% de los lodos EDAR recibidos para su gestión, el resto se depositó en vertedero de residuos no peligrosos.



**Figura 1.3.** % Tratamiento final de los lodos de depuración en Asturias.

**Fuente:** COGERSA / CIOTMA

El Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) establece los siguientes objetivos para el año 2020 en relación con el destino final de los lodos de depuración una vez tratados: un 85 % de valorización material y un 15 % de eliminación mediante incineración/coincineración y depósito en vertedero (7 % máximo). La situación en Asturias, si bien presenta una evolución positiva, no cumple lo estipulado en el PEMAR para el año 2020, por lo que deberán realizarse

ampliaciones o implementar otras opciones de valorización ya descritas en el propio PERPA (planta de secado solar de lodos).

De los lodos compostados en la planta de COGERSA se obtuvo una enmienda orgánica-compost que se comercializó a través de una empresa concesionaria. El compost producido está inscrito en el Registro de Fertilizantes del ministerio con la denominación "COMPOST COGERSA AERO" y se emplea como enmienda para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en cultivos de cereales y forraje en la Comunidad de Castilla-León.

### **1.3. COMPOSTAJE DE LODOS DE DEPURADORA**

#### **1.3.1. DESCRIPCIÓN**

Los lodos provenientes de las EDAR contienen organismos patógenos y materia orgánica sin estabilizar. En caso de uso agrario directo, podrían llegar a contaminar las aguas subterráneas. Por lo tanto, para poder utilizar estos lodos en aplicaciones agrícolas, se necesita someterlos previamente a un proceso de compostaje para estabilizarlos, es decir, para reducir patógenos, y para mejorar la calidad de la materia orgánica, produciendo así ácidos húmicos que tienen mejores propiedades para la agricultura. Con ello, se conseguirá paliar los efectos negativos sobre el medio ambiente y los seres vivos, además de conseguir la homogeneización de los residuos orgánicos, consiguiendo también la reducción de su masa y su volumen.

El compostaje es un proceso biológico aerobio, es decir, que tiene lugar en presencia de oxígeno. Bajo condiciones controladas de aireación, humedad y temperatura, los residuos orgánicos degradables se descomponen gracias a la actividad de microorganismos como los hongos y bacterias, transformándose en compost, un material estable e higienizado, libre de fitotoxinas y patógenos con propiedades húmicas, que se puede utilizar como enmienda orgánica, ya que es beneficioso para el suelo y el crecimiento de las plantas. Dicha higienización se consigue gracias al incremento de la temperatura, lo que hace que los agentes

patógenos finales sean mínimos, conociéndose como lodo higienizado aquel que se ha tratado de forma que los patógenos finales no sean detectables. Por otra parte, el grado de estabilidad es la medida en la que se ha descompuesto la materia orgánica fácilmente biodegradable.

Las ventajas del compostaje son muchas, lo que le convierte en una de las mejores opciones en la gestión de los residuos orgánicos, tanto ambientalmente como económicamente. Algunas de ellas son la calidad del compost como fertilizante, los innumerables beneficios que produce en el suelo, su estabilización microbiana, la eliminación de patógenos, de olores y de la humedad y la posibilidad de almacenarse durante periodos más largos que el lodo sin compostar. Además, su transporte es más barato y es más fácil de manejar.

Por otra parte, también tiene desventajas como son la necesidad de grandes superficies para la operación y el mantenimiento y el alto coste que esto conlleva, la necesidad de un agente estructurante para alcanzar la adecuada estructura y humedad, la adición de metales pesados al suelo y el aumento de la salinidad de éste.

Su uso como fertilizante mejora las propiedades químicas del suelo, como un aumento de la concentración de materia orgánica, nutrientes y biomasa microbiana y las propiedades físicas como la mejor retención del agua. Dichas propiedades son muy beneficiosas para poder recuperar los suelos degradados, favoreciendo también el retorno de la materia orgánica al suelo y su reinserción en los ciclos naturales.

El compostaje constituye un procedimiento adecuado para la valorización de los residuos orgánicos, incluyendo lodos de depuradora. Este sistema de tratamiento de residuos orgánicos reporta un beneficio ambiental ya que evita los riesgos de contaminación provocados por otras alternativas como, la incineración o el vertido y así facilitar un mejor aprovechamiento de la materia orgánica (Borja y col. 2004).

Los objetivos a alcanzar mediante el tratamiento de los lodos mediante compostaje serán:

- Estabilización de la materia orgánica.
- La higienización, mediante la eliminación de patógenos y semillas de malas hierbas.
- Reducción del peso y volumen de los materiales que se van a compostar.

Con estos objetivos el uso agrícola del producto final obtenido presentará efectos beneficiosos para el suelo y para los cultivos (Moreno Casco y col., 2008).

Los beneficios que reportará este tratamiento son:

- Descomponer y degradar los residuos (lodos de depuradora) ayudando a reducir su volumen y evitar su depósito en vertedero.
- El uso agrícola del compost mejora las condiciones del suelo y favorece el crecimiento de las plantas (Nevens y col., 2002).
- Respecto a otras tecnologías de tratamiento (digestión anaerobia) no requiere de una elevada inversión.

Dependiendo de los distintos factores como el sistema o la tecnología de la que se dispone tiene una duración variable, en la que se pueden distinguir dos etapas claramente diferenciadas:

### **Fermentación**

Es la etapa en la cual la fracción fácilmente biodegradable se degrada a una velocidad relativamente alta. Tanto la estabilización como la higienización se llevan a cabo en este periodo.

Durante la fase de latencia los microorganismos se aclimatan a su nuevo medio y comienzan a multiplicarse. Esta fase suele durar de dos a cuatro días y al final de ella la temperatura alcanza más de 50°C. A continuación, en la fase termófila los microorganismos iniciales son sustituidos por otros que viven a temperaturas altas. En esta fase alcanzan temperaturas más elevadas (de 50 a 70°C), lo cual elimina

gérmenes patógenos, larvas y semillas. La mayor parte de la materia orgánica biodegradable se transforma, estabilizándose la masa. Esta fase es la que necesita una mayor vigilancia para asegurar una buena higienización. Dependiendo de los residuos orgánicos de partida y de las condiciones ambientales, esta etapa puede durar de dos semanas a dos meses según la tecnología empleada.

### **Maduración**

Tiene lugar a temperatura ambiente. En esta etapa se producen complejas reacciones secundarias de condensación y de polimerización, las cuales dan lugar al humus como producto final. La etapa de maduración precisa de un período de tiempo variable pero habitualmente mayor que las etapas anteriores. Se detecta la presencia de sustancias dotadas de actividad antibiótica y la desaparición de patógenos.

#### **1.3.2. SISTEMAS DE COMPOSTAJE**

Los distintos sistemas de compostaje se diferencian en su nivel de complejidad, grado de control del proceso, método de ventilación empleado y que sean abiertos o cerrados. Los diferentes sistemas de compostaje se pueden agrupar en dos grandes tipos (Chica y García, 2008):

#### **Sistemas abiertos:**

**Compostaje en pilas estáticas:** formación de pilas de reducida altura, que se dejan sin movimiento. La aireación ocurre naturalmente a través del aire que fluye en forma pasiva a través de la pila. Puede producirse, en algunas zonas de la pila anaerobiosis, generando malos olores, gases y líquidos no deseables. Por esto se debe de tener especial cuidado en la realización de la mezcla inicial, eligiendo materiales que permitan tener una adecuada porosidad de la pila durante el proceso. Es un proceso lento y no permite la obtención de un producto de alta calidad.

**Compostaje en pilas de volteo o en hileras:** el material se amontona en pilas alargadas al aire libre. El tamaño y la forma de las pilas dependerá del clima,



material utilizado y la maquinaria disponible. Las pilas deben de ser 28 volteadas de forma regular, ya sea con maquinaria específica (volteadoras) o con pala cargadora.

**Compostaje en pilas estáticas aireadas en forma pasiva:** el material a compostar se dispone en pilas y su aireación se produce a través de una red de tuberías perforadas que están colocadas en la parte inferior de la pila. La altura recomendada de la pila es de 1 a 1,5 metros. Se coloca una cubierta porosa (compost maduro) para permitir un flujo adecuado de aire y así se evita la emisión de olores, ya que el compost presenta afinidad por las moléculas que lo causan y controla la humedad.

**Compostaje en pilas/trincheras aireadas forzosamente:** a diferencia del anterior, en este sistema se utiliza un ventilador que succiona aire hacia el exterior o lo inyecta al interior de la pila. Este tipo de compostaje necesita una serie de equipamientos, como ventiladores, red de tuberías, válvulas y sistema de control de presión de aire, temperatura y humedad, por lo que tiene un alto valor económico.

Existen variaciones de este sistema que cubren los residuos en fermentación con una membrana semipermeable que los aísla de la lluvia permitiendo la salida del vapor de agua y el dióxido de carbono, controla la emisión de gases generadores de olores y reduce casi completamente la emisión de lixiviados. este será el sistema elegido para el desarrollo de los ensayos y se describirá en el **Punto 3 (Materiales y Métodos)**.

### **1.3.3. VALORIZACIÓN AGRONÓMICA DEL COMPOST**

Antes de la aplicación agronómica del compost es necesario disponer de una caracterización de sus parámetros físico-químicos y microbiológicos que nos permita evaluar su aptitud para un determinado uso, cumpliendo unos requisitos básicos:

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

La valorización agrícola de los lodos estabilizados mediante compostaje puede realizarse mediante diferentes vías, atendiendo a unos objetivos concretos, entre los que cabe diferenciar su uso como:

- Enmienda orgánica
- Sustrato de cultivo

Para cada uno de estos usos (Ansorena, 2013) habrá que atender de forma específica a los factores más determinantes de su eficacia, tanto los derivados de las características del compost como los asociados al escenario edafoclimático y los requerimientos de los cultivos o vegetación. Asimismo, se deberá tener en cuenta el marco legislativo y normativa aplicable en cada caso.

Además del cumplimiento de los parámetros exigidos en la normativa, sea cual sea la valorización agrícola prevista para el compost, su uso y aplicación deberá atenderse a las buenas prácticas agrícolas, tal y como indican en el RD 506/2013 y el RD 865/2010. La evaluación de la aptitud de un compost para un determinado uso debe hacerse de forma integral, valorando todos los parámetros de forma conjunta (Iglesias y col., 2008; Masaguer y Benito, 2008; Huerta y col., 2010), dado que el comportamiento del compost va a depender de la interrelación e interacción de estos parámetros con el escenario suelo-planta-atmósfera.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general de este trabajo es, mediante la realización de distintos ensayos de compostaje a escala real, determinar cuál es la mezcla más adecuada de lodo EDAR y materiales estructurantes (podas trituradas y astilla de pallets) para la obtención un producto final - compost - que cumpla los parámetros de calidad exigidos en la normativa vigente sobre fertilizantes, con la máxima eficiencia del proceso en cuanto a rendimientos en el tratamiento de lodos EDAR.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Caracterización inicial de los distintos residuos con vistas a plantear una adecuada formulación de la mezcla inicial (humedad y porosidad, C/N) para el adecuado desarrollo del proceso.
- Elaboración de las mezclas de los diferentes ensayos en las proporciones previamente diseñadas.
- Control y seguimiento en todas las fases de los parámetros críticos para la correcta evolución del proceso de compostaje (aireación,  $T^a$ , humedad, pH).
- Seguimiento y evolución de los parámetros físico-químicos de la mezcla en distintas fases del proceso: inicio, fase intermedia de la fermentación, entrada a maduración y fin de maduración.

- Determinación de la calidad agronómica del fertilizante (compost) obtenido en cada ensayo según las especificaciones del marco legal vigente.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. SISTEMA DE COMPOSTAJE EMPLEADO**

Se ejecuta un sistema de compostaje en trinchera ventilada cubierta con membrana semipermeable, con una maduración posterior en pilas dentro de una nave cubierta. En la **Figura 3.1.** se puede observar una fotografía general de las instalaciones empleadas: zona de fermentación en trincheras (los ensayos se realizan en las cinco primeras por la derecha), nave de maduración abierta, zona de mezcla y labores de carga de compost final.



**Figura 3.1.:** Trincheras ventiladas con cubierta semipermeable, nave de maduración, labores de mezclado y de carga de compost.

**Fuente:** COGERSA

Durante el proceso se controlan las condiciones a nivel de aireación, temperatura y humedad en las que deberá estar el sustrato durante el proceso que tendría dos fases: fermentación en trinchera ventilada con una duración aproximada de 30 días, y maduración en pila estática en nave cubierta durante 10 días más.

Se cuenta para ello con 5 trincheras de hormigón con su correspondiente ventilador, lonas y maquinaria para su manejo, y sondas de temperatura, maquinaria móvil para el trasiego de materiales y una nave cubierta (abierta por los laterales) para la maduración final, cribado y almacenamiento.

Los Ensayos planteados en este TFM se han desarrollado en la planta de compostaje de lodos EDAR propiedad del consorcio público COGERSA (Consortio para la Gestión de Residuos en Asturias) y situada en el Centro de Tratamiento de Residuos de La Zoreda en Gijón - Asturias.

La planta entró en funcionamiento en agosto de 2019 estando diseñada para el tratamiento mediante compostaje de 49.000 t/año de lodos EDAR. Para ello cuenta con 14 trincheras de hormigón de dimensiones 40 m de longitud y 10 m de anchura con una altura media de llenado de 2,5 m. Se trata de trincheras con ventilación forzada mediante 5 canales integrados en la solera de hormigón, asegurando de esta forma la correcta distribución de aire por todo el volumen de la mezcla a compostar.

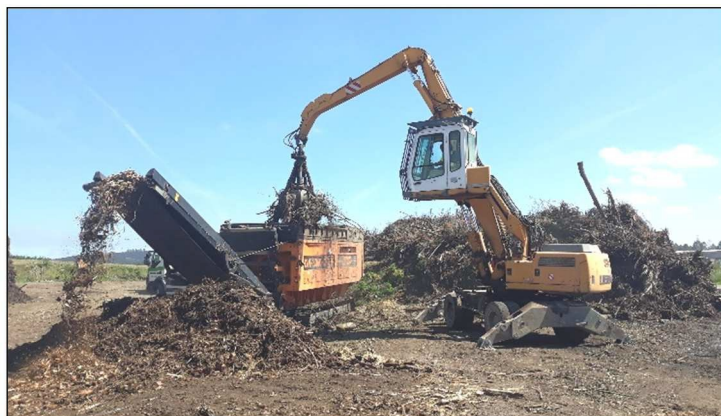
Los ensayos se han realizado a escala real utilizando 5 de las 14 trincheras en producción, siempre bajo la premisa de que las mezclas establecidas cumplieran con los estándares mínimos de producción y calidad del producto final (compost) que ya se cumplen con la dinámica de trabajo habitual (Ensayo 1).

El sistema de compostaje a desarrollar para los ensayos propuestos consta de las siguientes etapas:

### **3.1.1. PRETRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS**

Antes del comienzo del sistema de compostaje propiamente dicho, es necesario realizar unos trabajos de pretratamiento de los residuos orgánicos que se van a utilizar como estructurante, reduciendo su tamaño mediante una trituradora de

rotación lenta (**Figura 3.2.**), obteniendo un tamaño final de la astilla y vegetales triturados de un 80% < 120 mm con un 50 % entre 50 y 100 mm, este tamaño de partícula mezcla bien con el lodo, obteniéndose una mezcla porosa con buena estructura que permite la circulación de aire y resiste la compactación.



**Figura 3.2.** Trituración de estructurante con trituradora de rotación lenta.

Fuente: elaboración propia

Estos residuos, una vez triturados, se acopian diferenciados en un área cercana a la nave de descarga de lodo.

### **3.1.2. PREPARACION DE LA MEZCLA**

Los ensayos se diseñaron en base a la obtención de una mezcla de compostaje de características adecuadas para su comparación con la que se viene ejecutando (Ensayo 1), buscando obtener datos de cuál sería la más adecuada en parámetros de rendimiento cumpliendo la calidad normativa exigida.

Las mezclas se realizan dosificando cada uno de los ingredientes mediante una pala cargadora con cucharón de 6 m<sup>3</sup>. Posteriormente, como se muestra en la **Figura 3.3.**, se removerá también con la cargadora hasta obtener una mezcla homogénea.



**Figura 3.3.** Mezclado de residuos con pala cargadora

**Fuente:** elaboración propia



**Figura 3.4.** Carga de mezcla a trinchera con pala cargadora

**Fuente:** elaboración propia

### **3.1.3. CARGA DE LA TRINCHERA DE COMPOSTAJE**

Como se observa en la **Figura 3.4.** el material ya mezclado se va colocando hasta su total llenado en el interior de la trinchera de dimensiones 10 x 40 m, mediante una pala cargadora. La altura de la carga está alrededor de los 2,5 metros. El periodo de carga tiene que ser el más rápido posible con el fin de evitar diferencias de degradación y compactación a lo largo de la trinchera.

En el caso concreto de la planta de compostaje donde se realizan los ensayos, el volumen de entrada diaria de lodos nos permite realizar la mezcla y carga completa de una trinchera en un plazo máximo de 1,5 días, con un mínimo de 435 t por cada trinchera.

### 3.1.4. COLOCACIÓN / RETIRADA DE LA LONA SEMIPERMEABLE

Completada la carga, la mezcla de residuos orgánicos se cubre totalmente con la lona de cobertura semipermeable, que es extendida sobre la trinchera mediante un equipo móvil autopropulsado (uso común para todas las trincheras de la instalación), dirigido de forma inalámbrica, y que es capaz de enrollar y extender las lonas de forma rápida y segura.

Una vez concluida la colocación de la lona, ésta es fijada en las paredes laterales y en los extremos anterior y posterior con el fin de evitar fugas de olores durante el proceso. Ambas tareas se observan en la **Figura 3.5**.

Posteriormente se inicia el ciclo de fermentación con la puesta en funcionamiento del sistema de aireación.

Finalizada la fase de fermentación (30 días aproximadamente) se soltarán los anclajes laterales y se procederá a la retirada de la lona mediante el equipo móvil.



**Figura 3.5.** Trabajos de colocación de lona con equipo autopropulsado

*Fuente: elaboración propia*



### **3.1.5. VACIADO DE TRINCHERAS. FORMACIÓN DE PILA EN MADURACIÓN**

Una vez transcurridos los 30 días de fermentación en trincheras, se procede a la retirada de la lona y al traslado con pala cargadora (**Figura 3.6.**) de la mezcla ya fermentada a una zona de maduración, en nave con laterales abiertos, disponiendo el material en pilas (como las que se observan en la **Figura 3.7.**) durante unos 10 días. Si fuera necesario por exceso de humedad, se le dará un volteo previamente al cribado.



**Figura 3.6.** Inicio del vaciado de una trinchera

**Fuente:** elaboración propia



**Figura 3.7.** Formación en nave de maduración de una pila por Ensayo

**Fuente:** elaboración propia

### **3.1.5.1. POSTRATAMIENTO, CRIBADO Y ALMACENAMIENTO**

Finalizado el proceso de maduración a los aproximadamente 10 días desde su comienzo, se procede al cribado de éste mediante trómel rotativo con una luz de malla de 10 mm, como se observa en la **Figura 3.8.** Se obtiene por un lado el compost definitivo y por otro lado la porción mayor de 10 mm correspondiente al estructurante no descompuesto. Éste material, si presenta una granulometría y limpieza adecuadas, se recircula al principio volviendo a formar parte de la mezcla inicial. El compost obtenido se almacena bajo techo en la misma nave (**Figura 3.9.**)



**Figura 3.8.** Cribado final con trómel

*Fuente: elaboración propia*



**Figura 3.9.** Almacenamiento de compost listo para su expedición

*Fuente: elaboración propia*

### **3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL**

El objetivo general de este trabajo experimental es el de obtener conclusiones sobre qué mezcla de residuos orgánicos, dentro de los disponibles en la instalación, es la más adecuada para co-compostar junto a los lodos EDAR con el fin de alcanzar el mayor rendimiento posible, obteniendo un compost maduro con unas características adecuadas (cumplimiento de normativa de fertilizantes) para su valorización agronómica.

Para ello se han realizado cinco ensayos a escala real de co-compostaje de lodos EDAR con diferentes mezclas y proporciones de materiales estructurantes.

Para lograr el objetivo propuesto se plantea el siguiente diseño experimental de los ensayos dividido en las siguientes fases:

- 1ª: Caracterización inicial de los residuos orgánicos de partida.
- 2ª: Establecimiento de los ensayos, mezclas a compostar propuestas.
- 3ª: Análisis de los parámetros fisicoquímicos del material de inicio, durante el proceso de fermentación y del producto final (compost).

#### **3.2.1. RESIDUOS ORGÁNICOS DE PARTIDA**

Se efectúa una caracterización inicial de los residuos orgánicos de partida de forma que podamos conocer sus principales características fisicoquímicas, y con esos datos analíticos poder ajustar las diferentes mezclas para que la digestión aeróbica se desarrolle correctamente. Los residuos orgánicos de partida son:

- **LODOS DE EDAR (LD)**

El principal residuo orgánico a compostar es el procedente de las depuradoras de aguas residuales urbanas, clasificado con el código LER 180905 “*Lodos del tratamiento de aguas residuales urbanas*”.

Se trata de un lodo homogéneo en su composición, resultante de la mezcla diaria, en proporciones iguales, del lodo procedente de 6 de las principales EDAR (Villapérez, Maqua, La Reguera, San Claudio, Frieres y Baíña), que suponen el 90 % del lodo a gestionar.

El lodo llega a la planta de compostaje **Figura 3.10.** directamente desde las depuradoras en camiones con contenedores de caja cerrada (evita olores en el transporte) y se descarga en altura en una nave cerrada para su inmediato procesamiento.



**Figura 3.10.** Descarga de lodos EDAR

*Fuente: elaboración propia*

- **ASTILLA DE MADERA(AST)**

Se obtiene de la fracción vegetal consistente en madera natural obtenida por trituración a partir de pallets y cuya clasificación en la lista europea de residuos es 200138 *“Madera que no contiene sustancias peligrosas”*.

Se trata de un residuo orgánico con una baja biodegradabilidad, pero con excelentes cualidades como agente estructurante. Esta baja biodegradabilidad hace que al final del proceso (cribado) una buena parte del residuo no degradado aeróbicamente se pueda recircular como estructurante al inicio de un nuevo ciclo de compostaje.

Para la realización de los ensayos se empleará únicamente astilla nueva, es decir, no recirculada, de esta forma todas las mezclas utilizarán un residuo homogéneo con idéntico nivel de degradación.



**Figura 3.11.** Acopios de pallets y astilla triturada

*Fuente: elaboración propia*

- **RESIDUOS VEGETALES TRITURADOS (RVT)**

Se trata de la fracción vegetal de residuos municipales recogidos de forma selectiva, obtenida por trituración de los residuos biodegradables de parques y jardines, y en concreto, de restos de poda con un menos de un 30 % de césped. Su clasificación LER es 200201 "Residuos biodegradables".

Si bien se puede clasificar como un residuo de baja biodegradabilidad presentando buenas cualidades como estructurante, la presencia de partes verdes menos lignificadas hace que su degradabilidad sea mayor que la de la astilla de madera.

Al realizarse los ensayos de forma consecutiva en un breve espacio de tiempo la composición de residuos vegetales triturados se puede considerar muy homogénea (pueden darse variaciones estacionales en la composición).



**Figura 3.12.** Acopio de residuos vegetales triturados

**Fuente:** elaboración propia

Con tiempo suficiente antes de calcular las mezclas, ejecutarlas y comenzar los ensayos propuestos, se tomaron muestras de todos los residuos orgánicos a utilizar. En cada uno de los acopios (pila de astilla, pila de vegetales triturados y lodos) (**Figura 3.10.**, **Figura 3.11.** y **Figura 3.12.**), se recogió una submuestra en diferentes puntos mediante pala cargadora, se homogeneizaron por separado y por el método del cuarteo se obtuvo la muestra final de cada uno que se envió al laboratorio propio de la empresa para su caracterización.

### **3.2.2. ESTABLECIMIENTO DE LOS ENSAYOS. MEZCLAS PROPUESTAS**

Para el correcto desarrollo del proceso de compostaje la mezcla inicial debe tener una serie de características físicas y químicas de partida:

- Una adecuada porosidad del material que permita la circulación de aire.
- Una humedad adecuada entre 45 y 65 %.

En el momento de ejecutar las mezclas de los distintos Ensayos, estas se diseñarán de forma que cumplan los requisitos mínimos anteriormente planteados.

No se realiza ningún planteamiento inicial sobre la C/N.

### **3.2.3. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL MATERIAL DE INICIO, DURANTE EL PROCESO Y DEL PRODUCTO FINAL.**

En las muestras de los residuos orgánicos de partida, se analizó en el laboratorio interno de la empresa:

- Humedad
- Materia orgánica
- Carbono orgánico
- Nitrógeno total
- Relación C/N
- pH
- Conductividad eléctrica

Durante el transcurso del proceso de compostaje de las mezclas de inicio a fin se realizan una serie de analíticas en varios momentos que nos proporcionan información sobre la evolución de las mezclas:

- Parámetros asociados al propio proceso: temperatura, humedad, pH.
- Parámetros asociados a la naturaleza del sustrato: materia orgánica, carbono orgánico total, nitrógeno total y relación C/N.

### **3.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LOS ENSAYOS**

En este apartado se exponen los pasos seguidos para la realización de los ensayos planteados, desde la mezcla de los residuos de partida, al seguimiento de los parámetros del proceso y la metodología empleada:

- Características de los residuos de partida.
- Mezclas propuestas para cada ensayo.
- Seguimiento de los parámetros de control y de los fisicoquímicos.
- Muestreo del material y otras operaciones realizadas.

### 3.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS DE PARTIDA

Las características intrínsecas que presentan los distintos tipos de residuos orgánicos hacen que muy pocos de ellos presenten valores iniciales adecuados para su tratamiento, debiendo co-compostarse mezclados con otros residuos orgánicos.

En la **Tabla 3. 1.** se muestran los resultados de los análisis efectuados a los residuos orgánicos que forman parte de las mezclas a ensayar:

	<b>AST</b>	<b>RVT</b>	<b>LD</b>
<b>Humedad (%)</b>	15,10	37,80	81,00
<b>CE (dS/m)</b>	3,80	6,50	4,23
<b>MO (%)</b>	97,90	75,80	77,00
<b>Cot (%)</b>	56,79	43,97	44,66
<b>NT (%)</b>	0,40	1,83	7,60
<b>C/N</b>	142	24	5,9
<b>pH</b>	7,60	6,50	6,62
<b>Densidad Ap (t/m<sup>3</sup>)</b>	0,30	0,48	0,90

**AST:** Astilla de madera triturada

**RVT:** Residuos vegetales triturados

**LD:** Lodo EDAR

**Tabla 3.1.** Parámetros analíticos de los residuos orgánicos empleados

**Fuente:** elaboración propia



El ingrediente principal en los ensayos estudiados es el lodo, utilizándose los otros residuos como material estructurante para la mejora de la porosidad, características estructurales y reguladores de la humedad.

Todos los residuos empleados presentan altos porcentajes de materia orgánica destacando la astilla de madera con un 97,90 %.

El lodo EDAR utilizado como residuo principal presenta una humedad del 81 % que le da una consistencia pastosa. Los residuos estructurantes presentan humedades más bajas destacando el 15,10 % de la astilla por lo que se buscará una mezcla que permita unos valores aceptables para el inicio del compostaje

### **3.3.2. MEZCLAS**

El objetivo general planteado es determinar cuál de las mezclas propuestas para cada ensayo a escala real permite obtener un producto final, compost, que cumpla los parámetros de calidad exigidos en la normativa vigente sobre fertilizantes con la máxima eficiencia del proceso en cuanto a rendimientos en el tratamiento de lodos EDAR.

Se plantean 5 mezclas con diferentes proporciones en volumen de lodos procedente de EDARs y materiales estructurantes:

- **Ensayo 1:** Madera triturada + lodos, 2:1 v/v.
- **Ensayo 2:** Madera triturada + lodos, 3:2 v/v
- **Ensayo 3:** Madera triturada + poda triturada + lodos, 1:1:1 v/v/v
- **Ensayo 4:** Madera triturada + poda triturada + lodos, 2:1:2 v/v/v
- **Ensayo 5:** Madera triturada + poda triturada + lodos, 1:2:2 v/v/v

La primera de ellas (Ensayo 1) sería la mezcla tipo que se viene ejecutando en la instalación industrial en la que se van a desarrollar los ensayos, y que en esa proporción tiene un contenido adecuado de humedad, estructura bien, dando una adecuada porosidad que permite una homogénea distribución del aire y una correcta fermentación aerobia.

Con las demás mezclas se pretende analizar si con un mayor porcentaje de lodo en la mezcla (Ensayos 2, 4 y 5), y utilizando restos vegetales triturados que están menos lignificados que la astilla, se mantiene la correcta aireación necesaria sin alargar los periodos de fermentación y manteniendo o elevando la calidad del compost final.

El Ensayo 3 tiene la misma proporción de lodos que el tipo que se viene realizando; únicamente se sustituye un volumen de astilla de madera por restos vegetales triturados.

El homogeneizado de los diferentes residuos que forman la mezcla a compostar se realiza, primero dosificando mediante el volumen conocido ( $6 \text{ m}^3$ ) del cucharón de la pala cargadora cada dosis planteada y, posteriormente, mediante cargas y descargas sucesivas hasta lograr una completa mezcla de los residuos.

### **3.3.3. SEGUIMIENTO DEL PROCESO DE COMPOSTAJE**

A lo largo de todo el proceso de fermentación se realizó el seguimiento de parámetros fundamentales para el correcto desarrollo del compostaje como son el correcto funcionamiento de la aireación, la temperatura y la humedad.

Se toman datos diarios de temperatura mediante una sonda clavada en el sustrato, para observar su evolución a lo largo de la fermentación.

Para el control de la aireación se comprueba el correcto funcionamiento de los ventiladores y de los temporizadores de arranque y parada, verificando el hinchado de las lonas con cada arranque lo que revela la correcta aireación del material alojado dentro de la trinchera, como se aprecia claramente en la **Figura 3.13**.



**Figura 3.13.** Efecto de hinchado de la lona durante la ventilación

**Fuente:** elaboración propia

Para el seguimiento de los parámetros relativos a la naturaleza del sustrato, cada una de las mezclas se muestrea en cuatro momentos del proceso:

- Inicio del proceso.
- Mitad del ciclo de fermentación (aproximadamente a los 15 días del inicio).
- Final de la fermentación con el traslado de las mezclas a la fase de maduración.
- Posterior al cribado final, unos 10 días después de iniciada la maduración.

La duración del proceso de compostaje planteado será pues de unos 40 días.

### 3.3.4. **MUESTREO DEL MATERIAL**

Los ingredientes de partida se muestrean cada uno en su correspondiente acopio.

Los diferentes Ensayos en trincheras se muestrean en cada una de las siguientes etapas del proceso de compostaje:

- Inicial: se recoge una vez homogeneizada la mezcla de los diferentes residuos y antes del comienzo de la carga de la trinchera.
- Mitad del proceso de fermentación: aproximadamente a los 15 días de iniciada la fermentación en trinchera se retirará parcialmente la lona como se observa en la **Figura 3.14.**, apartando material de la cabeza y tomando muestra con la pala cargadora en varios puntos. Se mezclarán intensamente hasta su homogeneización.



**Figura 3.14.** Muestreo en la fase intermedia de la fermentación

**Fuente:** elaboración propia

- Finalizada la fermentación: se vacían las trincheras formándose pilas en la nave de maduración. Este trasiego se realiza mediante pala cargadora.
- Finalizada la maduración y con ella el proceso de compostaje, se criba de la pila correspondiente a cada ensayo una muestra obtenida de submuestras elementales de cada una de ellas, obteniéndose como se ve en la **Figura 3.15.** una muestra representativa de cada ensayo.



**Figura 3.15.** Muestras de compost final representativas de cada ensayo

**Fuente:** elaboración propia

Los ensayos se realizaron a escala real con más de 600 t de material en cada trinchera por lo que de acuerdo al Reglamento (CE) N° 2003/2003:

- ✓ Trincheras o pilas de más de 80 toneladas se tomarán como mínimo 40 muestras elementales.

En la **Tabla 3.2.** se pueden ver las fechas de las distintas fases del proceso en las que se tomaron las distintas muestras.

<b>FASES</b>	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 3</b>	<b>Ensayo 4</b>	<b>Ensayo 5</b>
<b>Inicio</b>	05/05/2020	07/05/2020	11/05/2020	14/05/2020	18/05/2020
<b>1/2 Fermentación</b>	25/05/2020	26/05/2020	27/05/2020	29/05/2020	01/06/2020
<b>Maduración</b>	08/06/2020	09/06/2020	11/06/2020	15/06/2020	16/06/2020
<b>Compost Final</b>	02/07/2020	02/07/2020	02/07/2020	08/07/2020	02/07/2020

**Tabla 3.2.** Fechas de muestreos para cada ensayo

*Fuente: elaboración propia*

## **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El compostaje se basa en la acción de diversos microorganismos aerobios (Haug, 1993), que actúan de manera sucesiva sobre la materia orgánica original en función de la influencia de determinados factores, produciendo elevadas temperaturas, reduciendo el volumen y el peso de los residuos y provocando su humificación y oscurecimiento (Nakasaki, 2005). Durante este proceso se han de controlar los distintos factores que aseguren una correcta proliferación microbiana y, por consiguiente, una adecuada mineralización de la materia orgánica (Cronje y col., 2003).

### **4.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS**

#### **4.1.1. PARÁMETROS ASOCIADOS AL PROPIO PROCESO DE COMPOSTAJE**

##### **4.1.1.1. HUMEDAD**

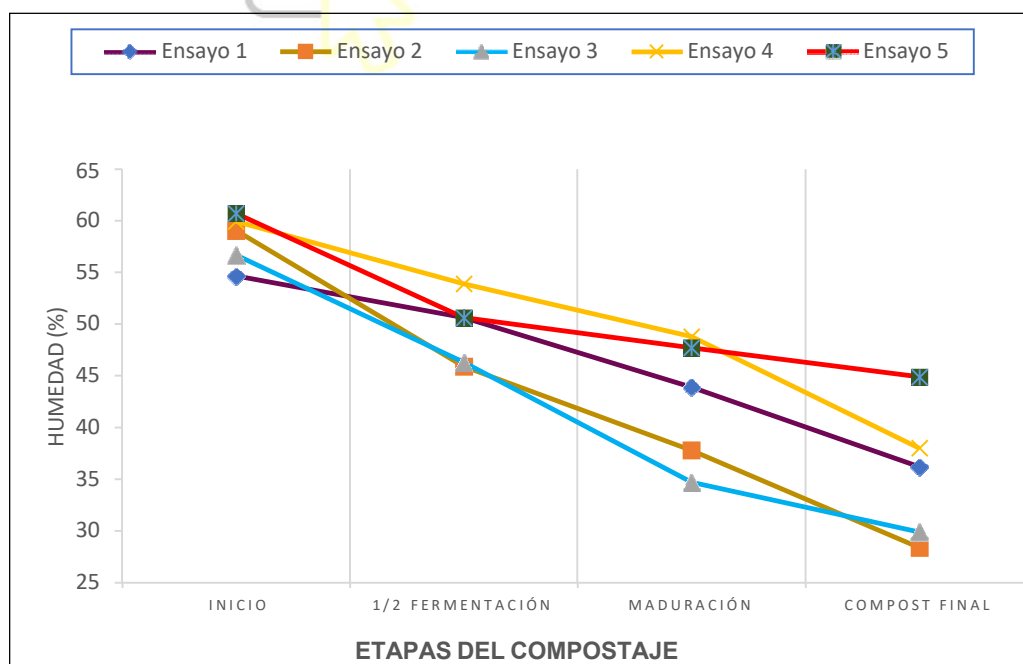
Para que el proceso de compostaje se realice de forma óptima, la mezcla inicial debe tener un contenido de humedad con valores de entre 45-65% (Bueno Márquez y col, 2008).

La alta humedad inicial del lodo de EDAR (81%) como principal ingrediente de las mezclas, hace que ésta se equilibre a valores adecuados para el compostaje al mezclarlo junto a materiales estructurantes con una humedad mucho menor (15,10% para la astilla y 37,80% para los vegetales triturados).

La aireación y las altas temperaturas alcanzadas durante la fermentación hacen que vaya disminuyendo su valor a medida que avanza el proceso por la pérdida de agua por evaporación.

El diseño cerrado de este tipo de sistema de compostaje no permite la corrección de la humedad en fases intermedias de la fermentación por lo que es fundamental ajustar bien inicialmente en la fase de mezclado.

Como se observa en la **Figura 4.1.**, todas las mezclas de los distintos ensayos presentan valores iniciales adecuados para el desarrollo del proceso de compostaje, estando agrupados con solo una diferencia de un 6,1 % entre la humedad más baja y la más alta.



**Figura 4.1.** Evolución de los valores de la humedad de los Ensayos

Fuente: elaboración propia

Este sistema de compostaje en trincheras cubiertas con membrana semipermeable permite la salida del CO<sub>2</sub> y del vapor de agua a través de ella de forma paulatina, lo que tiene como consecuencia, como se puede ver en la **Figura 4.1.**, que las pérdidas de humedad entre las fases intermedias no sean muy altas, también interviene el que esta cobertura mantiene el sistema aislado de las inclemencias meteorológicas que pudieran causar un aumento de la humedad o un descenso de la temperatura. Las pérdidas de humedad se deberán únicamente a la dinámica del proceso.

En todos los ensayos, partiendo de valores iniciales muy igualados, la evolución posterior no tiene marcadas diferencias según la mezcla que lo compone; no obstante:

- La mezcla tipo (Ensayo 1) 1:2 v/v, presenta una evolución descendente muy lineal en las dos primeras fases, acentuándose el descenso durante la maduración hasta alcanzar un valor final de 36,2 %, que está dentro del valor adecuado para el cumplimiento de la normativa de fertilizantes (RD 506/2013) que indica que el compost final debe tener humedades  $\leq 40$  %.
- El Ensayo 2, 3:2 v/v, el compost final presenta el valor de humedad menor de todas las mezclas estudiadas. La disminución es constante en todas las fases hasta llegar al 28,4 %.
- El Ensayo 3, compuesto por una mezcla a partes iguales 1:1:1 v/v/v de astilla, residuos vegetales triturados y lodo., presenta un buen descenso cercano al Ensayo1 (29,9 %); el descenso es el más acentuado en las dos primeras fases ralentizándose en la maduración.
- El Ensayo 4, compuesto por una mezcla de astilla, vegetales triturados y lodos en proporción 2:1:2, v/v/v, dando un resultado final (38 %) ligeramente superior al Ensayo1 (tipo), presenta un menor ritmo de descenso en las dos primeras fases, acentuándose en la fase de maduración.



- El Ensayo 5, compuesto por una mezcla de astilla, vegetales triturados y lodos en proporción 1:2:2 v/v/v, da el resultado final más desfavorable 44,9 % que está por encima del valor máximo exigido para el compost en la normativa de fertilizantes (RD 506/2013) que es de  $\leq 40$  %.

El mayor porcentaje de humedad en el compost final (**Figura 4.1.**) del Ensayo 5 es consecuencia de la mayor proporción en su mezcla de residuos vegetales que cuentan con mayor humedad que la astilla, como se refleja en la **Tabla 3.1.**, este valor de la humedad podría haberse reducido aumentando la aireación (Haug, 1993).

#### **4.1.1.2. TEMPERATURA**

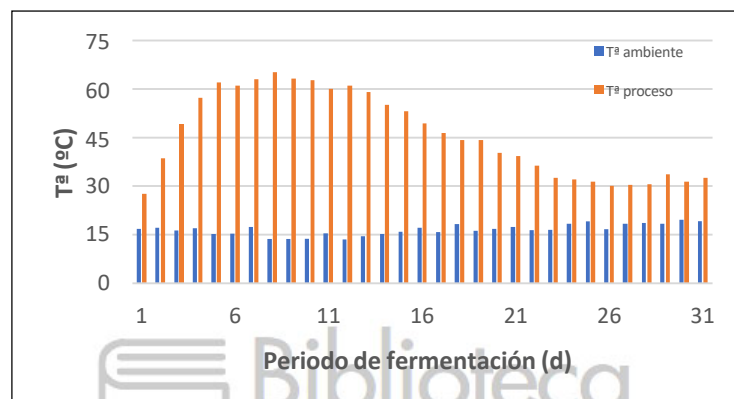
La temperatura es el parámetro más utilizado para seguir el proceso de compostaje, en parte debido a su facilidad de medición. Se toman los datos de la mediante sondas clavadas en el sustrato que van reportando valores al sistema de control donde se puede ver la medida inmediata y escoger el intervalo de tiempo en que guarda los valores.

El valor de la temperatura en las trincheras a lo largo del proceso proporciona información sobre la actividad microbiana imprescindible para el desarrollo de la fermentación aeróbica y por tanto sus variaciones pueden indicar alteraciones de la misma. Un aumento de la temperatura indica un buen desarrollo del proceso y un valor bajo o un descenso en las primeras fases indicaría algún problema como una insuficiente aireación.

En este sistema en trincheras sin volteos no se producen grandes cambios cíclicos de la temperatura después de cada volteo; al permanecer el material estático durante el mes de fermentación, sube hasta la fase termófila y después va bajando paulatinamente a medida que va disminuyendo la materia orgánica fácilmente

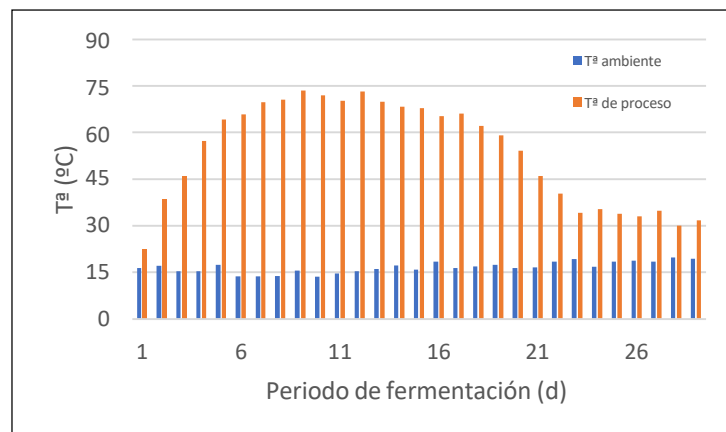
biodegradable. En caso de necesitarse incrementar o bajar la temperatura, ésta se puede manejar mediante la gestión de los tiempos de ventilación.

Se obtiene una temperatura media de los datos recogidos cada día y a partir de ellos un perfil de temperatura que se compara con la del ambiente para cada uno de los ensayos:



**Figura 4.2.** Evolución de la  $T^a$  durante la fermentación en el Ensayo 1

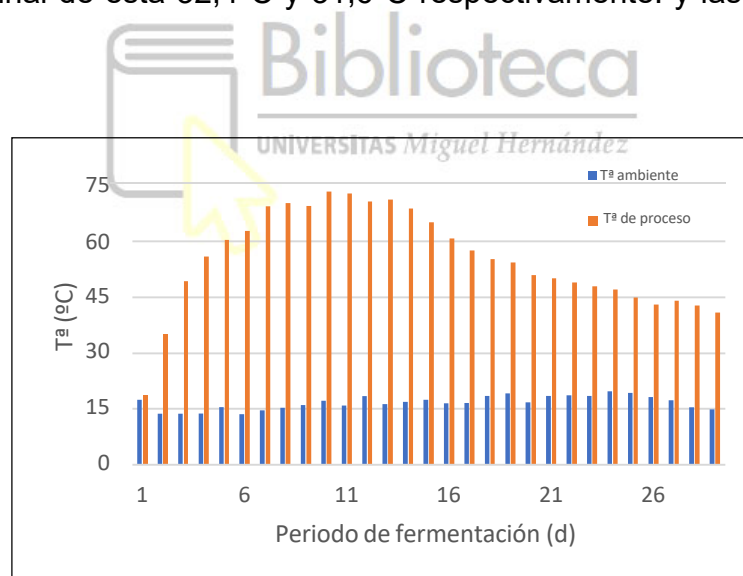
**Fuente:** elaboración propia



**Figura 4.3.** Evolución de la  $T^a$  durante la fermentación en el Ensayo 2

**Fuente:** elaboración propia

En las **Figuras 4.2 y 4.3** se muestra la evolución de la temperatura en los Ensayos 1 y 2. Estos dos ensayos tienen en común que están compuestos por dos únicos ingredientes: lodos EDAR y astilla de madera procedente de la trituración de pallets. Se observa que presentan inicialmente evoluciones similares alcanzando temperaturas de rango termofílico ( $>50^{\circ}\text{C}$ ) a partir del 4º día de fermentación. El Ensayo 1 se mantiene en ese rango durante 12 días, alcanzando una temperatura máxima de  $65,2^{\circ}\text{C}$ ; el Ensayo 2 se mantuvo durante 17 días alcanzando  $73,6^{\circ}\text{C}$ . El Ensayo 1 tiene mayor volumen de estructurante y menor de lodos (66 a 33%) frente al Ensayo 2 con menos estructurante y más lodo (60 a 40%). En este último, al ser menos poroso, el aire circula peor y tarda más tiempo en comenzar la fermentación y alcanzar la fase termófila. Ambos ensayos alcanzan temperaturas de higienización que posteriormente van descendiendo, más paulatino el Ensayo 1 y más brusco el Ensayo 2, hasta el fin de la fermentación (29 días en ambos casos), alcanzando al final de ésta  $32,4^{\circ}\text{C}$  y  $31,6^{\circ}\text{C}$  respectivamente. y las medias  $49,5^{\circ}\text{C}$  y  $49,6^{\circ}\text{C}$ .

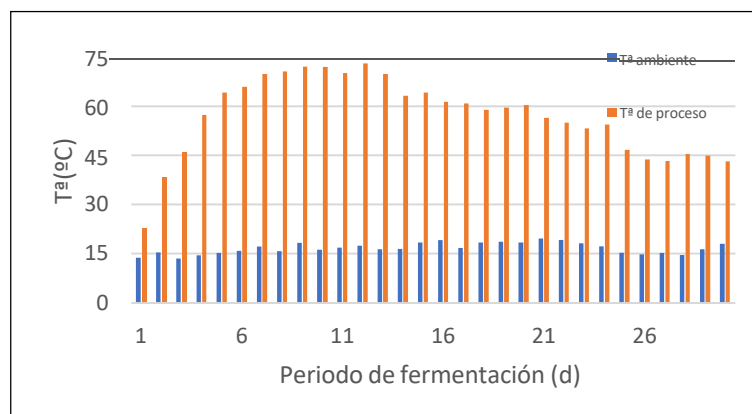


**Figura 4.4.** Evolución de la  $T^a$  durante la fermentación en el Ensayo 3

**Fuente:** elaboración propia

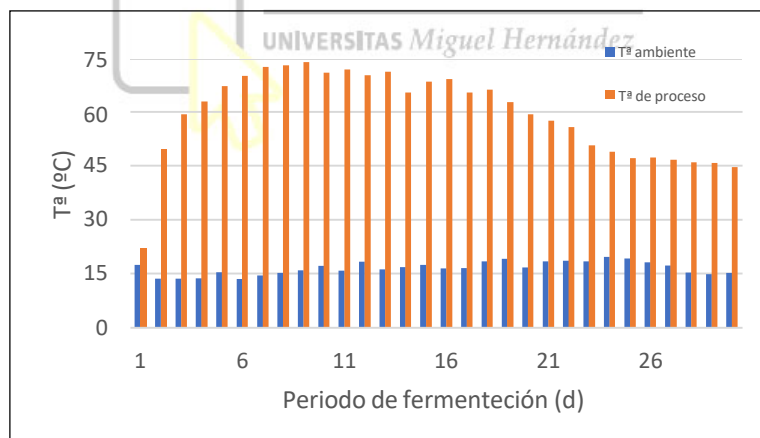
El Ensayo 3 tiene en su composición la misma proporción de lodos que el 1, si bien un volumen de astilla de este primero se sustituye por un volumen de restos vegetales triturados que son más biodegradables que la astilla, esto hace que después de alcanzar la fase termófila el descenso de temperatura sea más lento,

llegando al final del proceso con un nivel térmico mayor ( $40,8^{\circ}\text{C}$ ) que el Ensayo 1 para el mismo volumen de lodo. Permaneció en el periodo 13 días por encima de  $60^{\circ}\text{C}$ , alcanzando  $73,4$  de máxima con una media de temperatura durante la fermentación de  $54,6^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 4.5** Evolución de la  $T^a$  durante la fermentación en el Ensayo 4

**Fuente:** elaboración propia



**Figura 4.6.** Evolución de la  $T^a$  durante la fermentación en el Ensayo 5

**Fuente:** elaboración propia

Los Ensayos 4 y 5, al igual que la mezcla del Ensayo 2, llevan un 40% de lodo mezclado con 60% de materiales estructurantes.

En el Ensayo 4 se sustituye un volumen de astilla por un volumen de vegetales triturados (20%). Esto hace que la evolución térmica a lo largo de la primera mitad

del proceso de fermentación se asemeje a la del Ensayo 2. El descenso de temperatura en la segunda mitad del proceso es más lento por la biodegradabilidad del estructurante vegetal, llegando al final con una temperatura de 43°C.

El Ensayo 5 al igual que el 2 y el 4 lleva en su composición un 40% de lodo, otro 40% de residuos vegetales y tan solo un 20% de astilla de madera (es el Ensayo que menos lleva). Es por tanto esta mezcla la que lleva en su composición una mayor cantidad de materiales orgánicos fácilmente biodegradables. Esto hace que suba su temperatura rápidamente manteniéndose a temperaturas de más de 60°C (máxima de 73,9°C) durante 16 días. El descenso se produce más lentamente llegando al final del proceso con 44,7°C.

Para analizar de forma más objetiva la influencia de las mezclas en cada uno de los diferentes ensayos, se calculan las áreas de las curvas de la temperatura de proceso y de la temperatura ambiente para cada uno de ellos. La diferencia entre ambas aporta información sobre el calor generado durante la evolución del proceso de fermentación. Como podemos observar en la **Tabla 4.1.**, este valor obtenido dividido entre la cantidad de materia orgánica aportada al principio del proceso proporciona un indicador de la potencialidad de calentamiento de cada mezcla ensayada.

	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 3</b>	<b>Ensayo 4</b>	<b>Ensayo 5</b>
<b>Área curva de Tª proceso</b>	495,4	498,1	494,9	484,9	488,0
<b>Área curva Tª ambiente</b>	1390,0	1542,0	1631,3	1672,5	1772,0
<b>Diferencia</b>	894,6	1044,0	1136,4	1187,7	1284,0
<b>MO inicio de proceso (%)</b>	85,3	83,9	80,3	83,7	78,6
<b>Indicador</b>	10,5	12,4	14,1	14,2	16,3

**Tabla 4.1.** Cálculo del calor generado en la fase de fermentación y su ponderación con respecto al porcentaje de materia orgánica existente en la mezcla de partida

**Fuente:** elaboración propia

El indicador obtenido en la **Tabla 4.1.** refleja la influencia de la presencia como ingrediente de la mezcla de los residuos vegetales triturados (Ensayos 3, 4 y 5) y el peso que tiene el mayor porcentaje de estos por ser más lentamente biodegradables que los lodos dado su contenido en celulosas y ligninas, incrementando por tanto las temperaturas en la fase termófila y manteniendo una alta actividad durante más tiempo.

El seguimiento de los perfiles térmicos de los procesos de compostaje permite evaluar la higienización de los compost finales. Para ello se debe evidenciar que cada Ensayo ha alcanzado un perfil temperatura-tiempo según establece el Reglamento UE 2009/2019:

- 70 °C o más durante al menos 3 días
- 65 °C o más durante al menos 5 días
- 60 °C o más durante al menos 7 días
- 55 °C o más durante al menos 14 días

Todos los Ensayos cumplen alguno o varios de estos criterios.

#### **4.1.1.3. pH**

El valor del pH durante la fermentación aporta información sobre la evolución del proceso. Independientemente de la naturaleza del sustrato de partida.

Valores de pH inferiores a 3 o superiores a 11 causan severas limitaciones en los metabolismos microbianos y por tanto, en el proceso de compostaje. En bibliografía se indica que el intervalo óptimo de funcionamiento del proceso de compostaje está situado entre 6 y 9 (Fitzpatrick, 1993; Nakasaki y col., 1993).

El valor inicial del pH en todas las mezclas, como se observa en la **Tabla 4.2.**, estuvo dentro del intervalo de valores que se pueden considerar adecuados (pH entre 6 y 9) para el desarrollo de las bacterias y hongos que degradan la materia orgánica durante el proceso de compostaje (Moreno Casco y Mormeneo, 2008).

En los ensayos donde los vegetales triturados forman parte de la mezcla (Ensayos 3, 4 y 5) apenas hay variación en los valores del pH en las distintas fases. En las que solo se usa astilla como estructurante (Ensayos 1 y 2) se observa un ligero descenso al final del proceso dando valores ligeramente inferiores a 8 (7,4 y 7,8 respectivamente) en el compost maduro.

	<i>Ensayo 1</i>	<i>Ensayo 2</i>	<i>Ensayo 3</i>	<i>Ensayo 4</i>	<i>Ensayo 5</i>
<b>Inicio</b>	8,6	8,5	8,6	8,5	8,5
<b>1/2 Fermentación</b>	8,5	8,4	8,4	8,5	8,6
<b>Maduración</b>	8,4	8,6	8,8	8,5	8,5
<b>Compost Final</b>	7,4	7,8	8,2	8,6	8,5

**Tabla 4.2.** Valores del pH en las fases de compostaje estudiadas de los diferentes ensayos.

*Fuente: elaboración propia*

Se puede apreciar en la **Tabla 4.2.** que los rangos de pH de los compost finales son en todos los casos ligeramente alcalinos, acercándose más a la neutralidad los compost procedentes de ensayos en los que solo se utiliza astilla como estructurante. Los Ensayos 1 y 2 al principio de la maduración muestran una temperatura menor que denota una menor actividad y mayor grado de madurez (**Figuras 4.2 y 4.3**) y el pH tiende a la neutralidad debido a la formación de compuestos húmicos que tienen propiedades tampón (Bueno, Díaz y Cabrera.2007).

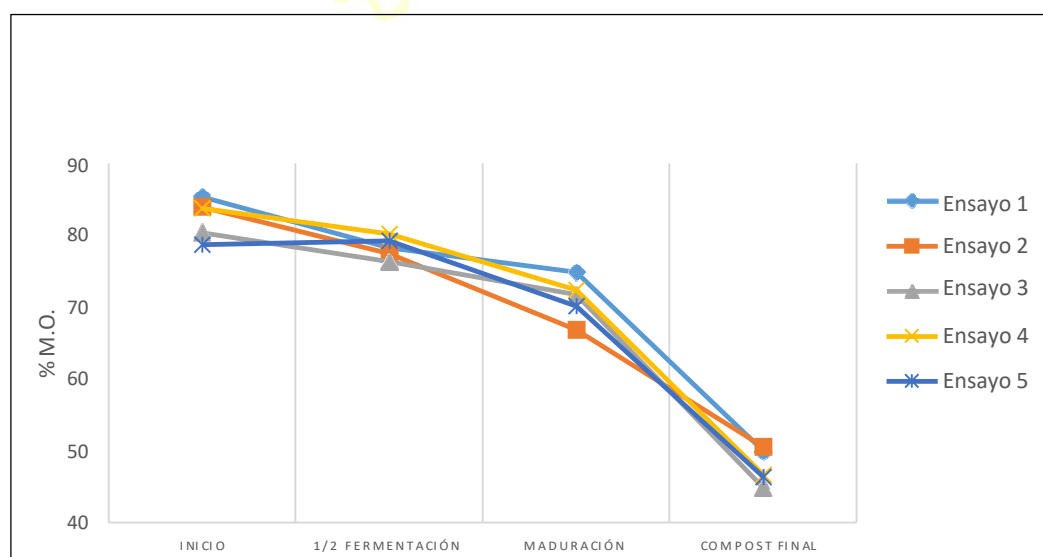
#### 4.1.2. PARÁMETROS RELATIVOS A LA NATURALEZA DEL SUSTRATO

Se plantea en este apartado aquellos parámetros que han de ser medidos y adecuados a sus valores correctos fundamentalmente al inicio del proceso (Madejón y col., 2001).

##### 4.1.2.1. MATERIA ORGÁNICA

El conocimiento del contenido de los compost en materia orgánica es fundamental, pues se considera como el principal factor para determinar su calidad agronómica (Kiehl, 1985).

El contenido de materia orgánica presente en el compost indica la naturaleza, más o menos orgánica que tiene la mezcla. A lo largo del proceso, la concentración de materia orgánica (MO) debe ir descendiendo debido a la descomposición que ocurre en la etapa de fermentación. El contenido final de MO en el compost dependerá del valor inicial, de su degradabilidad y de la transformación que hayan sufrido sus componentes durante el proceso.



**Figura 4.7.** Evolución de la MO en las fases de compostaje de los diferentes ensayos.

**Fuente:** elaboración propia



El contenido de materia orgánica disminuye a lo largo del proceso de compostaje como consecuencia de la mineralización que sufre la mezcla por parte de los microorganismos que actúan durante el proceso.

En los datos obtenidos de los análisis, como se aprecia en la **Figura 4.7.**, el contenido en MO desciende más acusadamente entre el valor al comienzo de la maduración y el valor obtenido en la analítica final del compost después del cribado. Este acusado descenso es debido sin duda a que en los momentos iniciales de muestreo (inicio, mitad del ciclo de fermentación e inicio de la maduración) la muestra caracterizada se obtuvo del conjunto del material en proceso, sin cribado, con el material estructurante de origen orgánico formando parte al completo de la muestra analizada (p. ej. la astilla de madera de la mezcla inicial tiene un contenido en MO del 97,90%). Por otra parte, la muestra de compost al final del proceso se analizó después del cribado con un trómel con una luz de 10 mm. Durante este proceso se obtiene una gran cantidad de material estructurante mayor de 10 mm que no se biodegradó y que durante el desarrollo habitual de la explotación se recircula al inicio del proceso (durante los ensayos, para asegurar la homogeneidad de la materia prima, únicamente se emplea material nuevo). La retirada del estructurante previa a la obtención de la muestra explica este acusado descenso del % de MO en la última muestra analizada.

Al final del proceso, los valores de MO son altos, con valores que van del 45 al 50 %, cumpliendo en todos los Ensayos lo establecido en la legislación de fertilizantes para compost ( $MO \geq 35\%$ ) (RD 506/2013).

#### **4.1.2.2. CARBONO ORGÁNICO TOTAL**

Al igual que el contenido de materia orgánica, como se aprecia en la **Tabla 4.3.** el contenido de carbono orgánico disminuye a lo largo del proceso de compostaje como consecuencia de la mineralización sufre la mezcla por parte de los microorganismos que actúan durante el proceso, siendo muy importante la pérdida por la respiración de estos en forma de  $CO_2$  emitido a la atmósfera.

	<i>Ensayo 1</i>	<i>Ensayo 2</i>	<i>Ensayo 3</i>	<i>Ensayo 4</i>	<i>Ensayo 5</i>
<i>Inicio</i>	49,48	48,67	46,60	48,55	45,61
<i>1/2 Fermentación</i>	45,36	44,90	44,26	46,46	45,94
<i>Maduración</i>	43,39	38,75	41,59	41,94	40,66
<i>Compost Final</i>	28,94	29,29	25,99	27,03	26,86

*Tabla 4.3. Evolución del carbono orgánico a lo largo del proceso de compostaje.*

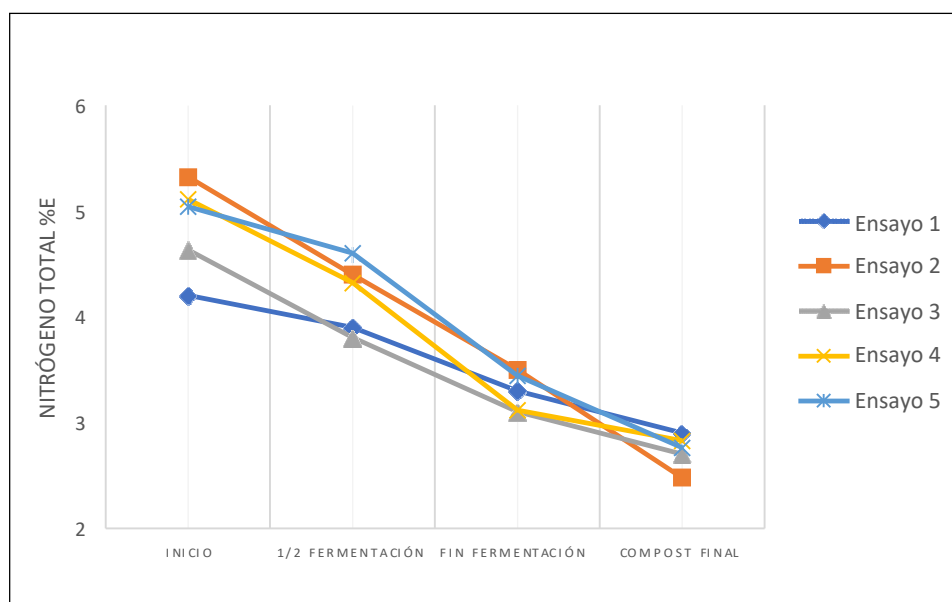
*Fuente: elaboración propia*

#### **4.1.2.3. NITRÓGENO TOTAL**

Durante el transcurso del compostaje se produce un descenso de la materia orgánica y por tanto también de su fracción nitrogenada, pasando a formas inorgánicas que se pueden perder, bien disueltas en la fase líquida como lixiviados, o bien en forma gaseosa como amoníaco, con las consiguientes consecuencias en el futuro uso agrícola del compost obtenido por la pérdida de un nutriente fundamental, y las consecuencias medioambientales por la pérdida en forma de amoníaco importante fuente de olores.

Se debe tener en cuenta que al final del proceso de compostaje, probablemente debido a un “efecto concentración” como consecuencia de la pérdida de peso del material en proceso por degradación de la materia orgánica, a pesar de que se pierde nitrógeno, éste estará más concentrado (Paredes y col., 2002).

En estos ensayos en concreto, los residuos orgánicos que forman las mezclas tienen unos contenidos de partida en nitrógeno total muy dispares (**Figura 4.8.**), muy bajo en los residuos utilizados como estructurantes (0,40 la astilla y 1,83 los residuos vegetales triturados), frente al contenido del lodo con un 7,60%.



**Figura 4.8.** Evolución del Nitrógeno total en las fases de compostaje de los diferentes ensayos.

*Fuente: elaboración propia*

Al contrario de lo que suele ocurrir por efecto del llamado “efecto concentración”, el porcentaje de nitrógeno total, lejos de mantenerse o subir, experimenta una bajada en todos los ensayos y en todas las fases del proceso estudiadas, llegando a un contenido final muy igualado en todos los ellos: entre un 2,5 y un 2,90%. El contenido en las muestras iniciales era elevado y claramente está determinado por el volumen de lodo empleado en la mezcla, los Ensayos 2, 4 y 5 con un 40% en la composición, tienen más de un 5% de nitrógeno total (5,3, 5,1 y 5,0 respectivamente); los Ensayos 1 y 3 con un 33% de lodo tienen un 4,2 y 4,6%.

#### 4.1.2.4. RELACIÓN C/N

La relación entre el carbono orgánico total y el nitrógeno total de las mezclas ensayadas en sus distintas fases es uno de los indicadores más útiles para estudiar la evolución de la materia orgánica durante el compostaje, ya que por un lado representa la pérdida de carbono orgánico consecuencia de la mineralización de la MO y por otro el aumento de la concentración de nitrógeno por la pérdida de peso

(efecto concentración). El resultado final de la evolución de estos parámetro es una disminución de su cociente.

El dato de partida para que el compostaje se desarrolle adecuadamente está entre 25 y 35. Esto asegura la cantidad adecuada de nitrógeno para la estructura celular y el carbono como fuente de energía y síntesis celular.

Un valor elevado de la relación (exceso de carbono orgánico y/o poco nitrógeno) limita la cantidad de nitrógeno disponible para los microorganismos ralentizando el proceso de compostaje, llegando a pararlo.

Un valor bajo, al contrario, acelera inicialmente el crecimiento microbiano y la descomposición de la materia orgánica. El exceso de nitrógeno provocará una pérdida de éste por volatilización en forma de amoníaco.

La relación C/N decrece a lo largo del compostaje. Se considera que una relación C/N ideal para un compost totalmente maduro es cercana a 10; similar a la del humus.

Si los productos que se compostan tienen una relación C/N baja (inferior a 18-19), el compostaje se lleva a cabo con mayor rapidez (Golueke y col., 1987; Zhu, 2006), pero el exceso de N se desprende como amoníaco, produciéndose una autorregulación de la relación C/N (Jhorar y col., 1991).

	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 3</b>	<b>Ensayo 4</b>	<b>Ensayo 5</b>
<b>Inicio</b>	11,8	9,1	10,1	9,2	9,0
<b>1/2 Fermentación</b>	11,6	10,2	11,6	11,2	10,0
<b>Maduración</b>	13,1	11,1	13,4	14,9	11,8
<b>Compost Final</b>	10,0	11,8	9,6	9,6	9,7

**Tabla 4.4.** Evolución la relación C/N en las fases de compostaje de los diferentes ensayos.

**Fuente:** elaboración propia

El alto contenido en nitrógeno total del lodo como principal residuo a co-compostar (**Tabla 3.1.**) hace que la relación C/N inicial en cada uno de los ensayos, como se puede observar en la **Tabla 4.4.**, sea bajo a pesar del alto % en MO (por tanto, en carbono orgánico). La importante pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco en las primeras fases del proceso hace que los mayores valores del cociente se den en la muestra del final de la fermentación, posteriormente descende en la muestra del compost final (después del cribado) por la retirada como rechazo de parte del estructurante utilizado cuyo carbono se encuentra en forma de compuestos difícilmente biodegradables (lignina, celulosa).

Este hecho provocado por la baja biodegradabilidad de algunos residuos orgánicos empleados como estructurantes o acondicionadores en procesos de co-compostaje, ha dado lugar a que algunos investigadores propongan la definición de nuevas relaciones basadas en las concentraciones de carbono y nitrógeno biodegradables o solubles (Puyuelo y col., 2011; Gutiérrez y col., 2014) en lugar de los clásicos carbono y nitrógenos totales.

#### **4.1.3. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD AGRONÓMICA DE LOS COMPOST OBTENIDOS**

Los análisis realizados sobre los compost resultantes de los cinco ensayos efectuados presentan valores que cumplen con los requisitos establecidos en el *Real Decreto 506/22013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes*, y sus modificaciones posteriores. Las analíticas finales se realizaron en un laboratorio externo (Agrolab analítica, S.L.).

En la **Tabla 4.5** se reflejan valores de ciertos parámetros indicativos de la calidad de la enmienda orgánica:

**Parámetros de carácter químico:** los contenidos en humedad están dentro de lo establecido (<40%) salvo en el Ensayo 5 con un resultado de 44,9 %.

El contenido en materia orgánica es alto en todos los ensayos, todos ellos por encima del 35 % mínimo exigido.

El pH de todos los ensayos está dentro del intervalo óptimo de funcionamiento del proceso de compostaje situado entre 6 y 9 (Fitzpatrick, 1993; Nakasaki y col., 1993). Los Ensayos 4, 5 y 6 con ingrediente estructurante residuos vegetales triturados son los que tienen valores más elevados (8,2; 8,6 y 8,5 respectivamente).

Todos los ensayos presentan elevados valores de macronutrientes esenciales para las plantas: nitrógeno, fósforo y potasio, especialmente en los Ensayos con mayor contenido de lodos en su composición.

La presencia de metales pesados como contaminante inorgánico suele ser especialmente delicado en el compostaje de lodos de depuradora. Todos los ensayos muestran resultados que cumplen con los requisitos normativos en cuanto a contenido de metales pesados, estando encuadrados en la clase C, por el contenido en Zn de tres de los cinco ensayos estudiados.

**Parámetros de carácter físico:** se obtiene que todos los ensayos cumplen los parámetros exigidos en cuanto a granulometría (>90% pasan por la malla de 25 mm). Todos los ensayos cumplen también los requisitos en cuanto al contenido en impropios e impurezas:

- Piedras y gravas de diámetro > 5mm deben estar presentes  $\leq 2\%$ .
- Impurezas como metales, vidrios y plásticos de diámetros > 2 mm pueden estar presentes  $\leq 1,5\%$ .

Desde el punto de vista de la **calidad biológica**, todas las muestras cumplen con los parámetros microbiológicos:

- EscherichiaColi, el contenido debe ser menor de 1000 MNP (número más probable).
- Salmonella, debe darse ausencia en 25 g de muestra.

**Tabla 4.5** Parámetros de calidad agronómica y cumplimiento normativo según RD 506/2013 de los compost obtenidos de los 5 Ensayos de co-compostaje realizados.

Fuente: elaboración propia a partir de analíticas de laboratorios externos

Parámetros Directos	Ud	Observaciones	RESULTADOS				
			E1	E2	E3	E4	E5
Humedad	g/100g	Gravimetría	36,20	28,4	29,9	38	44,9
Materia Seca	g/100g	Secado a 105°C	63,80	71,60	70,10	62,00	55,10
pH. Relación 1:25 (p/v)	-	pHmetro	7,40	7,8	8,2	8,6	8,5
Conductividad Eléctrica. Relación 1:5 (v/v)	dS/m	Conductímetro 25°C <sup>a</sup>	6,4	5,3	6,3	5,9	6,7
<b>Granulometría</b>		<b>Debe cumplir que</b>					
Diámetro Partículas < 25mm	g/100g	≥ 90%	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Diámetro Partículas < 10mm	g/100g	≥ 90%	99,80	100,00	95,10	100,00	100,00
Piedras y gravas. (Diámetro > 5mm)	g/100g	≤ 2%	0,5	0	0,6	0,5	0
Impurezas: metales, vidrios y plásticos. (Diámetros > 2mm)	g/100g	≤ 1,5%	0	0	0	0	0
<b>Parámetros Microbiológicos</b>		<b>Debe cumplir que</b>					
Recuento e identificación de <i>EscherichiaColi</i>	NMP	<1000 en 1g muestra	76,00	< 3	<3	25	0
Detección de <i>Salmonella</i>		Ausencia en 25g de muestra	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
<b>Análisis Químico</b>		<b>Observaciones</b>					
Materia Orgánica Total		Calcinación a 550°C	49,90	50,5	44,8	46,6	46,3
Carbono Orgánico		MOT por calcinación / 1,724	28,90	29,3	26	27	26,9
Extracto Húmico Total (EHT)		Potenciometría	11	6,2	10,1	7,3	8,4
Ácidos Húmicos Total (AHT)		Potenciometría	3,50	2,2	4	3	2,8
Ácidos Fúlvicos Total (AF)		Cálculo	7,50	4	6,1	4,9	5,6
Nitrógeno (N) Total		Digestión ácida	2,90	2,5	2,7	2,8	3
Nitrógeno (N-NH4) Amoniacal		Arrastre de vapor	0,60	0,4	0,55	0,1	0,32
Nitrógeno Orgánico		Cálculo	2,30	2,1	2,2	2,7	2,7
Nitrógeno (N-NO3) Nitrato		Volumetría	<0,1	<0,1	0,10	<0,1	<0,1
Nitrógeno (N) Ureico		Espectrofotometría UV-VIS	No se detecta	No se detecta	No se detecta	No se detecta	No se detecta
Relación C/N		Cálculo	10	12	10	10	10
Fósforo (P2O5) Total		Espectrofotometría UV-VIS	3,40	5,8	3,9	5,0	4,8
Fósforo (P2O5) soluble en agua y citrato amónico neutro		Espectrofotometría UV-VIS	0,90	3,5	2,3	3	2,7
Fósforo (P2O5) soluble en agua		Espectrofotometría UV-VIS	<0,30	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3
Potasio (K2O) Total		Fotometría de Llama E.A.	1,90	1,5	0,8	1,2	1,3
Potasio (K2O) soluble en agua		Fotometría de Llama E.A.	1,20	0,8	0,3	0,6	0,7
Calcio (CaO) Total		Fotometría de Llama A.A.	9,70	13,5	15,6	16,2	14,8
Calcio (CaO) soluble en agua		Fotometría de Llama A.A.	0,10	0,1	0,1	0,1	0,1
Magnesio (MgO) Total		Fotometría de Llama A.A.	1,10	0,5	0,8	1,1	0,7
Magnesio (MgO) soluble en agua		Fotometría de Llama A.A.	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Sodio (Na2O) Total		Fotometría de Llama E.A.	0,30	0,1	0,17	0,16	0,3
Sodio (Na2O) soluble en agua		Fotometría de Llama E.A.	0,20	0,1	0,14	0,1	0,2
Azufre (SO3) Total		Espectrofotometría UV-VIS	1,40	1,2	1,7	1,65	2,5
Cloruros (Cl-) Total		Potenciometría	0,54	0,32	0,65	0,8	0,54
<b>Parámetros</b>		<b>Observaciones</b>					
Cadmio (Cd) Total	mg/Kg (sms)	Fotometría de Llama A.A.	1,16	1,1	1,30	2,23	2
Cobre (Cu) Total		Fotometría de Llama A.A.	92,70	229	221,00	236	283
Níquel (Ni) Total		Fotometría de Llama A.A.	13,10	34	25,80	28,2	30,5
Plomo (Pb) Total		Fotometría de Llama A.A.	45,30	106	113,00	99,1	164,4
Cinc (Zn) Total		Fotometría de Llama A.A.	320,90	599	429,1	568,3	600,4
Mercurio (Hg) Total		Fotometría de Llama A.A.	0,18	0,37	0,11	0,4	0,33
Cromo (Cr) Total		Fotometría de Llama A.A.	102,80	41,1	48,40	50,8	57,5
Cromo Hexavalente (Cr(VI)) Total		Fotometría de Llama A.A.	No Detectable	No Detectable	No Detectable		

## **5. CONCLUSIONES**

De los resultados obtenidos de los Ensayos efectuados se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Las proporciones de residuos orgánicos estructurantes (AST y RVT) y lodo EDAR ensayadas, fueron todas ellas adecuadas para obtener una mezcla inicial con una humedad, porosidad y estructura que permitió la circulación de aire por toda la masa facilitando la presencia de O<sub>2</sub> indispensable para que se produzca la fermentación aeróbica.
- Todas tuvieron un descenso gradual de la humedad en las distintas fases del proceso controladas, llegando al compost final con valores inferiores al máximo normativo para los compost ( $\leq 40\%$ ), salvo el Ensayo 5 (el de > proporción de RVT) que con 44,9 % no cumpliría la norma.
- Se consiguió en todos los ensayos alcanzar la fase termófila con temperaturas superiores a 50°C durante los suficientes días para la higienización de los compost obtenidos. Los ensayos cuya composición incluye RVT al final de la fase de fermentación (30 días aproximadamente) conservan temperaturas más altas que los formulados únicamente con astilla como estructurante, siendo más elevada cuanto más alto es el % de RVT.
- El contenido de materia orgánica, pH y C/N están todos dentro de lo exigido en la normativa. En cuanto a los macronutrientes (NPK), todos presentan valores altos.

Como conclusión general, de los 5 Ensayos de co-compostaje de lodos EDAR con dos tipos de materiales estructurantes en diferentes proporciones, de la mezcla del **Ensayo 2** consistente en 3 volúmenes de astilla de madera triturada por 2 volúmenes de lodos de depuradora, se obtuvo la máxima eficiencia del proceso en cuanto a rendimientos (t) de tratamiento de lodos EDAR, cumpliendo el compost final los parámetros de calidad exigidos en la normativa vigente sobre fertilizantes.



## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia de Residuos de Cataluña (2016). *Guía práctica para el diseño y la explotación de plantas de compostaje*. Recuperado el 21 de agosto de 2020 de: <https://cutt.ly/EfiDzGD>
- Ansorena, J., Batalla E., y Merino, D. (2013) Evaluación de la calidad y usos del compost como componente de sustratos, enmiendas y abonos orgánicos. Laboratorio Agroambiental Fraisoro. FraisoroEtxaldea. 20159 Zizurkil Gipuzkoa.
- Ansorena, J., 2016. El compost de biorresiduos, normativa, calidad y aplicaciones: Ediciones Mundi-Prensa.
- BOE. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.
- BOE. Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.
- BOE. Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo.
- BOE. Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario.
- BOE. Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, relativo a la prevención de la contaminación de las aguas por los nitratos de procedencia agraria
- Chica, A., Pérez, M., Rosal, A., Arcos, M. 2005. Compostaje de lodos de EDARs y de la fracción orgánica de los RSU. *Infoenviro*, 10: 54-59.
- Chica, A.2006. Compostaje y tratamiento mecánico-biológico: seguimiento y control de la calidad del proceso. En: Aspectos normativos, tecnológicos y medio ambientales del compostaje.
- Costa, G., García C., Fernandez, T. y Polo A. 1991. Residuos Orgánicos Urbanos Manejo y Utilización. Ed.: CSIC-CEBAS. Murcia
- Herrero, O. (2013). Gestión de lodos, normativa y destino final: aplicación agrícola. Jornada técnica la gestión de lodos de depuradora urbanas (EDARs 2013). Catedra Mariano López Navarro. Universidad de Zaragoza.

- Huerta, O., López, M., Soliva, M. 2010. Procés de compostatge: Caracterizació de mostres. Diputació de Barcelona. 431 pp.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2011-13046>.
- MITECO (2021) Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Lodos de depuración de aguas residuales. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/lodos-depuradora/>.
- Memorias anuales Consorcio para Gestión de Residuos Sólidos de Asturias. <https://www.cogersa.es/metaspaces/portal/14498/14519-inicio>
- Moreno, J. y Moral, R. 2008. Compostaje. -Mundi- Prensa. Madrid
- Moreno, J. y Moral, R., García-Morales, J.L., Pascual, J.A., Bernal, M.P. 2015. Ingeniería y aspectos técnicos de la estabilización aeróbica. -Mundi- Prensa. Madrid.
- Saña, J. y Soliva, M. 1987. El Compostatge. Procés, Sistemes i Aplicacions. Ed.: Diputació de Barcelona. Servei del Medi Ambient. Barcelona.
- Soliva, M., 2001a. Anàlisi global de la estratègia de la fracció orgànica dels residus. pp 97-136. En "Primera Jornada Tècnica sobre la Gestió de Residus Municipals". UPC.
- Soliva, M., 2001b. Compostatge i Gestió de Residus Orgànics. Estudis i monografies nº 21. 111 pp. Diputació de Barcelona. Àrea de Medi Ambient. Barcelona.
- Plan Estratégico de Residuos del Principado de Asturias 2017-2024 (PERPA). <https://medioambiente.asturias.es/general/-/categorias/766272>
- Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (**PEMAR**) 2016-2022. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/Planes-y-Programas.aspx>
- Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación. *Boletín Oficial del Estado (BOE)*. Madrid, 19 de octubre de 2013, núm. 251, 85173-

85276. Recuperado el 15 de agosto de 2020 de:  
<https://www.boe.es/boe/dias/2013/10/19/pdfs/BOE-A-2013-10949.pdf>

- Real Decreto Legislativo 1/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación. *Boletín Oficial del Estado (BOE)*. Madrid, 31 de diciembre de 2016, núm. 316, 91806-91842. Recuperado el 15 de agosto de 2020 de:  
<https://www.boe.es/boe/dias/2016/12/31/pdfs/BOE-A-2016-12601.pdf>
- Rynk, R., Van de Kamp, M., Willson, G. B., Singley, M. E., Richard, T. L., Kolega, J. J., ... y Hoitink, H. A. (1992). *On-Farm Composting Handbook (NRAES 54)*. Northeast Regional Agricultural Engineering Service (NRAES).
- Saña, J., y Soliva, M. (1987). El compostaje: Proceso, sistemas y aplicaciones. *DIPUTACIÓ DE BARCELONA. SERVEI DE MEDI AMBIENT. Quaderns d'ecologia aplicada. Barcelona, 11*.
- Sobrados, L. (2013). *Producción y características de los fangos*. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. Recuperado el 15 de agosto de 2020 de:  
<https://docplayer.es/40208252-Produccion-y-caracteristicas-de-los-fangos.html>
- Soliva, M., y López, M. (2004). Calidad del compost: Influencia del tipo de materiales tratados y de las condiciones del proceso. *Formación de técnicos para el tratamiento y gestión de lodos de depuradora*, 1-20.
- Soto-Paz, J., Oviedo-Ocaña, R., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L. F., y Manyoma-Velásquez, P. C. (2017). Compostaje de biorresiduos: Tendencias de investigación y pertinencia en países en desarrollo. *Dyna*, 84(203), 334-342.