

# DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA DEGRADACIÓN DE BATERÍAS BIODEGRADABLES EN LA TOXICIDAD DEL COMPOST Y DEL DIGESTATO



**Marina Cabrera Bancells**

**Junio 2024**



## UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

Se autoriza a la alumna **D<sup>a</sup>. Marina Cabrera Bancells**, a realizar el Trabajo Fin de Máster titulado: “Determinación del efecto de la degradación de baterías biodegradables en la toxicidad del compost y del digestato”, bajo la dirección de D<sup>a</sup>. Adriana Artola Casacuberta y D<sup>a</sup> Raquel Barrena Gómez de la Universidad Autónoma de Barcelona, debiendo cumplir las normas establecidas para la redacción del mismo que están a su disposición en la página Web específica del Master.

Orihuela, 10 de junio de 2024

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: 2024.06.10 20:59:21  
+02'00'

Fdo.: Concepción Paredes Gil

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



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA

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



# **DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA DEGRADACIÓN DE BATERÍAS BIODEGRADABLES EN LA TOXICIDAD DEL COMPOST Y DEL DIGESTATO**

**Vº Bº DIRECTOR**

**VºBº CODIRECTOR**

**ALUMNO**

**Marina Cabrera Bancells**

## REFERENCIAS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

### IDENTIFICACIONES

**Autor:** Marina Cabrera Bancells

**Título:** Determinación del efecto de la degradación de baterías biodegradables en la toxicidad del compost y del digestato.

**Title:** Determination of the effect of the degradation of biodegradable batteries on the toxicity of compost and digestate.

**Director/es del TFM:** Raquel Barrena Gómez (UAB), Adriana Artola Casacuberta (UAB)

**Año:** 2024

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

**Tipo de proyecto:** Experimental

**Palabras claves:** compost, biodegradabilidad, digestato, toxicidad, baterías

**Keywords:** compost, biodegradation, digestate, toxicity, batteries

**Nº citas bibliográficas:** 75

**Nº de planos:** 0

**Nº de tablas:** 25

**Nº de figuras:** 38

**Nº de anexos:** 1

## **RESUMEN**

El siguiente trabajo tiene como objetivo la determinación del efecto de la degradación de baterías biodegradables en la toxicidad del compost y del digestato. Para ello se realizó una revisión de los diferentes estudios existentes basados en los diferentes materiales biodegradables y su comportamiento tras realizar un tratamiento posterior de degradación, como es el compostaje o la digestión anaeróbica. Además, se participó en un proyecto de investigación dónde se estudia el comportamiento de un prototipo de batería biodegradable y su posible efecto de fitotoxicidad en el compost y en el digestato.

## **ABSTRACT**

The following project aims to determine the effect of the degradation of biodegradable batteries on the toxicity of compost and digestate. For this purpose, a review was carried out of the different existing studies based on the different biodegradable materials and their behavior after carrying out a subsequent degradation treatment, such as composting or anaerobic digestion. In addition, it's been participating in a research project studying the behavior of a biodegradable battery prototype and its possible phytotoxicity effect on compost and digestate.



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

Elche, a 11/04/2024

Nombre del tutor/a	Raquel Barrena Gomez
Nombre del alumno/a	Marina Cabrera Bancells
Tipo de actividad	Sin implicaciones ético-legales
Título del 2. TFM (Trabajo Fin de Máster)	Determinación del efecto de la degradación de baterías biodegradables en la toxicidad del compost y del digestato.
Evaluación de riesgos laborales	No solicitado/No procede
Evaluación ética humanos	No solicitado/No procede
Código provisional	240410013621
Código de autorización COIR	<b>TFM.MGT.RBG.MCB.240410</b>
Caducidad	2 años

Se considera que el presente proyecto carece de riesgos laborales significativos para las personas que participan en el mismo, ya sean de la UMH o de otras organizaciones.

La necesidad de evaluación ética del trabajo titulado: **Determinación del efecto de la degradación de baterías biodegradables en la toxicidad del compost y del digestato.** ha sido realizada en base a la información aportada en el formulario online: "TFG/TFM: Solicitud Código de Investigación Responsable (COIR)", habiéndose determinado que no requiere ninguna evaluación adicional. Es importante destacar que si la información aportada en dicho formulario no es correcta este informe no tiene validez.

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

Atentamente,

Alberto Pastor Campos  
Jefe de la Oficina de Investigación Responsable  
Vicerrectorado de Investigación y Transferencia



Información adicional:

- En caso de que la presente actividad se desarrolle total o parcialmente en otras instituciones es responsabilidad del investigador principal solicitar cuantas autorizaciones sean pertinentes, de manera que se garantice, al menos, que los responsables de las mismas están informados.
- Le recordamos que durante la realización de este trabajo debe cumplir con las exigencias en materia de prevención de riesgos laborales. En concreto: las recogidas en el plan de prevención de la UMH y en las planificaciones preventivas de las unidades en las que se integra la investigación. Igualmente, debe promover la realización de reconocimientos médicos periódicos entre su personal; cumplir con los procedimientos sobre coordinación de actividades empresariales en el caso de que trabaje en el centro de trabajo de otra empresa o que personal de otra empresa se desplace a las instalaciones de la UMH; y atender a las obligaciones formativas del personal en materia de prevención de riesgos laborales. Le indicamos que tiene a su disposición al Servicio de Prevención de la UMH para asesorarle en esta materia.

La información descriptiva básica del presente trabajo será incorporada al repositorio público de Trabajos fin de Grado y Trabajos Fin de Máster autorizados por la Oficina de Investigación Responsable de la Universidad Miguel Hernández. También se puede acceder a través de <https://oir.umh.es/solicitud-de-evaluacion/tfg-tfm/>



## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría aprovechar estas líneas, para mostrar mi más sentido agradecimiento a Raquel Barrena Gómez y Adriana Artola Casacuberta, investigadoras y profesoras de la Universidad Autónoma de Barcelona, e integrantes del grupo de investigación *El Grup de Recerca de Compostatge* (GICOM) del Departamento de Ingeniería Química, Biológica y Ambiental. Gracias por toda su colaboración, consejos y paciencia, y por dejarme participar en uno de los proyectos a nivel nacional del grupo, como es el proyecto BIDEKO.

No solo a ellas, también a la Universidad Miguel Hernández de Elche, por ofrecer este Máster y, especialmente, a la directora del Máster, Concepción Paredes Gil, por su constancia y cercanía con los alumnos.

Finalmente, un último agradecimiento a todos los que han convivido conmigo, familiares, amistades y pareja, en este proceso.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. PROBLEMÁTICA ACTUAL	2
1.2. EL COMPOSTAJE	4
1.2.1. PROCESO DE COMPOSTAJE	4
1.2.2. SISTEMAS DE COMPOSTAJE	12
1.2.3. CALIDAD DEL COMPOST	14
1.3. DIGESTIÓN ANAEROBIA	19
1.4. MATERIALES BIODEGRADABLES Y COMPOSTABLES	21
1.4.1. MATERIALES PARA APLICACIÓN EN EL SECTOR DOMÉSTICO	25
1.4.2. MATERIALES DEL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN	26
1.4.3. MATERIALES DEL SECTOR DE LA AGRICULTURA	28
1.4.4. MATERIALES DEL SECTOR DE AUTOMOCIÓN	29
1.4.5. BATERÍAS BIODEGRADABLES	31
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>34</b>
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	34
<b>3. MARCO DE TRABAJO</b>	<b>35</b>
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>36</b>
4.1. CARACTERIZACIÓN BATERÍAS BIODEGRADABLES	36
4.2. CARACTERIZACIÓN COMPOST Y DIGESTATO	39
4.3. TEST DE GERMINACIÓN	45
4.3.1. MATERIALES	45
4.3.2. METODOLOGÍA	45
4.4. TEST MICROTOX	49
4.4.1. MATERIALES	49
4.4.2. METODOLOGÍA	50
<b>5. RESULTADOS</b>	<b>53</b>
5.1. CARACTERIZACIÓN COMPOST Y DIGESTATO	53
5.2. TEST DE GERMINACIÓN	54
5.3. TEST MICROTOX	64
<b>6. DISCUSIÓN RESULTADOS</b>	<b>67</b>
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>71</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>72</b>
<b>9. ANEXOS</b>	<b>81</b>
9.1. TABLAS MEDICIONES	81
9.1.1. CARACTERIZACIÓN COMPOST Y DIGESTATO	81
9.1.2. TEST DE GERMINACIÓN	83
9.1.3. MICROTOX	90

# 1. INTRODUCCIÓN

*“Para el mundo urbanizado, el suelo es sólo polvo, barro. Pero el suelo es la fuente de nuestra comida, el principal futuro de la humanidad. Debemos reconocer que el suelo tiene un valor superior al del oro.”*

Kern, 2003.

La generación de residuos ha sido y será siempre una constante del ser humano y de sus sociedades, especialmente en el caso de los restos orgánicos cada vez más variados y complejos. A lo largo de la historia se ha mantenido una relación ambigua con estos materiales pendulando entre su consideración como subproductos valorizables y buscados a residuos perjudiciales que había que verter, alejar, esconder y olvidar.

La actual variedad de residuos orgánicos, tanto de origen urbano como industrial, obliga a la hora de su tratamiento y valorización a conocer las características, necesidades y evolución de estos materiales ante los procesos biológicos degradativos, así como la calidad y cantidad de los productos finales resultantes.

El proceso de compostaje está considerado una estrategia efectiva para valorizar residuos orgánicos y, posteriormente, reincorporar al suelo. Además de otros métodos como el vermicompostaje o la digestión anaeróbica, que también son tratamientos para promover la biodiversidad en el suelo y la fertilización orgánica.

Por tanto, ¿por qué no replantear el diseño del producto para que pueda someterse en estos tratamientos de valorización de residuos y así, evitar esa generación de residuos?

## 1.1. PROBLEMÁTICA ACTUAL

A nivel mundial, se producen unos 935 millones de toneladas de residuos orgánicos municipales de media (United Nations Environment Programme, 2021), el 58% de los cuales acaba en algún tipo de vertedero sin captación de gases (Word Bank Open Data, 2018).

A nivel estatal, según la memoria anual de generación y gestión de residuos 2020 del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España, se recogieron a nivel de competencia municipal, un total de 21.989.316 toneladas; donde el 20,4% se reciclaron, el 20,1% se compostaron, el 10,1% se incineraron y el 49,4% se depositaron en vertederos.

Es aquí donde aparece la gran problemática mundial respecto a los residuos. Los residuos depositados en vertederos, pueden emitir gases contaminantes y de efecto invernadero, es decir, que modifican la química atmosférica y producen calentamiento global. La emisión de metano ( $CH_4$ ) es la más significativa, pero también producen emisiones de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) y compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano.

Es por ello, que la prevención en la generación de residuos y la correcta gestión para eliminarlos o convertirlos en recursos, es una de las prioridades en el desarrollo de la economía circular.

Además, el exceso de residuos en el planeta y el desaprovechamiento de estos nos lleva a otra de las grandes problemáticas del planeta: la desertificación de los suelos. Es decir, la degradación del suelo debido principalmente a la falta de materia orgánica. Un suelo pobre en materia orgánica verá afectadas sus propiedades en cambios en su estructura, aceleración de la erosión, tendencia a la compactación, incremento de su temperatura, descenso de la capacidad de retención de agua y nutrientes, y reducción de su fertilidad, biodiversidad y actividad biológica. Esta pérdida de materia orgánica

varía enormemente dependiendo de las prácticas agrícolas, el tipo de cultivo, el drenaje del suelo y las condiciones climatológicas.

Las pérdidas de materia orgánica en los suelos europeos, y muy especialmente en los de la cuenca mediterránea, que han sido intensamente cultivados durante mucho tiempo, se calculan en torno a las  $35 \text{ t} \cdot \text{Ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  (Rusco, et al; 2001). Tanto es así que el sur de Europa llega a tener en un 75% de sus suelos un contenido bajo (3,4%) o muy bajo (1,7%) de materia orgánica, cantidad que los ingenieros agrónomos consideran ya propia de un suelo predesértico (Feipó, 2002). Si observamos los niveles de carbono orgánico en la capa superior de los suelos del conjunto de Europa, hay un 45% con un contenido entre el 2 y el 6% de carbono orgánico y otro 45% de la superficie con valores inferiores al 2%. Centrándonos en el caso de España la situación es aún más alarmante, pues el 50% de los suelos de cultivo tienen menos de un 1,7% de materia orgánica (< 1% de carbono orgánico), con numerosas zonas de la cuenca mediterránea con valores del 0% o muy próximos. Esto supone un riesgo real de desertificación para esas áreas, con todas las implicaciones climáticas que esto supone (Giró, 2007).

Es aquí donde aparece la necesidad de valorizar y aprovechar los residuos orgánicos generados y convertirlos en materia orgánica para nuestros suelos, pero garantizando unos niveles de calidad que aseguren que su aplicación sea beneficiosa.

En el presente trabajo fin de máster, se estudian unas muestras degradadas por dos tratamientos de valorización diferentes: el compostaje y la digestión anaeróbica. Por tanto, a continuación nos centraremos en exponer las características de los dos tratamientos.

## 1.2. EL COMPOSTAJE

COMPOST, proveniente de la palabra inglesa *compost* que a su vez deriva del francés medieval *compote* y ésta del latín medieval *compostum*, del latín clásico, neutro de *compositus*, *compostus*, participio pasado de *componere*, “juntar”; formado a su vez a partir del *cum*, “con”, más *ponere*, “poner”.

El término “compost” en el Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios, se define como: *“material orgánico obtenido por compostaje aerobio conforme a los requisitos de la Categoría de Material Componente 3 (CMC3) del anexo II del Reglamento (UE) 2019/1009”*. Según el Real Decreto 506/2013 sobre fertilizantes se considera compost como equivalente a una enmienda orgánica, definida como: *“enmienda procedente de materiales carbonados de origen vegetal o animal, utilizada fundamentalmente para mantener o aumentar el contenido en materia orgánica del suelo, mejorar sus propiedades físicas y mejorar también sus propiedades o actividad química o biológica, cuyos tipos se incluyen en el grupo 6 del anexo I”*.

### 1.2.1. PROCESO DE COMPOSTAJE

El término *compostaje*, según el Real Decreto 506/2013 sobre fertilizantes, se define como: *“proceso controlado de transformación biológica aeróbica y termófila de materiales orgánicos biodegradables que da lugar a los tipos de abonos o enmiendas orgánicos, cuyas características se detallan en los grupos 2 y 6 del anexo I”*.

Es decir que, en el proceso de compostaje se acelera el proceso natural en condiciones aeróbicas, es decir, en presencia de oxígeno, dónde se descompone la materia orgánica convirtiéndose en un abono orgánico con poder fertilizante para el suelo. Además, gracias a abonar el suelo con compost, se cierra el ciclo de la materia orgánica, se devuelven al suelo materiales que, directa o indirectamente, se han producido a partir de cultivos.

Aunque en el ciclo natural de descomposición de la materia orgánica también intervienen la macro y la mesofauna, los responsables del proceso degradativo en el compostaje son fundamentalmente microorganismos, principalmente hongos, bacterias y actinomicetos. Entre estos hay una gran variedad, pues las condiciones del medio cambian sustancialmente a lo largo del tiempo según se van sucediendo las distintas fases que caracterizan al proceso de compostaje, limitando por tanto la actividad de algunos microorganismos y favoreciendo la de otros (Plana, 2009). Cada una de estas fases está bien definida por las condiciones físico-químicas del material, principalmente por la temperatura, según la cual se establecen las tres fases principales del proceso: fase mesófila, fase termófila y fase de maduración. Estas fases se muestran en la figura 1.

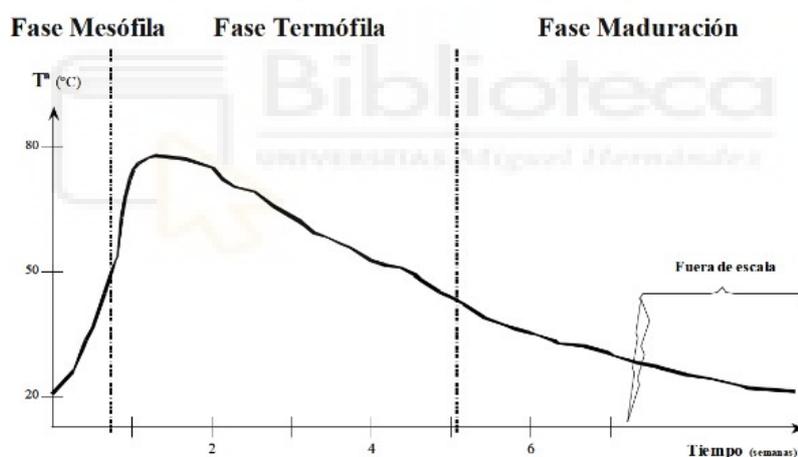


Figura 1: Evolución de la temperatura en el proceso de compostaje. Se indican las distintas fases en que se divide al proceso en función de la temperatura. (Fuente: Plana, 2009)

La fase mesófila, comprende desde la constitución de la mezcla de residuos inicial en una pila, montón o cúmulo, cuya temperatura será muy próxima a la ambiental, hasta que el material llega a los 40-50°C. El aumento de temperatura se debe a la actividad metabólica de las poblaciones microbianas. La duración de esta etapa está condicionada por el tipo de residuo o residuos, la proporción de mezcla, el sistema de compostaje, el que se realice en un espacio abierto o cerrado y la estación del año. La actividad degradativa está concentrada sobre la fracción más lábil y fácilmente disponible de la materia orgánica del residuo, lo que permitirá el rápido desarrollo y

multiplicación de los microorganismos, por lo que su tasa de actividad biológica será muy alta incrementando notablemente la demanda de oxígeno.

La fase termófila, se considera a partir de superar los 45°C de temperatura del material. Debido a la elevada capacidad aislante de la matriz en compostaje y aunque la actividad microbiana haya sido inhibida o detenida al final de la fase mesófila, la temperatura seguirá subiendo. Lo que cambiará son las poblaciones bacterianas pasando de mesófilas a termófilas. El rango de temperatura más adecuado para la mayor variedad de microorganismos termófilos, basado en la máxima tasa de degradación, se sitúa entre los 52°C y los 60°C. Temperaturas superiores a 60°C afectan seriamente a la tasa de degradación de la materia orgánica a causa del descenso de la actividad microbiana. Y si la temperatura supera los 82°C la comunidad microbiana es severamente limitada y el número de especies activas extremadamente reducido. Como se puede suponer, la actividad biológica en la fase termófila es muy elevada, pues la microbiota es muy variada, pudiendo disponer tanto de la fracción orgánica lábil restante como de la más resistente para su degradación. Esto supone que la demanda de oxígeno también será muy elevada a lo largo de esta fase, por lo que será un factor limitante del proceso. El final de la fase termófila marca el descenso de la temperatura retornando a valores de la fase mesófila inicial, por debajo de los 45°C. La materia orgánica más lábil ya ha sido degradada en su mayor parte y la que queda no se encuentra tan disponible, ni es suficiente para mantener la cantidad y variedad de poblaciones microbianas que se encuentran en el material, por lo que la tasa de actividad metabólica irá disminuyendo paulatinamente y por lo tanto la temperatura.

Por último, la fase de maduración es la más lenta, y de enfriamiento. En esta fase la materia orgánica pasa a formas más estables y se aprecia una homogeneidad de los materiales iniciales. Aquí ya podemos apreciarlo como compost.

Pero para que se dé el proceso biológico de la manera correcta y siga estas tres fases, es necesario atender a ciertos parámetros físicos y químicos, tanto con los materiales iniciales como durante el proceso:

**La estructura física.** En la mayoría de casos, será necesario acondicionar el residuo principal a tratar mezclándolo con un material que le confiera una estructura o matriz porosa. Añadir el tipo de estructurante y en la proporción adecuada es clave para el correcto inicio y desarrollo del proceso, pues afectará a su velocidad de inicio, a si habrá lixiviación del material en las primeras fases, que influirá sobre la generación de malos olores y determinará el nivel de cuidados y atención que se le habrá de dar al material durante las fases más críticas. Al tratarse de un proceso aerobio el aire ha de circular a través de toda la masa orgánica, y para eso esta debe ser porosa. Los materiales más comúnmente empleado como estructurante son maderas residuales o restos vegetales leñosos triturados, pues además de esta estructura porosa que dan a la pila, es fácil disponer de ellos en la mayoría de los casos y su trituración y acondicionamiento no implican una maquinaria u operación compleja.

**La humedad.** Es un factor clave en todo el proceso, desde la constitución de la mezcla inicial a compostar hasta la fase de maduración, con mayor influencia sobre la actividad microbiana que la temperatura. La razón de esta importancia es que el proceso biológico de degradación se da en el exterior de las células, por lo que la humedad de este medio debe ser la suficiente para que se den todos los procesos bioquímicos. Hay una relación directa entre los niveles de humedad y la tasa de actividad de los microorganismos. Si hay un exceso de agua en el microporo no habrá, o quedará muy reducido, el espacio para que se dé el intercambio de gases, por lo que se agotará rápidamente el oxígeno y el proceso entrará en anaerobiosis, con los problemas derivados para el proceso: malos olores, lixiviación, ralentización de la degradación, etc. Si, por el contrario, el contenido en agua del microporo es insuficiente, la actividad enzimática extracelular se verá limitada, los microorganismos morirán o entrarán en formas de resistencia, y el proceso llegará a detenerse hasta que las condiciones del medio vuelvan a ser las adecuadas. Los métodos para detectar la cantidad de humedad más simples van desde la observación directa del material, obviamente muy determinado por la experiencia; el conocido método del “puño” donde se comprime el material en la palma de la mano para estimar la humedad; hasta el más fiable que es la

toma de muestra representativa y su análisis en laboratorio. Los niveles óptimos de humedad se consideran entre el 50 y el 60% (Baker, et al.; 1999).

**El pH.** Aunque el rango óptimo de pH inicial está en valores cercanos a la neutralidad, si se combinan materiales de distintos pH, también resultan experiencias de compostaje exitosas. El problema podría venir porqué, en el umbral de la etapa termófila hay una elevada actividad biológica degradativa y un alto consumo de oxígeno, pudiendo llegar a condiciones anaerobias si no se controla, y una acumulación de ácidos grasos de cadena corta que tienden a acidificar el medio, siendo mayor cuantos más procesos en anaerobiosis se estén dando. Al ser la microfauna termófila, principalmente las bacterias, sensible a pH ácido, su actividad se verá inhibida hasta que se degraden estos ácidos grasos y el medio tienda a valores de pH neutros o alcalinos.

**La relación C/N.** La relación de nutrientes, establecida como las cantidades de carbono y nitrógeno disponibles (que no totales), es indispensable para el desarrollo de los microorganismos. El carbono como componente principal de las moléculas orgánicas y como fuente de energía, y el nitrógeno como elemento para la síntesis proteica y celular. Es por ello por lo que, la variedad en el origen de los residuos y su combinación permite asegurar que en la mezcla resultante haya una relación de nutrientes adecuada. Si el material estructurante es de tipo vegetal sólo en parte leñoso, ya contiene una fuente de carbono biodegradable, por lo que se debe combinar con un residuo que aporte nitrógeno. De mayor a menor contenido en nitrógeno podríamos ordenar residuos como deyecciones de animales, restos de comida, césped, restos vegetales verdes o frescos, etc.

**La temperatura.** El compostaje es un proceso exotérmico, en el cual se desprende energía en forma de calor al liberarse la energía química contenida en los enlaces de las macromoléculas orgánicas cuando son rotos por la acción de los microorganismos. Tal y como hemos visto en las tres fases del proceso de compostaje, la temperatura aporta información parcial sobre el desarrollo del proceso y, por ello, es indispensable medirla y controlarla para determinar si es necesario realizar actuaciones de

mantenimiento en las pilas de compostaje. La evolución de la temperatura, como ya se ha comentado, condicionará la evolución de las poblaciones microbianas activas en el proceso.

**El oxígeno.** Siendo el compostaje un proceso aerobio es obvio que este factor será clave en todo momento para mantener las condiciones del medio adecuadas para las sucesivas poblaciones de microorganismos. Su monitorización aporta una información crucial sobre la actividad biológica del material, que, combinada con la medición de la temperatura, permite realizar un primer diagnóstico inmediato sobre el estado del proceso. Si además se combinan las monitorizaciones de oxígeno con las de CO<sub>2</sub>, se puede confirmar si la actividad biológica está siendo correcta cuando ambas curvas son opuestas, de forma que el descenso de los niveles de oxígeno coincide con aumentos en la producción de CO<sub>2</sub>.

Todos estos parámetros, pueden tener un contenido mínimo exigido por la normativa *RD 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes*, en función de las características de la enmienda orgánica (compost, compost vegetal, compost de estiércol, etc.). A continuación, se muestra una tabla resumen extraída de dicha normativa, con algunos ejemplos del grupo 6 (Enmiendas orgánicas) de la normativa (Tabla 1).

Tabla 1.- Contenido mínimo de nutrientes según la normativa española RD 506/2013 de 28 de junio, de algunas enmiendas orgánicas. Todas las unidades en porcentaje masico (%).

Denominación del tipo	Informaciones sobre la forma de obtención y los componentes esenciales	Contenido mínimo en nutrientes. Información sobre la evaluación de los nutrientes. Otros requisitos
Enmienda orgánica. Compost.	Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), bajo condiciones controladas, de materiales orgánicos biodegradables del Anexo IV, recogidos separadamente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materia orgánica total: 35%</li> <li>- Humedad máxima: 40%</li> <li>- C/N &lt; 20</li> </ul> No podrá contener impurezas ni inertes de ningún tipo tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos. El 90% de las partículas pasarán por la malla de 25 mm.
Enmienda orgánica. Compost vegetal.	Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), exclusivamente de hojas, hierba cortada y restos vegetales o de poda, bajo condiciones controladas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materia orgánica total: 40%</li> <li>- Humedad máxima: 40%</li> <li>- C/N &lt; 15</li> </ul> No podrá contener impurezas ni inertes de ningún tipo tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos.
Enmienda orgánica. Compost de estiércol.	Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), exclusivamente de estiércol, bajo condiciones controladas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materia orgánica total: 35%</li> <li>- Humedad máxima: 40%</li> <li>- C/N &lt; 20</li> </ul> No podrá contener impurezas ni inertes de ningún tipo tales como: piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos.
Enmienda orgánica. Vermicompost.	Producto estabilizado obtenido a partir de materiales orgánicos, por digestión con lombrices, bajo condiciones controladas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materia orgánica total: 30%</li> <li>- Humedad máxima: 40%</li> <li>- C/N &lt; 20</li> </ul> El 90% de las partículas pasarán por la malla de 25mm.

Aparte de estos requisitos, los valores límite de algunos de los parámetros controlados durante el proceso de compostaje explicados anteriormente o características del sustrato, no están especificados. Aún así, en función de su aplicación, existen rangos óptimos de valores extraídos a partir de estudios de investigación. A continuación, se exponen los niveles óptimos para su uso en sustratos (Tabla 2 y Tabla 3).

Tabla 2.- Niveles óptimos de las propiedades físicas y fisicoquímicas de un sustrato. Fuente: Martínez, et al.; 2011.

Propiedad	Rango de valores
Tamaño de partícula (mm)	0,25 - 2,50
Densidad aparente (g.cm <sup>-3</sup> )	< 0,75
Densidad real (g.cm <sup>-3</sup> )	1,45 - 2,65
Espacio poroso total (% vol)	> 85
Capacidad de aireación (% vol)	20 - 30
Agua fácilmente disponible (% vol)	20 - 30
Agua de reserva (% vol)	4 - 10
Agua total disponible (% vol)	24 - 40
Contracción	< 30
pH (extr. saturación)	5,2 - 6,5
Conductividad eléctrica	0,75 - 3,5
<b>Capacidad de intercambio catiónico:</b>	
Fertirriego permanente	Nula o muy baja
Fertirriego ocasional	> 20

Fuentes: de Boodt (1974, 1975); Bunt (1988); Abad et al. (1992); Baudoin et al. (2002)

Tabla 3.- Niveles óptimos para características químicas y fisicoquímicas de sustratos de uso hortícola (\*en el extracto de saturación). Fuente: Martínez, et al.; 2011.

Factor	Nivel óptimo
pH	5,0 - 6,5
Conductiva Eléctrica (dS.m <sup>-1</sup> )	< 0,7 sin riesgo 0,7 - 2,0 adecuado para germinación y crecimiento 2,0 - 3,5 riesgo de salinización > 3,5 excesivo
<b>Macroelementos solubles* (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	100 - 199
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0 - 20
Fósforo	6 - 10
Potasio	150 - 249
Calcio	> 200
Magnesio	> 70
Capacidad de intercambio catiónico (meq.100 g <sup>-1</sup> )	< 75 baja 75 - 100 media > 100 alta
<b>Microelementos* (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	
Hierro	0,3 - 3,0
Magnesio	0,02 - 3,0
Molibdeno	0,01 - 0,1
Zinc	0,3 - 3,0
Cobre	0,001 - 0,5
Boro	0,05 - 0,5
Carbono/Nitrógeno	20 - 40

Fuente: Cadahía y Eymar (1993); Abad et al. (1993).

En Cataluña, la Agencia de Residuos de Cataluña (ARC), ha publicado una guía de compostaje dónde establece algún parámetro básico para determinar la estabilidad del compost y saber en qué estado se encuentra ese compost. Esta guía está establecida a partir de un estudio desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña y a continuación se muestra el diagrama resumen (figura 2).

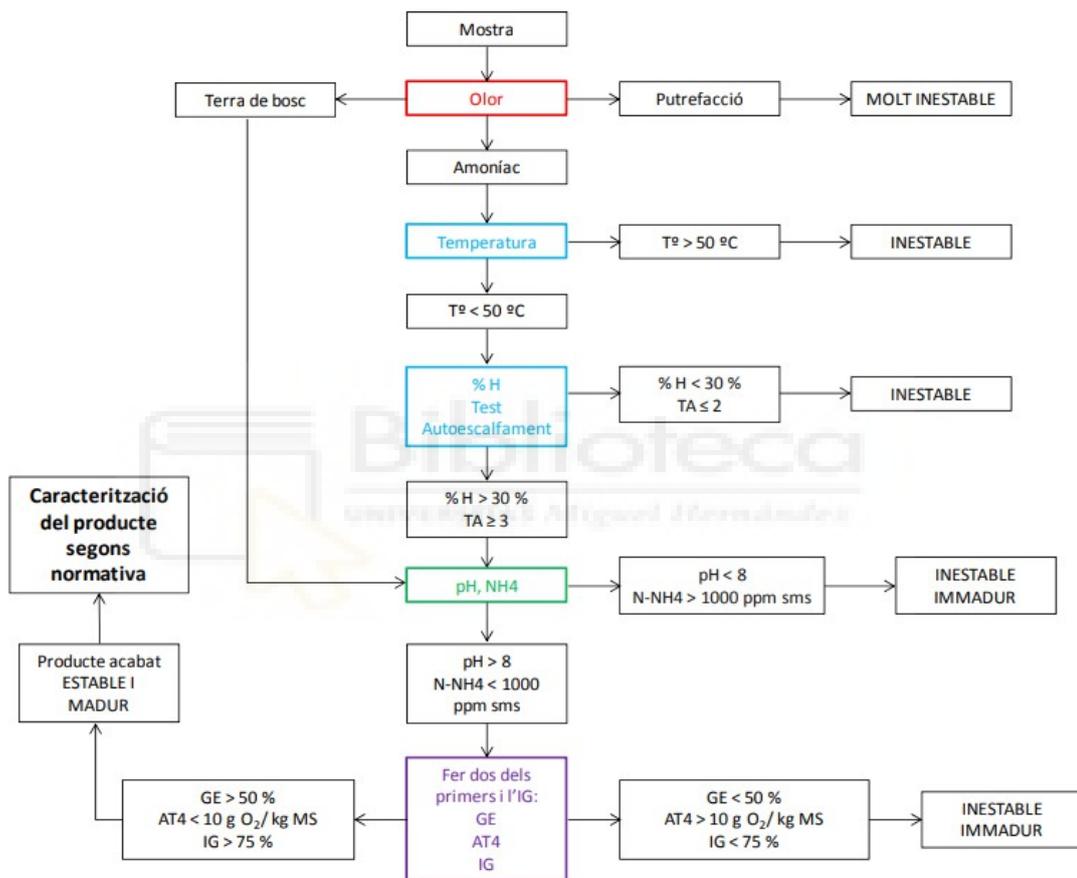


Figura 2: Diagrama de determinaciones para evaluar la estabilidad del compost. Fuente: López, et al.; 2013.

### 1.2.2. SISTEMAS DE COMPOSTAJE

Los sistemas de compostaje se clasifican en base a dos aspectos o características: el confinamiento del material y si se realizan volteos del material. La clasificación según volteos se clasifica en 2 tipos:

**Sistemas dinámicos.** El material a compostar se dispone en pilas que son volteadas y aireadas durante el proceso de compostaje. El volteo se suele realizar mediante dispositivos especializados (volteadoras) o bien con maquinaria inespecífica (normalmente palas mecánicas).

**Sistemas estáticos.** En este caso, las pilas no son volteadas, y en el caso que se suministre oxígeno (aire) durante el proceso de compostaje, será de forma estática, como por ejemplo mediante ventiladores.

Y según el confinamiento, se clasifican en tres tipos:

**Sistemas abiertos.** Suelen ser sistemas de bajo coste y tecnología sencilla, aplicables principalmente a pequeñas o medianas comunidades de zonas en las que la disponibilidad de terrenos sea elevada, concibiéndose por tanto para zonas rurales o semirurales. Lo más usual es utilizar sistemas dinámicos.

**Sistemas semicerrados o semiabiertos.** En general se consigue un mejor aprovechamiento del espacio y con unas posibilidades de control de las operaciones de trabajo y del proceso superiores a las de los sistemas abiertos. Lo más común es el material colocado entre muretes longitudinales, siendo desplazado en cada volteo coexistiendo en una misma pila material en distintas etapas del proceso. Otro tipo de tratamiento de residuos orgánicos en pila estática, pero en este caso semicerrada o parcialmente confinada, son los métodos de cubrición por lonas de tejidos semipermeables.

**Sistemas cerrados.** Se aísla el material del contacto directo con el exterior, y todas las entradas y salidas de gases y líquidos se realizan a través de un sistema de conductos, bombas y turbinas. Tecnológicamente se encuentran en esta categoría los sistemas de compostaje más sofisticados y complejos. Sus dos principales ventajas respecto a los anteriores son el excelente control de emisiones al medio y la afinada monitorización de los parámetros del proceso, pero también ahorran espacio pues presentan la

posibilidad de una inmejorable relación entre el volumen de residuo tratado y la superficie ocupada.

### 1.2.3. CALIDAD DEL COMPOST

Si el proceso de compostaje se ha completado de forma adecuada lo que se obtiene es un producto con un alto contenido en materia orgánica estabilizada, con una importante presencia de nutrientes asimilables por las plantas, incrementando la concentración de materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Los beneficios que un compost de calidad tiene en los suelos no acaban ahí, ya que también resulta beneficioso para la estructura física de los suelos (Herrick, et al.; 1997), incrementando su porosidad, disminuyendo su densidad, favoreciendo la formación de agregados y su estabilidad, aumentando la capacidad de captación y retención de agua (Guidi, et al.; 1988) y disminuyendo su erosión (Ballif, et al.; 1991). Además, ha sido comprobado también su efecto como supresor de plagas y patógenos de las plantas (Trillas, et al.; 2004).

Pero si el proceso no se ha realizado de forma adecuada, y no se alcanzó o no se mantuvo tiempo suficiente la fase termófila, podemos encontrarnos un compost final con patógenos que pueden ser introducidos al suelo, alterando la microbiota. Es por ello que, tanto desde la Unión Europea como a nivel estatal, han surgido normativas para regular y poner límites a distintos parámetros, no solo para evitar esa alteración de la microbiota, sino también para determinar la calidad del compost dependiendo del contenido de patógenos.

La normativa aplicable es a nivel europeo el *Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, por el que se establecen disposiciones relativas a la comercialización de los productos fertilizantes UE*, y a nivel español, el *Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes*, ya mencionado.

En cuanto a los contaminantes inorgánicos, los metales pesados son los que tienen un efecto potencialmente más significativo sobre el medio ambiente. Así en la legislación española se han clasificado diversos tipos o calidades de compost en función de su contenido en metales pesados (Tabla 4).

Tabla 4.- Límites máximos autorizados de la concentración de metales pesados según las legislaciones europea y española. Todas las unidades en mg·kg<sup>-1</sup> (s.m.s.).

Metales Pesados	Reglamento UE 2019/1009	RD 506/2013		
	Compost	Clase A	Clase B	Clase C
Cd	2	0,7	2	3
Cr	-	70	250	300
Cr hexavalente (Cr VI)	2	No detectable	No detectable	No detectable
Hg	1	0,4	1,5	2,5
Ni	50	25	90	100
Pb	120	45	150	200
Cu	300	70	300	400
Zn	800	200	500	1000

Según el RD 506/2013, la limitación del compost de clase C es que no puede aplicarse sobre suelos agrícolas en dosis superiores a cinco toneladas de materia seca por hectárea y año. Además, también habrá requisitos de cantidades de aplicación en las zonas designadas como vulnerables, ajustándose al programa de actuación establecido en cada caso.

El principal problema de los metales pesados y el compostaje es que estos resultan completamente transparentes para el proceso biológico, con la paradoja de que cuanto mejor y más eficiente sea la degradación biológica, mayores concentraciones de metales pesados habrá en el compost final. Es por tanto muy importante recalcar que, si se pretende obtener un compost de alta calidad, antes que el tipo de estructurante, el sistema o la tecnología de compostaje a emplear, el factor más importante es la materia prima que se va a tratar. El caso de los purines es especial, pues debido a los aditivos empleados en los piensos de alimentación las deyecciones porcinas presentan elevadas concentraciones de cobre y zinc. Por tanto, se puede obtener un compost final de calidad en todos los parámetros físicos y químicos excepto en las

concentraciones de cobre y especialmente de zinc, que exceden los límites legales para considerarlo compost (Plana, 2009).

Aparte de los metales pesados, para determinar si se ha seguido un proceso de compostaje adecuado, en la normativa RD 506/2013 de productos fertilizantes, se determinan otros parámetros requisitos. Estos son los niveles máximos de microorganismos, como son la *Salmonella*, que debe estar ausente en 25 g de producto elaborado, y el caso de la *Escherichia coli*, que no puede superar los 1000 número más probable (NMP) por gramo de producto elaborado.

Finalmente, otros parámetros de calidad que hay que tener en cuenta según el Real Decreto 506/2013, y que se identifican unas tolerancias máximas, va en función del grupo en el que se identifica el compost, normalmente debido a su composición. Pero de forma genérica, se evalúan su contenido en nutrientes N-P-K, elementos secundarios (Ca, Mg, Na y S), relación C/N, porcentaje de materia orgánica, densidad, y características físicas como la granulometría.

Para determinar estos parámetros, hay laboratorios certificados que realizan los análisis correspondientes, también determinados en la normativa RD 506/2013.

Además, también se puede considerar para determinar la calidad del compost, otros parámetros no obligados por normativa, como es la calidad biológica del compost mediante métodos moleculares (metagenómica), es decir, determinando la cantidad de hongos y bacterias y su estabilidad, determinada mediante índices respirométricos. Otro parámetro sería la madurez del compost, es decir su estabilidad, ligada con el posible carácter tóxico de un compost, determinado mediante métodos como son el test de germinación o índice de germinación y la prueba de Microtox. Estos parámetros permiten asegurar una adecuada aplicación a campo, ya que un compost inestable podría causar efectos adversos en las semillas para su germinación o durante su crecimiento, debido a una inhabilitación de nutrientes y oxígeno a las plantas.

Por ello, el test de germinación es un ensayo para ver de forma genérica la eficiencia para el crecimiento de las semillas o si, en caso contrario, existe inhibición de crecimiento.

El índice de germinación (IG) fue propuesto por primera vez por Zucconi en 1981 y ha sido ampliamente utilizado para la evaluación de la calidad del compost, de hecho, en algunos países, como es el caso de Italia, es un requisito para su comercialización. Aun así, al no tener un procedimiento establecido universal y existir diferentes variaciones en el procedimiento según las semillas utilizadas y las diluciones seleccionadas en los extractos acuosos de compost, puede existir alguna problemática con la significación de los datos obtenidos.

Microtox es un método para determinar la toxicidad de los residuos acuosos antes y después del tratamiento biológico. Fue diseñado por Strategic Diagnostic Inc. (Azur Environmental). Desde 1979, las depuradoras de aguas residuales (EDAR) han utilizado los resultados del ensayo de toxicidad aguda Microtox para medir y ayudar a garantizar el cumplimiento de los límites de toxicidad en las corrientes afluentes, como también determinar la eficacia del tratamiento en las depuradoras de aguas residuales industriales y municipales.

Aunque Microtox se aplicó inicialmente para medir la toxicidad aguda de aguas naturales y residuales, también es aplicable tanto a muestras sólidas (sedimentos y suelos) como a sus extractos acuosos (Bulich, et al.; 1990; Azur Environmental, 1994; Onorati, et al.; 2004).

Este ensayo corresponde a una técnica fotométrica que usa la respuesta a la exposición de compuestos tóxicos por parte de una bacteria marina bioluminiscente como puede ser *Vibrio fischeri*, sensible a gran variedad de sustancias tóxicas, incluso cuando están presentes en bajas concentraciones. Por tanto, es ampliamente utilizado debido a su sensibilidad, poder discriminante, reproducibilidad y fácil aplicación para contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Con todo ello, la clave en la utilización del compost está en el conocimiento de sus características intrínsecas y de la valorización agronómica de la materia orgánica para el incremento de la fertilidad de los suelos. Los nutrientes que aporta el compost son de lenta liberación y las mejoras en la producción de los cultivos se aprecian en los años posteriores, por lo que es muy difícil evaluar el verdadero valor agronómico de la aplicación de un compost, y menos aún pretender compararlo o asemejarse a los fertilizantes químico-minerales. La aplicación de compost al suelo no puede ser evaluada simplemente por sus efectos agronómicos a corto plazo, sino como una práctica agrícola sostenible (Tittarelli, et al.; 2002).

La aplicación regular y controlada de compost al suelo, siguiendo buenas técnicas agrícolas, reduce el problema de la pérdida de materia orgánica (Tittarelli, et al.; 2002); actúa como secuestrador de carbono, tanto de CO<sub>2</sub> de la atmósfera, como de la materia orgánica que no se descompone en forma de CO<sub>2</sub> y comienza el proceso de humificación; contribuye a la reducción de los gases de efecto invernadero (Favoino, 2008) ya que evita que los restos orgánicos se descomponen anaeróticamente, lo que supondría la producción de metano, una molécula con un efecto invernadero 25 veces superior a la de CO<sub>2</sub>. Además, su empleo como fertilizante disminuiría la necesidad de fertilizantes minerales y el uso de pesticidas adicionales, importantes generadores de gases de efecto invernadero en su producción, ya que el compost por sí solo aportaría los nutrientes necesarios (Favoino, 2008).

Aún con todas esas propiedades y beneficios, cabe preguntarse dónde falla el sistema para que el compost no tenga una aplicación más extendida. Como se ha visto, las administraciones están dando los pasos para garantizar que el término "compost" se asocie a un proceso controlado de compostaje, pero todavía queda un largo camino por recorrer. Un paso muy importante en este sentido, que ya se ha dado en buena parte de Europa, es la de promover la construcción de pequeñas plantas de compostaje próximas a las zonas de utilización del compost, así como formar a los consumidores sobre su utilización.

### 1.3. DIGESTIÓN ANAEROBIA

Otro proceso de descomposición microbiológica de la materia orgánica es la digestión anaeróbica o anaerobia, es decir, en ausencia total de oxígeno. Con este procedimiento se obtiene el biogás, un gas combustible compuesto mayoritariamente de metano y dióxido de carbono, y una fracción residual denominada digestato. El biogás generado se puede considerar un buen combustible, y es útil para la generación de calor y/o energía eléctrica (Flotats, 2008).

Según el Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios, el término “digestato” se define como: *“material orgánico obtenido por digestión anaerobia conforme a los requisitos de las Categorías de Material Componente 4 y 5 (CMC4 y CMC5) del anexo II del Reglamento (UE) 2019/1009”*.

La digestión anaeróbica es un proceso complejo en el que intervienen diferentes grupos de microorganismos. La materia orgánica se descompone en compuestos más sencillos que se transforman en ácidos grasos volátiles, que son los principales intermediarios y moduladores del proceso. Estos ácidos son consumidos por los microorganismos metanogénicos, que producen metano y dióxido de carbono. Todos estos procesos tienen lugar de forma simultánea en el reactor. Los diseños utilizados para la digestión anaeróbica pueden clasificarse en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en este reactor.

Del proceso, puede producirse un digestato terminado, cumpliendo los requisitos exigidos por la normativa anterior (Reglamento UE 2019/1009), y por tanto, sin necesitar ningún tipo de tratamiento más. O bien, se puede obtener un digestato que no se lo considera terminado, usualmente por incumplimiento de algunas características del reglamento para poner en el mercado, y por tanto, requiere un tratamiento adicional, ya sea anaerobio o bien un aerobio como es el compostaje.

En la actualidad, se tratan mediante digestión anaerobia residuos agrícolas y ganaderos, lodos de depuradoras, residuos industriales orgánicos, aguas residuales y la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. La naturaleza y composición química del material inicial a digerir, condiciona la composición cualitativa de la población microbiana de cada etapa, afectando el equilibrio del sistema (Hernandez-Gomez, 2016).

Al igual que con el compostaje, se necesita controlar una serie de parámetros para asegurar un buen desarrollo del proceso. Uno de ellos es el pH, que debe mantenerse cercano a la neutralidad. Otro importantísimo es la alcalinidad y el potencial redox, para asegurar que se produzca el equilibrio químico y evitar una acidificación. También se necesita disponer de una serie de nutrientes y relación C/N, para que las bacterias puedan desarrollarse adecuadamente (Pérez, et al.; 2022).

Además, de estos parámetros, también hay otros operacionales, es decir del reactor dónde se realiza la digestión, necesarios para un buen funcionamiento. Es el caso de, por ejemplo, la temperatura o la agitación. Las reacciones que se dan durante la digestión anaerobia son de carácter endotérmico, por lo cual se debe aportar calor para mantener la temperatura deseada en el reactor. Este reactor puede operar a diferentes rangos de temperatura en torno a los 35°C (mesofílicos) o rangos de alrededor de 55°C (termofílicos), y hay que mantener un grado de agitación moderado. También se tiene en cuenta el tiempo de retención hidráulico (cociente entre el volumen del digestor y el caudal de tratamiento) y la velocidad de carga orgánica (VCO), es decir la cantidad de materia orgánica introducida en el digestor por unidad de volumen de reactor y tiempo (Pérez, et al.; 2022).

## 1.4. MATERIALES BIODEGRADABLES Y COMPOSTABLES

Los materiales biodegradables son aquellos de origen natural o sintético que se descomponen por la acción de agentes naturales biológicos como bacterias y hongos.

Este proceso de biodegradación, hace que las moléculas que forman el material inicial se vayan rompiendo al biodegradarse. El tiempo que puede tardar en degradarse, varía dependiendo de las condiciones tanto ambientales como las características del material. La tecnología está permitiendo desarrollar metodologías industriales para crear materiales que sean asimilables para la naturaleza. Ese potencial, es un gran avance para la transición hacia una Economía Circular.

Aun así, hay que tener en cuenta que no todos los materiales biodegradables se degradan por sí solos en la naturaleza, o como mínimo, en poco tiempo. Se empieza a usar la diferenciación de materiales biodegradables y de materiales compostables, ya que podría parecer lo mismo, pero no lo es. Tal y como se ha explicado anteriormente, el compostaje es un proceso deliberado y controlado, para acelerar el proceso de biodegradación natural. Existen algunos materiales que se biodegradan durante el proceso de compostaje, son compostables, pero su degradación en el medio ambiente, aunque ocurre, es mucho más lenta.

En los dos casos necesitan condiciones óptimas para que esa degradación suceda. Por ello, es muy importante saber qué tipo de biodegradabilidad se considera y cómo se debe gestionar (Plana, 2009).

Por tanto, en principio, aquellos materiales claramente biodegradables serán esos que partan de materias primas de origen vegetal (frutas, verduras, cereales, etc.), carne, excrementos, papel o cartón, madera, e incluso lana de origen animal, aunque esta última dependiendo del tratamiento que haya recibido podría requerir de más complejidad para degradarse.

Aparte de su origen, hay que aclarar en qué casos, una vez usado para su función principal y convertirse en residuo, sería compostable o no. Por ello, en la normativa RD 506/2013, se declaran todos aquellos residuos que se consideran biodegradables, y por tanto, que serían aptos para asegurar una buena biodegradabilidad posterior. A continuación se muestran los grandes grupos de residuos orgánicos biodegradables según el RD 506/2013 (Tabla 5).

Tabla 5.- Resumen de la lista de residuos orgánicos biodegradables, según la normativa RD 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.

<b>Lista de residuos orgánicos biodegradables</b>
Materiales relacionados en la lista europea de residuos. Decisión 2001/118/CE de 16 de enero de 2001, transpuesta por la Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero.
02 RESIDUOS DE LA AGRICULTURA, HORTICULTURA, ACUICULTURA, SILVICULTURA, CAZA Y PESCA; RESIDUOS DE LA PREPARACIÓN Y ELABORACIÓN DE ALIMENTOS.
03 RESIDUOS DE LA TRANSFORMACIÓN DE LA MADERA Y DE LA PRODUCCIÓN DE TABLEROS Y MUEBLES, PASTA DE PAPEL, PAPEL Y CARTÓN.
04 RESIDUOS DE LAS INDUSTRIAS DEL CUERO, DE LA PIEL Y TEXTIL.
19 RESIDUOS DE LAS INSTALACIONES PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS.
20 RESIDUOS MUNICIPALES (RESIDUOS DOMÉSTICOS Y RESIDUOS ASIMILABLES PROCEDENTES DE LOS COMERCIOS, INDUSTRIAS E INSTITUCIONES), INCLUIDAS LAS FRACCIONES RECOGIDAS SELECTIVAMENTE.

Actualmente, cada vez se está experimentando más en la creación de materiales biodegradables nuevos. Un ejemplo son los plásticos biodegradables, regulados por la normativa *UNE-EN 14995:2007*. Estos polímeros son capaces de degradarse biológicamente a través del agua (hidrosolubles) u otras condiciones.

Hay que tener en cuenta que para saber si un producto industrial es biodegradable, hay que comprobar si refiere algún tipo de sello, por ejemplo las etiquetas de *Tuv Austria*, “ok biodegradable” u “ok compostable”, regulados por las normativas: *UNE-EN 13432:2001*, *Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación*; y por la *UNE-EN 14995:2007*, *Plásticos, evaluación de la compostabilidad y programa de ensayo y especificaciones*.

Aun así, referente a los envases, hay que tener en cuenta algunos matices sobre biodegradabilidad y compostabilidad, desarrollados en la normativa comentada, *UNE-EN 13432:2001*. Un envase compostable en sí mismo como un todo se considera no compostable si algún componente no es compostable. Sin embargo, si los componentes no compostables se pueden separar fácilmente, una vez separados, los componentes compostables si se consideran compostables.

Además, en la normativa anterior, también se comentan los requisitos para la evaluación de la tratabilidad biológica de los envases o embalajes y sus componentes, el cual debe incluir como mínimo los siguientes cinco procedimientos de evaluación: caracterización, biodegradabilidad, desintegración, calidad del compost e identificabilidad (procedimientos con normativa ISO de instrucción).

Para crear plásticos biodegradables, se han desarrollado en los últimos años polímeros biodegradables, con el objetivo de mantener las propiedades y la funcionalidad de los polímeros convencionales. Actualmente, se están utilizando en varios ámbitos tales como bolsas de plástico, embalajes industriales, embalaje doméstico y la restauración, la medicina o productos para la agricultura y la horticultura (Zapata, et al.; 2012).

En su mayoría, los polímeros biodegradables y/o biopolímeros se pueden producir mediante una gran variedad de tecnologías, a partir de recursos naturales tanto de origen animal como vegetal. Por ejemplo, pueden ser obtenidos a partir de extractos de plantas y vegetales como el maíz, el aceite de palma, soja, patatas, caña, remolacha, etc. y pueden ser procesados usando los métodos convencionales como extrusión de película plana, moldeo por inyección y moldeo por soplado.

El criterio general para seleccionar un polímero como material biodegradable considera tanto las propiedades mecánicas requeridas como el tiempo de degradación necesario para la aplicación particular. Entre los mecanismos básicos de degradación de un polímero, se aceptan cinco básicos: fotodegradación, degradación mecánica, degradación térmica, degradación química y degradación mediante microorganismos.

En la tabla 6 se observan las diferencias entre los plásticos convencionales y los biodegradables.

Tabla 6: Comparativa entre los plásticos convencionales y los plásticos biodegradables (Zapata, et al.; 2012).

Plásticos convencionales	Plásticos biodegradables
Utilizan como materia prima recursos no renovables	Su producción es sostenible a partir de residuos de la agroindustria
Se acumulan en el ambiente	Se degradan fácilmente por la acción de microorganismos
Su reciclado puede generar sustancias tóxicas al medio ambiente	Su biodegradación produce $O_2$ y $H_2O$

Un ejemplo de polímero biodegradable es la sacarosa. La sacarosa es un carbohidrato de bajo peso molecular a partir de la cual es posible elaborar nuevos materiales como polímeros hidrosolubles, biodegradables o biocompatibles. Algunas aplicaciones para los polímeros elaborados a partir de sacarosa son sistemas de administración de fármacos, medicina dental, bioimplantes, lentes de contacto, entre otros (Flores, 2009).

En la agricultura y horticultura también se encontraron estudios de plásticos de invernaderos para la agricultura hechos a base de almidón (Zapata, et al.; 2012).

Estos estudios de polímeros a base de sacarosa o de almidón, concluyen que para que los polímeros biodegradables puedan reemplazar a los polímeros sintéticos, necesitan de un diseño apropiado que contenga las mismas propiedades estructurales y funcionales durante el procesado y uso final, además de ser susceptibles a la degradación una vez desechados. Pero, por el momento, no se han podido igualar esas propiedades en todas las aplicaciones de los plásticos tradicionales (Zapata, et al.; 2012).

### 1.4.1. MATERIALES PARA APLICACIÓN EN EL SECTOR DOMÉSTICO

A partir de esa búsqueda de sustitución de los polímeros sintéticos, aparece la necesidad de sustituir materiales cotidianos por polímeros biodegradables. Uno de los más populares y presente en el mercado es el uso de bolsas de compra de cartón (material biodegradable) y/o bolsas de plástico biodegradable (comentado en el apartado anterior).

Las bolsas de cartón presentan mejores resultados de biodegradabilidad que las bolsas de plásticos biodegradables (Dolci, et al.; 2022) y, además, se afirma que el uso de cartón crea una comunicación visual positiva para ayudar a combatir el uso del plástico (Swandi, 2021).

Un ejemplo de investigación en el sector, es un estudio donde se evalúa la degradabilidad por exposición al ambiente de bolsas plásticas declaradas como degradables por sus fabricantes, y se comparan con las convencionales. Son bolsas hechas con polihidroxialcanoatos y polilactatos. Se estudiaron tres parámetros como pérdida de masa, absorción de agua y resistencia mecánica. Los resultados mostraron que las bolsas llamadas degradables presentaron mayor pérdida de masa, mayor absorción de agua, y menor resistencia mecánica antes y después de la exposición al ambiente que las bolsas convencionales, demostrando que las modificaciones químicas realizadas por los fabricantes realmente favorecen su degradación (Castellón, et al.; 2016).

Por otra parte, otros materiales biodegradables del sector doméstico conocidos en el mercado son los platos, cubiertos y vasos biodegradables.

Un ejemplo fue el desarrollado por un grupo de estudiantes de la Universidad de Chapingo, Texcoco (México), quienes buscaban crear estos materiales que se pudieran desintegrar en menor tiempo. Para ello, emplean no solo la fibra de coco sino, aprovechar muchos más productos que normalmente son desechados por no tener el conocimiento de cómo sacarles más provecho, este es el caso de las cáscaras de

plátano. Con esto, quedó comprobado que la fibra de coco y las cáscaras de plátano son una alternativa adecuada para reemplazar en un futuro el plástico convencional. Además, también concluyen que, para la elaboración de materiales de este tipo, se pueden utilizar otras materias primas, como es la caña de azúcar (Cubilla, et al.; 2019).

Otro grupo de trabajo planteó el desarrollo de platos biodegradables a base de cascarilla de cacao. En este caso, se centraron en la viabilidad económica del producto, concluyendo que el precio por unidad puede ser elevado frente a los otros platos biodegradables y platos desechables descartables que se encuentran actualmente en el mercado. Aun así, destacan que son materiales muy acumulados en las zonas estudiadas (Colombia) y al menos son procesos de fabricación de productos sostenibles amigables con el medio ambiente (Gaitán, et al.; 2021).

Finalmente, en el caso de los materiales domésticos biodegradables, se destaca un estudio técnico-económico de un material biodegradable desconocido como es la fabricación de un filtro de jarras de agua “tipo Brita” en material biodegradable (Chacón, 2016). En este caso, se emplea el Ácido Poliláctico (PLA) como polímero matriz y nanotubos de Halloysita y el acetato de polivinilo (PVA), agente compatibilizante usado para asegurar la unión de los dos primeros materiales (Chacón, 2016).

El estudio determina que se trata de unos materiales adecuados para la aplicación planteada, ya que las materias primas utilizadas son de procedencia natural y de fácil biodegradación (se desintegra en 6 semanas en condiciones de compostaje). El estudio de biodegradabilidad en condiciones de compostaje se realizó según la norma ISO 20200 (Chacón, 2016).

#### **1.4.2. MATERIALES DEL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN**

En la industria de la construcción y mantenimiento tradicionalmente se usan aislantes como fibra de vidrio, espumas poliméricas termoestables y telas de relleno. Aunque pueda hallarse estudios de los beneficios del uso de fibras naturales en aplicaciones de

nuevos diseños, no son utilizadas por falta de información de las propiedades de esos elementos biodegradables (Velásquez, et al.; 2016).

Aun así, durante la revolución industrial, el yute reemplazó por un largo tiempo a las fibras de cáñamo, demostrando algunas ventajas sobresalientes como sus propiedades aislantes y antiestáticas, así como su baja conductividad térmica y moderada retención térmica (Ramón, 2017). El yute es uno de los principales competidores de la fibra sintética encontrándose hoy en día como una de las fibras más asequibles económicamente que existen en el mercado, teniendo así varias aplicaciones en materiales decorativos y mobiliarios (Ramón, 2017).

Por lo que hace a sus características, las fibras vegetales como el yute, están compuestas de células largas y delgadas de esclerénquima, que aportan con la tarea de brindar soporte, dureza y rigidez a los tejidos vegetales (Dávila, et al.; 2011). Estas características se muestran en la siguiente tabla de comparación con las fibras sintéticas (Tabla 7).

Tabla 7: Comparativa entre fibras naturales y sintéticas.

<b>Cualidades</b>	<b>Fibras naturales (FN)</b>	<b>Fibra sintética</b>
Densidad	Baja	Doble que las FN
Costo	Bajo	Mayor que las FN
Renovable	Si	No
Reciclable	Si	No
Consumo de energía	Bajo	Alto
Abrasión a máquinas	No	Si
Riesgo a la inhalación	No	Si
Eliminación	Biodegradable	No Biodegradable

Fuente:(V.H. Guerrero et al, 2011, citados en Wanbua, 2003, p. 86)

Otro elemento protagonista en el sector de la construcción, son los tableros aglomerados. El 90% de la industria del aglomerado utiliza un adhesivo derivado del petróleo, llamado urea formaldehído, considerado una sustancia química tóxica. Pero desde la Escuela Politécnica Superior de Orihuela (EPSO), un estudio dirigido por Teresa García Ortuño, trabajan para transformar los residuos vegetales en tableros de

partículas tipo aglomerado. Además del uso de restos de poda para el tablero, también sustituyen el uso de productos químicos en la unión de partículas con adhesivos o mediante un proceso de presión con calor (Ferrandez, et al.; 2020). Aparte de ser materiales reciclados y degradables, estos tableros, transcurridos alrededor de veinte años en los que suelen dar servicio, pueden triturarse y rehacerse de nuevo (Pardos, 2015).

Los materiales propuestos en el anterior estudio, los restos de poda, podrían tener una principal competencia, como es el mercado de las calderas de biomasa. Pero no todos los restos de poda son adecuados para ello, ya que algunos de sus componentes (como el arsénico, el azufre o el silicio) estropean las calderas. Por ejemplo, las hojas, los tallos o la paja no funcionan bien para biomasa, pero sí para construir tableros. Con eso, se concluye como positivo el uso de restos vegetales para la creación de tableros, surgiendo la necesidad para transferir este conocimiento a la industria maderera, ya que podría ahorrar costes de gestión de residuos y, sobre todo, ambientales (Ferrandez, et al.; 2020).

Aun así, es un sector que se conoce por su poca predisposición de esos usos, gran parte debido a la no existencia de leyes que obliguen al constructor a implementar este tipo de tecnologías o materiales más sostenibles (Serrano, et al.; 2017). Por suerte, actualmente, se empiezan a desarrollar proyectos e iniciativas de empresas de construcción, principalmente en el sector privado, con su principal característica el uso de materiales biodegradables. Un ejemplo es el proyecto de la empresa *HONEXT*.

#### **1.4.3. MATERIALES DEL SECTOR DE LA AGRICULTURA**

En el sector de la agricultura también hay concienciación con el uso de materiales biodegradables. Los más comunes actualmente son aquellos para la sustitución de los plásticos usados para plantel, para acolchado y para láminas de invernaderos o túneles bajos.

Estos elementos son mayoritariamente creados a partir de polietileno de baja densidad. Por ello, se estudió el rendimiento, la degradabilidad en el suelo y el impacto ambiental del uso de acolchados biodegradables y túneles bajos a base de almidón (Kapanen, et al.; 2008). La vida útil de los acolchados biodegradables fue de 9 meses y de los túneles biodegradables de 6 meses. Además, continuaron creando un clima y una temperatura adecuada para los cultivos. Al final del período de cultivo, los acolchados biodegradables se rompieron y se enterraron en el suelo del campo junto con los residuos vegetales. Un año después del entierro, se encontró en el suelo menos del 4% del peso inicial de la película biodegradable, dando un resultado positivo de los materiales (Kapanen, et al.; 2008). Aun así, los impactos de los acolchados biodegradables en las plantas cultivadas y en los organismos del suelo permanecen en su mayor parte sin descubrir, pero apuntan a alterar el desarrollo de las plantas. Se ha visto que existe una sensibilidad según los tamaños y la cantidad de fragmentos no degradados de los acolchados en las plantas. Aún así, depende de la especie de las plantas (Serrano-Ruiz, et al.; 2021).

Por otro lado, también existen estudios sobre el uso de materiales poliméricos naturales en los hidrogeles, materiales reservorios de agua para las plantas y aumentando la capacidad hídrica de los suelos. Las biocápsulas creadas para estas funciones pueden ser hechas de materiales naturales como alginato, agar, celulosa, quitosano y almidón. De esta forma, continúan realizando el papel de almacenamiento de agua pero también se les añade el factor de una sostenibilidad extra para las plantas. Además, estos materiales naturales incorporados en los hidrogeles aportan macro y microelementos para una mayor fertilización (Skrzypczak, et al.; 2020).

#### **1.4.4. MATERIALES DEL SECTOR DE AUTOMOCIÓN**

La problemática de la contaminación ambiental, incluso llega a ser una preocupación para el sector de automoción. Un gran número de piezas y componentes automotrices que son reemplazados, ya sea porque cumplieron su vida útil o que se han roto, son depositados en vertederos sin tomar en cuenta que su proceso de descomposición es

complejo. En la industria automotriz se utiliza mucho los termoplásticos pero se busca que crezca el interés por los polímeros biodegradables reforzados con fibra natural ya que al final de su vida útil pueden ser enterrados y se degradaran, reduciendo el impacto ambiental (Nagaraja, 2013).

Por ello, se desarrolla un proyecto de desarrollo de una carrocería para el vehículo *Fórmula Student*, utilizando fibra animal (crin de caballo) y fibra vegetal (cabuya) como refuerzos unidos a una matriz de resina poliéster (Bravo, et al.; 2021).

Los resultados obtenidos fueron favorables debido a que el material presenta excelentes características mecánicas a los diferentes esfuerzos, reduciendo considerablemente la masa en un 41,95%, con relación a la carrocería 2012 que sirvió como referencia, y que fue fabricada con fibra de vidrio y resina poliéster. El grupo constituido por una matriz con refuerzo de 2 capas de crin de caballo y 1 capa intermedia de fibra de cabuya como tejidos planos presentó mejores características mecánicas y valores de resistencia última a la tracción y utiliza mayor energía media de fallo (EMF) en comparación de los demás grupos. La optimización de otros procesos de fabricación de material compuesto para el desarrollo de las probetas y la carrocería son necesarios de incorporar a este tipo de aplicaciones, ya que la estratificación manual no permite que las fibras de crin se junten adecuadamente y hay que aplicar un peso adicional.

Por lo que hace a la posterior degradación de estas fibras vegetales y animales usadas para la fabricación de materiales para el sector de automoción, no se llega a evaluar esa propiedad, dando por hecho su característica al ser fibras obtenidas del medio natural. Es decir que es un campo abierto para caracterizar las condiciones adecuadas para que se produzca adecuadamente esa biodegradabilidad.

Aun así, hay estudios que emplean las fibras naturales para acelerar y/o mejorar procesos de descomposición, afirmando su gran potencial de biodegradabilidad (Fakhrul, 2013). Como también, se añaden en estudios para eliminar metales pesados de acuíferos contaminados (Mayacela, et al.; 2017), dando resultados positivos y

consecuentemente reafirmando esa propiedad ambiental adecuada para el medio ambiente.

#### 1.4.5. BATERÍAS BIODEGRADABLES

Un nuevo producto dónde emerge la necesidad de ser más sostenibles son las baterías. A día de hoy, la cadena de valor de la fabricación de baterías está globalizada, como ocurre con los productos eléctricos y electrónicos. Los aspectos más críticos asociados a su fabricación son el uso de materiales no renovables y escasos obtenidos en países con mínimos estándares ambientales y sanitarios, las etapas intensivas de transporte y la gestión al final de su vida útil. De hecho, después de su uso, sólo unas 297.667 toneladas de las baterías y componentes de las baterías se reciclan en España (Instituto Nacional de Estadística, 2021), con procedimientos de gran consumo energético, mientras que el resto terminan incineradas o en los vertederos, generando emisiones de gases de efecto invernadero tóxicos y dejando atrás una importante huella de carbono.

Por ello, existe desde la UE la nueva ley *“Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC”*, que pretende garantizar que las baterías comercializadas en la UE sólo contengan una cantidad restringida de sustancias nocivas. Es decir que, todas las baterías deberían lograr altos niveles de recuperación, en particular de materias primas críticas como el cobalto, el litio y el níquel. Esto garantizará que los materiales valiosos se recuperen al final de su vida útil y se reintegren a la economía mediante la adopción de objetivos más estrictos para la eficiencia del reciclaje y la recuperación de materiales a lo largo del tiempo.

Existen varios estudios y propuestas desarrolladas, como, por ejemplo, unas nuevas baterías biodegradables a base de celulosa y el pegamento natural que los moluscos

usan para adherirse a las rocas, que una vez completada su vida útil, pueden desintegrarse en condiciones de compostaje (Mittal, et al.; 2023).

Otro ejemplo, es la creación de baterías para los sistemas de precisión electrónicos aplicados en la agricultura inspirados en la naturaleza. Este trabajo presenta una batería de flujo profundamente inspirada en la naturaleza, que imita el transporte de fluidos en las plantas para generar energía eléctrica. La batería fue ecodiseñada para cumplir con un ciclo de vida para aplicaciones de agricultura de precisión. Desde la selección de la materia prima hasta las consideraciones de desechabilidad, la batería está concebida para minimizar su impacto ambiental y al mismo tiempo cumplir con los requisitos de energía en agricultura (Navarro-Segarra, et al.; 2022).

En el estudio demuestran la practicidad del prototipo con una prueba de alimentación de un dispositivo inalámbrico para el cuidado de plantas, viendo que la batería alcanza una autonomía energética de hasta cuatro días con la configuración actual y proporcionando suficiente energía para las secuencias de arranque, monitorización pasiva y comunicación bluetooth. Se encontró que el tiempo operativo estaba limitado a la degradación del par redox de quinona seleccionado en particular; por tanto, podría ampliarse mediante el uso de reacciones químicas redox más estables (Navarro-Segarra, et al.; 2022).

En última instancia, los resultados obtenidos en las pruebas de germinación y biodegradación aeróbica muestran que esta batería agotada podría desecharse de forma segura o convertirse en abono como residuo agrícola, de forma similar a la forma en que una planta regresa a la naturaleza al final de su ciclo de vida (Navarro-Segarra, et al.; 2022).

Al final, la idea para desarrollar una batería biodegradable y funcionalmente práctica es mediante la exploración de diferentes especies redox apropiadas para el desarrollo de dispositivos ecológicos. En otro estudio, desarrollan una batería biodegradable hecha de papel, electrodos de carbono, especies redox orgánicas y cera de abeja. La batería tiene una degradación biótica, es decir, los microorganismos presentes en suelos y

aguas pueden degradar la batería a compuestos básicos con un mínimo impacto ambiental. Esta nueva clase de baterías de flujo redox portátiles y biodegradables es ideal para proporcionar energía a una nueva generación de dispositivos electrónicos ecológicos (Lara, et al.; 2018).

Finalmente, se encuentra otra alternativa, como es el desarrollo de baterías de ión-litio, presentándose como una alternativa más atractiva y realista para el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica a gran escala, es decir para permitir la implantación general de las fuentes de energía renovable, así como la consolidación del vehículo eléctrico. No obstante, es necesaria la identificación de nuevos materiales para los electrodos (activos, aditivos conductores, aglomerantes) que mejoren las prestaciones de estas baterías sin aumentar el coste y respetando los principios de sostenibilidad (Cuesta, 2016).

Por el momento, existe una primera actividad dónde se prepararon nanomateriales grafiticos (nanofibras de grafito) mediante tratamiento térmico, a alta temperatura, de nanofibras de carbono producidas en la descomposición catalítica de biogás, una fuente de energía renovable. Las nanofibras de grafito con una estructura tridimensional muy ordenada se utilizaron como material activo en ánodos de baterías de ión-litio. Las prestaciones electroquímicas de estos nanomateriales son comparables e incluso superiores, a altas densidades de corriente, a las del grafito sintético de tamaño micrométrico que se produce a partir de combustibles fósiles, y se utiliza masivamente en las baterías de ión-litio comerciales. Aún así, quedando un largo recorrido de investigación y aplicación (Cuesta, 2016).

## 2. OBJETIVOS

El objetivo global de este trabajo es la determinación del efecto de la degradación de baterías biodegradables en la toxicidad del compost y del digestato.

### 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar búsqueda bibliográfica sobre materiales biodegradables.
- Comprobar dos métodos de evaluación de calidad de un compost.
- Evaluar la calidad de un compost resultante tras la degradación de una batería biodegradable.
- Evaluar la calidad de un digestato resultante tras la degradación de una batería biodegradable.



### 3. MARCO DE TRABAJO

Una vez revisada toda la bibliografía actual con relación a los residuos orgánicos y los materiales biodegradables y compostables, para alcanzar los objetivos propuestos en el proyecto, se llevó a cabo un proceso experimental en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Barcelona, en Bellaterra (Cataluña). Allí se ha colaborado con el *Grup de Recerca de Compostatge (GICOM)* del Departamento de Ingeniería Química, Biológica y Ambiental que participa en el proyecto Bideko, un proyecto de investigación a nivel nacional.

El Marco del proyecto Bideko (*Bideko Project: Biodegradable and compostable batteries for precision agriculture and decentralized energy systems*), pretende cambiar el paradigma actual de las baterías primarias de un tamaño único a un nuevo modelo a medida donde las baterías están ecodiseñadas para adaptarse al ciclo de vida del dispositivo a alimentar. Con el proyecto, se prevé materializar este cambio de paradigma mediante el desarrollo de demostradores de baterías, específicamente diseñados para dispositivos de potencia dentro del área de la agricultura de precisión. Dentro de los objetivos del proyecto, está previsto evaluar la viabilidad de las baterías siguiendo un escenario alternativo de final de vida, es decir, compostadas o biodegradadas en entornos naturales.

A partir de aquí, nace la colaboración del presente trabajo fin de máster participando en esa evaluación final de las baterías creadas por el proyecto BIDEKO.

En los siguientes apartados, se detallan los materiales usados y la metodología seguida para desarrollar los objetivos comentados anteriormente.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se exponen los materiales usados para la parte experimental del trabajo final y su metodología precedida.

### 4.1. CARACTERIZACIÓN BATERÍAS BIODEGRADABLES

Tal y como se ha comentado, las muestras a analizar de este trabajo final de máster, contienen un prototipo de batería biodegradable. A continuación, se exponen estos prototipos usados, diseñados por el proyecto BIDEKO.

Estas baterías imitan la estructura de una batería convencional pero cambiando los materiales para conseguir esa biodegradabilidad y compostabilidad (figura 3 y 4).



Figura 3: diseño de una batería convencional (Ficha técnica batería proyecto Bideko)

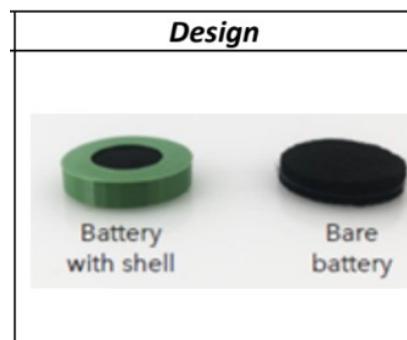


Figura 4: diseño de la batería propuesta biodegradable (Ficha técnica batería proyecto Bideko)

En detalle, las baterías biodegradables propuestas en el proyecto Bideko, están compuestas por los siguientes componentes:

- 1) Estructura exterior que protege la batería compuesta por un bioplástico "Compost 3D" 100% compostable según proveedor.
- 2) Conductor de electrones entre el material activo del electrodo con la terminal de la batería compuesta de grafito, con algunos posibles efectos tóxicos.

El grafito o grafeno es un material formado por el metamorfismo del material orgánico en los sedimentos y ocurre en los esquistos y mármoles. Se encuentra asociado con minerales como: cuarzo, feldespato, micas, calcita, piritita y óxidos de hierro. Sus aplicaciones son principalmente en la industria del hierro y el acero.

El grafeno es capaz de generar electricidad a través de la energía solar, por lo que podría ser una buena opción en el campo de las energías limpias. Aun así, puede tener algún efecto secundario. Según los estudios llevados a cabo por investigadores de la Universidad de Brown y de la Universidad de California, uno de los peligros del grafeno es el óxido de este material, que se forma cuando se expone al aire libre y que puede moverse a través del agua, pudiendo distribuirse en aguas superficiales como lagos o ríos, causando contaminación ambiental.

Otro efecto negativo, es que los bordes dentados del material pueden perforar fácilmente las membranas celulares y la piel tanto de humanos como de animales, afectando por tanto sus células en caso de ingerir el material.

- 3) Membrana matrix compuesta por alginato de sodio (polisacárido procedente de algas), nanocelulosa (tejido biodegradable obtenido a partir de la fibra de la madera) y glicerol (un alcohol). Ninguno de los tres presenta posibles efectos tóxicos.

El alginato de sodio se usa como gelificante y para hacer esferificaciones. Disuelto en agua entra en rápida reacción con otro líquido rico en calcio solidificando de manera muy rápida creando una estructura muy estable y resistente.

La nanocelulosa consta de nanofibras de celulosa, siendo ligera, fuerte y rígida, y con un alto coeficiente de resistencia respecto a su peso. Además, es estable en cuanto a los cambios de temperatura y tiene propiedades ópticas interesantes (es transparente). Sus aplicaciones van desde la elaboración de pantallas para dispositivos electrónicos hasta el cultivo de órganos. Según Juan José Ugarte, presidente de la Corporación Chilena de la Madera, Corma, la nanocelulosa tiene características únicas: liviana, impermeable y biodegradable.

Por último, el glicerol o también glicerina ( $C_3H_8O_3$ ), se trata de un alcohol de los principales productos de la degradación digestiva de los lípidos, paso previo para el ciclo de Krebs y también aparece como un producto intermedio de la fermentación alcohólica. Además, junto con los ácidos grasos, es uno de los componentes de lípidos como los triglicéridos y los fosfolípidos. Se presenta en forma de líquido a una temperatura ambiental de 25 °C y es higroscópico e incoloro. En la industria, se desarrolla como un subproducto de la oleoquímica, por ejemplo, de las grasas vegetales o animales y de sus ácidos grasos.

- 4) Iones compuestos por ácido ascórbico (vitamina C) + hidróxido de potasio (alcalino fuerte extremadamente corrosivo).

El Ácido ascórbico o vitamina C o antiescorbútica, aparte de ser esencial para la salud humana y de algunos mamíferos; también desempeña un rol importante en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Además, a nivel tecnológico, este ácido es un buen conductor siendo un elemento natural esencial para el funcionamiento de una batería.

Por lo que hace el hidróxido de potasio (KOH), es altamente tóxico y causa irritación de la piel y las membranas mucosas de los ojos y la nariz. Por tanto se debe evitar ingerir y/o manipular directamente en contacto con la piel. Aun así, debido a sus propiedades cáusticas, blanqueadoras y secantes, el hidróxido de potasio se usa ampliamente en las industrias química (producción de detergentes), automotriz, farmacéutica, alimenticia y de belleza. Para baterías, el hidróxido realiza la función de electrolito, facilitando la conducción de electrones mediante iones.

- 5) Cationes formados por nitrato de hierro nanohidratado y ácido oxálico dihidratado, dos componentes sólidos cristalinos.

El nitrato de hierro nanohidratado se utiliza en la tintura de textiles, en el curtido de pieles, como reactivo químico y como agente anticorrosivo. Los altos niveles de esta sustancia pueden reducir la capacidad de la sangre de transportar oxígeno, causando dolor de cabeza, cansancio y mareo.

El ácido oxálico, es conocido por su capacidad para eliminar manchas de óxido y actuar como agente reductor y quelante en diversas aplicaciones industriales. Aún así, es un químico corrosivo y tóxico en altas concentraciones. Puede causar irritación en la piel, los ojos y las membranas mucosas, así como daño renal y gastrointestinal si se ingiere.

## 4.2. CARACTERIZACIÓN COMPOST Y DIGESTATO

Una vez caracterizada la batería, procedemos a la caracterización de las muestras usadas para la parte experimental: un compost y un digestato resultantes de los experimentos de biodegradabilidad de la batería. A todas ellas se les aplica un proceso de degradación. Estos experimentos de degradación fueron realizados anteriormente por el proyecto BIDEKO, dónde desde el presente trabajo no se ha estado presente. A continuación se resumen estos tratamientos de degradación previos.

Para las pruebas de degradación aeróbica se utilizó compost obtenido de la planta situada en Granollers (Barcelona, España), cuyas materias primas son a partir de una mezcla de biorresiduos municipales domésticos descentralizados. Las características del material de partida eran las siguientes: pH: 8,23; Conductividad: 3,54 mS/cm; Materia seca: 79,01%; Materia orgánica: 51,15%. El material se mantuvo almacenado en refrigeración de 2-4°C.

Para determinar el grado de biodegradación de las baterías degradables y sus respectivos componentes, se evaluó mediante el método aeróbico controlado según la Norma UNE-EN 13432 para medir la cantidad de CO<sub>2</sub> producida (Figura 5).



Figura 5. Diagrama de proceso de compostaje aeróbico. A) Proceso completo del montaje de reactor aeróbico; B) Cuantificación de la producción de CO<sub>2</sub>; C) Fórmula para el cálculo de biodegradación (%).

Las pruebas de biodegradabilidad aeróbica se realizaron en reactores cilíndricos de PVC de fabricación propia de 0,5 L (13 cm de alto x 7 cm de diámetro) con entrada y salida de aire forzado (al 20,9% de O<sub>2</sub>). Se mantuvo un caudal constante a 15 ml min<sup>-1</sup> con un medidor de flujo másico (Mass-Stream D-6311, Bronkhorst, NL). La temperatura del incubador (Memmert IF 160, Schwabach, Alemania) se fijó en 37°C. El contenido de humedad del compost se ajustó inicialmente al 54% y se mantuvo con riegos periódicos en función de la necesidad. El aire entraba saturado en agua tras pasar por un humidificador, lo que ayuda a mantener la humedad de la muestra (Figura 5).

Estas pruebas se realizaron para tres tipos de muestras:

- Compost: correspondiente al blanco únicamente utilizando el compost (100g).
- Celulosa: correspondiente al control, que consiste en la misma cantidad de compost (100 g) más 8 g celulosa. Este tipo de muestra no se ha usado en este trabajo fin de máster.
- Batería: correspondiente a la muestra, que consiste en 100 g de compost más 8 g de baterías triturados correspondiente a 4 baterías.

El consumo acumulado de CO<sub>2</sub> se determinó según la Norma UNE-EN 13432 utilizando trampas de NaOH para detección de CO<sub>2</sub> por medio de la cuantificación de carbono inorgánico total (TIC).

En la figura 6B se muestra la producción de CO<sub>2</sub> del test de degradación aeróbica a 37°C donde se observa que ha habido degradación de la batería. En la figura 6A se observan imágenes correspondientes al montaje del ensayo incluido el compost resultante después del proceso de degradación con algunos fragmentos recuperados al final de la degradación.

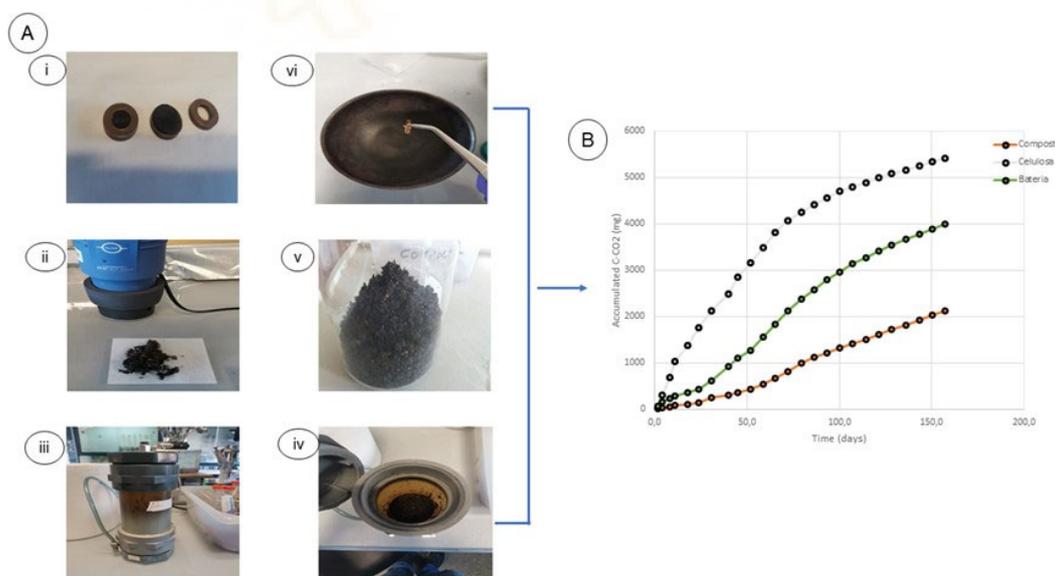


Figura 6. Proceso de degradación aeróbica a 37 °C. A) Material de partida y montaje del test i) baterías BIDEKO y sus componentes; ii) Trituración de la batería; iii) Montaje del reactor; iv) Interior del reactor; v) Compost resultante; vi) Fragmentos y compost recuperados al final del test; B) Gráfica de C-CO<sub>2</sub> acumulado (mg) de los controles, así como la batería.

Por otro lado, como inóculo para las pruebas de degradación anaerobia, se utilizó digestato de la recirculación de un digester anaerobio de la EDAR (Estación Depuradora de Aguas Residuales) de Granollers (Barcelona, España). El inóculo se mantuvo almacenado en un ambiente anaeróbico a una temperatura de  $\pm 37^{\circ}\text{C}$  (inóculo mesófilo) y se acondicionó una parte a una temperatura de  $58^{\circ}\text{C}$ . Las propiedades del inóculo eran las siguientes: pH: 7,43; Sólidos totales (ST): 4,5% sólidos volátiles (SV/ST): 51,7%; Densidad (g/L): 962,46.

El test se realizó siguiendo la Norma ISO (ISO 11734) para medir la producción de biogás (Figura 6). Brevemente se utilizaron frascos de vidrio de 250 ml, los cuales se llenaron con 150 ml de inóculo dejando 100 ml de espacio de cabeza (Figura 7A). Se añadió 1 g de Bateria (BIDEKO 0) a las botellas, que se trituraron en trozos pequeños para aumentar el área de contacto y para controlar la generación de gas a partir del lodo de inoculación, se aplica como control positivo una botella de referencia que contiene 0,4 g de celulosa microcristalina (Sigma-Aldrich). Al mismo tiempo se aplica como blanco una muestra que solo contiene inóculo. Luego se cierra la válvula (tapón). En el caso del control positivo, blanco y muestra se realizaron por triplicado. Todos los frascos se almacenaron en una incubadora (Mettler IF 160, Schwabach, Alemania) a  $37^{\circ}\text{C}$  o  $58^{\circ}\text{C}$  para el test en condiciones mesófilas o termófilas respectivamente.

Las botellas que contenían el inóculo más las muestras sólidas (baterías) fueron monitoreadas dos veces por semana hasta los 30 días y luego se cambió el tiempo de medición una vez por semana, en el proceso se realizaron mediciones de presión. Para la medición de la presión del biogás mediante el uso de un manómetro digital de alta precisión (barras con 2 decimales) posteriormente se tomaron mediciones de la concentración de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) utilizando en un cromatógrafo de gases (Figura 7B). Los análisis de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  se realizaron utilizando un cromatógrafo de gases (GC) HP 5890 (Agilent Technologies, Inc., Santa Clara, CA, EE. UU.). Para el análisis de  $\text{CH}_4$ , el GC HP 5890 se equipó con un detector de ionización de llama (FID), el GC se equipa con una columna Supelco Porapak Q ( $250^{\circ}\text{C}$ ) de  $3\text{ m} \times 1/8$  pulgadas (Agilent Technologies, Inc.) con  $\text{H}_2$  como gas portador a una presión de 13,79

kPa. El volumen de inyección utilizado para cada muestra fue de 100  $\mu\text{L}$  y el tiempo total de análisis fue de 80 segundos y 1,6 minutos para  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , respectivamente.

En la figura 7 se observa los resultados del test de degradación anaerobia donde se puede apreciar una mejor degradación de la batería en condiciones termófilas (Figura 7C y 7D).

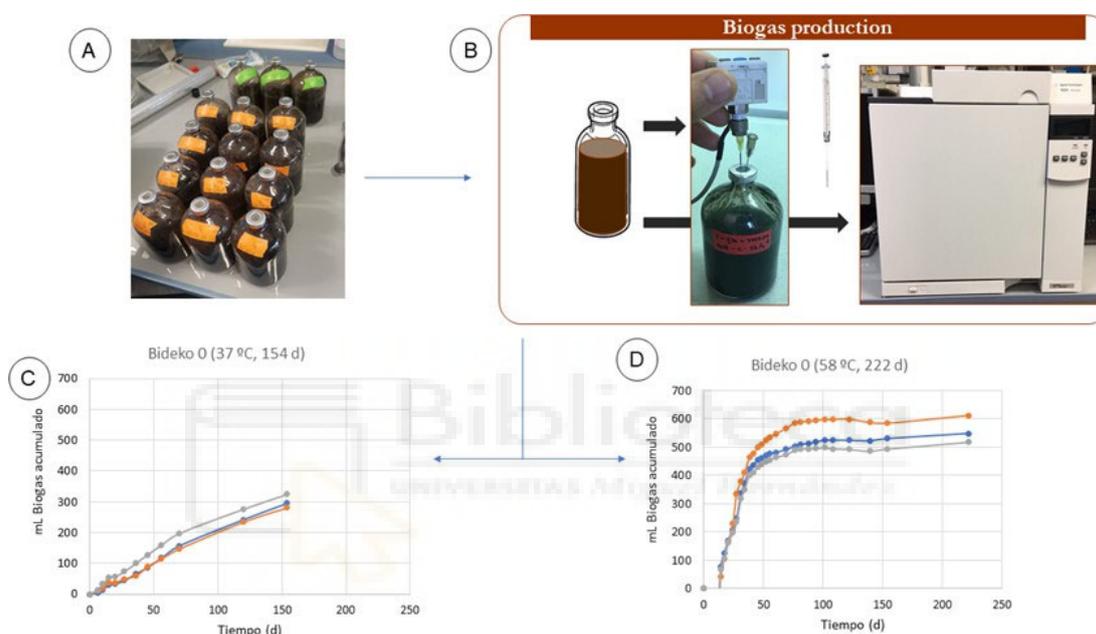


Figura 7. Prueba de degradación anaeróbica. A) Botellas de 250 mL donde se han llevado a cabo los ensayos anaerobios; B) Proceso de producción y cuantificación de biogás por lectura de presión y cromatografía de gases; C) Gráfica de producción de biogás acumulada a 37°C; D) Gráfica de producción de biogás acumulada a 58°C.

Una vez degradadas las muestras, se realizó la caracterización de las muestras, eso sí, realizándose en el presente trabajo. Se ha determinado el pH, la conductividad eléctrica, la materia seca y la materia orgánica oxidable.

Para la medición del pH, se utilizaron extractos del material mezclándolo con agua, con una dilución 1:10, y agitadas en agitador, siguiendo la normativa UNE-EN ISO 10390:2022. El pH se determinó usando el pHmetro (figura 8).

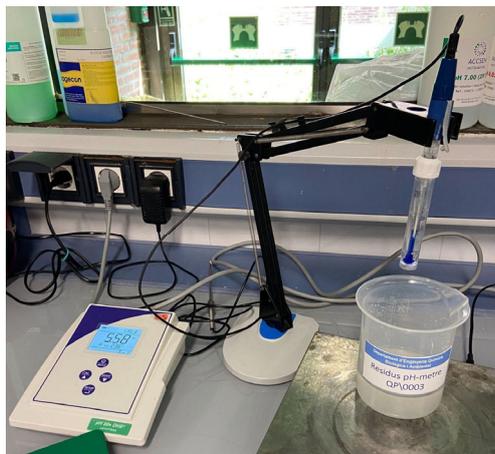


Figura 8: pHmetro. Fuente: propia en el laboratorio de investigación de GICOM.

Para la medición de la conductividad eléctrica, se utilizaron extractos del material mezclándolo con agua, con una dilución 1:10, y agitadas en agitador, siguiendo la normativa UNE-EN ISO 27888:1994, y medida mediante un conductímetro.

Para la medición de la materia seca, se secaron las muestras a 105°C, siguiendo la normativa UNE-EN ISO 11465:2011.

Para la medición de la materia orgánica oxidable, se siguió la normativa UNE-EN ISO 103204:2019, llevando las muestras a un secado de 550°C en una estufa mufla para su calcinación, y así, obtener valores por diferencias de peso con la muestra húmeda.

Una vez caracterizadas las muestras, se ha procedido con dos determinaciones experimentales: el test de germinación y el test Microtox.

## 4.3. TEST DE GERMINACIÓN

### 4.3.1. MATERIALES

- placas de petri
- vaso de precipitado
- papel de filtro
- pipeta de 10ml
- filtro
- centrífuga
- semillas de *Cucumis sativus* (pepino)
- semillas de *Raphanus raphanistrum* (rábano)
- agua destilada

#### Muestras usadas:

- CONTROL (agua destilada)
- COMPOST estándar
- COMPOST + baterías
- Digestado parte sólida
- Digestado parte líquida
- Digestado + baterías parte sólida
- Digestado + baterías parte líquida

### 4.3.2. METODOLOGÍA

Para el test de germinación se ha seguido el método de "*Seedling Emergence and Root elongation*", es decir, el método de "germinación de semillas y crecimiento de la raíz", obtenido de *Test Methods for the Examination of Composting and Compost (Organic and Biological Properties, Biological Assays, 2001)*.

En primer lugar, se ha diluido a 1:10 cada una de las muestras seleccionadas, excepto con 10 ml del digestato líquido para realizar la comparativa con una muestra sin diluir.

Se ha seleccionado esta dilución de 1:10 ya que es la más usada para este test, según la metodología seguida, pero hay que tener en cuenta que cada material puede tener diferencias en contenido de humedad influyendo la dilución seleccionada. Para procurar ser más precisos con la relación agua y sólido de cada muestra, se han centrifugado previamente para eliminar prácticamente todo el contenido de agua, y posteriormente realizar la dilución escogida.

A continuación, se prepararon las placas de petri con papel de filtro. En cada una de ellas se depositaban 10 semillas y 10ml de cada dilución (figuras 9 y 10). De cada muestra se han realizado 3 repeticiones. Además, se ha realizado una placa control, con 10 semillas y 10ml de agua destilada, también con 3 repeticiones.



Figuras 9 y 10: preparación test de germinación. Fuente: propia en los laboratorio de GICOM.

Por lo que hace a la selección del tipo de semilla, en la metodología no hay establecido las semillas ideales para este tipo de test, por eso se recomienda escoger las semillas más usadas según la zona. En este caso, se escogieron dos tipos: semillas de *Cucumis sativus* (pepino) y semillas de *Raphanus raphanistrum* (rábano).

Finalmente, se dejaron las placas de petri con la dilución y las semillas con luz natural no directa. A posteriori, se hizo recuento de las semillas germinadas y su medida a los 5 días y a los 7 días.

Las mediciones realizadas, fueron del tallo y de la raíz por separado; con el objetivo de estudiar la diferencia entre realizar los cálculos tomando solo la medida de la raíz y entre tomando la suma total de tallo y raíz (figuras 11 y 12).

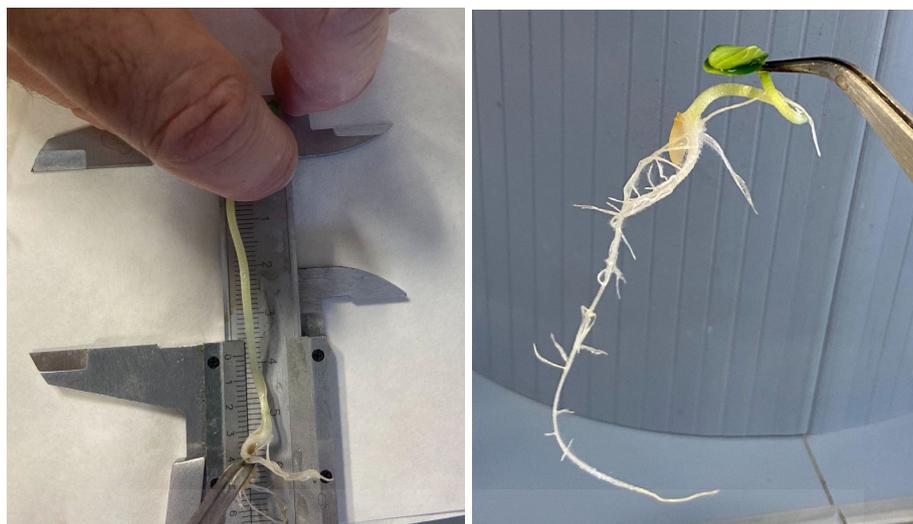


Figura 11 y 12: medición de la elongación de crecimiento de las semillas germinadas. Fuente: propia realizada en los laboratorios de GICOM.

Mediante esas mediciones, medidas en cm, se consigue el porcentaje de elongación de crecimiento, en inglés *Relative Root Elongation*, calculado mediante la siguiente ecuación (ecuación 1) (*Organic and Biological Properties, 05.05 Biological Assays. Three Methods, TMECC. 2001*).

$$E = \frac{C}{D} \times 100 (\%)$$

Ecuación 1: porcentaje de elongación de la raíz/tallo de la semilla respecto al crecimiento de la semilla control (E)

C: media de la medida de crecimiento de raíz de las semillas crecidas en las estudiadas

D: media de la medida de crecimiento de raíz de las semillas crecidas en el control

A partir de los datos obtenidos, se procede a realizar los cálculos de los siguientes indicadores: semillas germinadas o porcentaje de germinación (*seed germination SG*) (ecuación 2), la germinación relativa (*relative seed germination RSG*) (ecuación 3), el crecimiento relativo de la radícula de la semilla germinada (*relative radicle growth RRG*) (ecuación 4) y el índice de germinación (*seed germination index GI*) (ecuación 5).

$$SG = \frac{n^{\circ} \text{ semillas germinadas}}{n^{\circ} \text{ total de semillas}} \times 100\%$$

Ecuación 2: porcentaje de germinación (SG)

$$RSG = \frac{\text{nº de semillas germinadas en la muestra}}{\text{nº de semillas germinadas en el control}} \times 100\%$$

Ecuación 3: germinación relativa (RSG)

$$RRG = \frac{\text{medida de la radícula de las semillas germinadas en la muestra}}{\text{medida de la radícula de las semillas germinadas en el control}} \times 100\%$$

Ecuación 4: crecimiento relativo de la radícula de la semilla germinada (RRG)

$$GI = RSG \times RRG \times 100\%$$

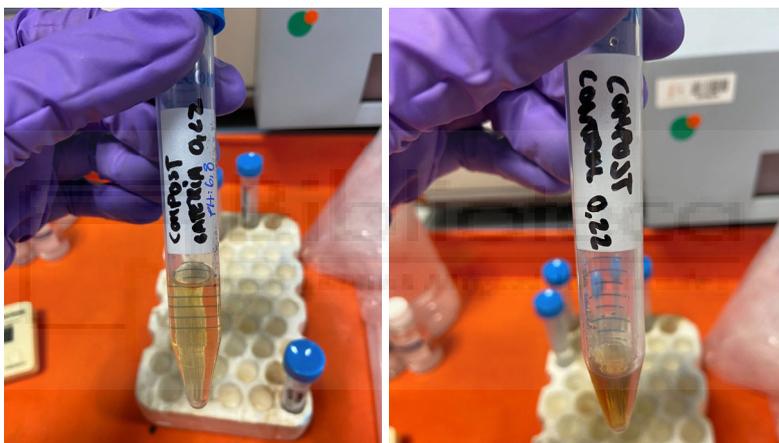
Ecuación 5: índice de germinación (GI)

El índice de germinación, al final es aquel que determina claramente la interacción de los factores que promueven o inhiben la germinación, así como de los respectivos factores que favorecen o impiden el crecimiento de la radícula. Para expresar los resultados, hay que tener en cuenta que el índice de germinación mayor que el 80% implica que no hay fitotoxicidad (Luo, et al.; 2018). Además, al no estar claramente estipulado, se ha realizado el cálculo del índice de germinación usando la medición de únicamente raíz y también usando la medición de la raíz y el tallo.

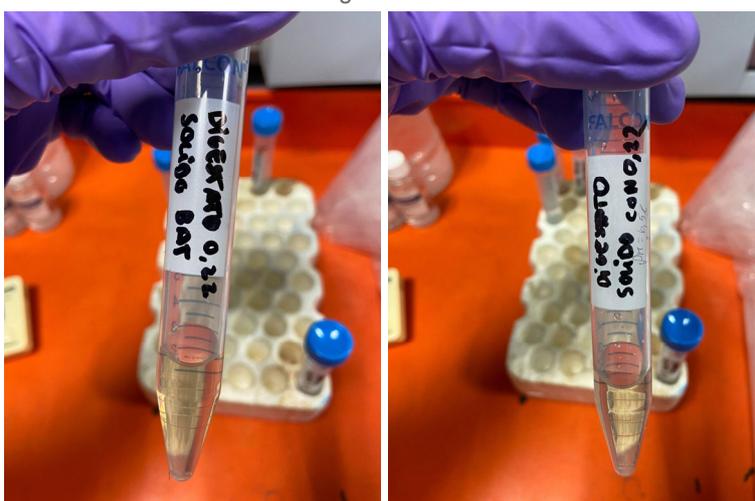
## 4.4. TEST MICROTOX

### 4.4.1. MATERIALES

- Extractos correspondientes a la extracción residuo: agua (1:5) de las muestras escogidas (figuras 13 a 16):
  - Compost control
  - Compost batería
  - Digestato control
  - Digestato batería



Figuras 13 y 14: muestras diluidas del compost para el test de microtox. Fuente: propia en el laboratorio de investigación de GICOM



Figuras 15 y 16: muestras diluidas del digestato para el test de microtox. Fuente: propia en el laboratorio de investigación de GICOM.

- NaCl al 2% y NaCl al 20%. La razón principal de utilizar estas disoluciones salinas es garantizar el adecuado equilibrio osmótico de la bacteria, asegurando así que la disminución de la emisión de luz de la bacteria se debe exclusivamente al efecto de los contaminantes (Onorati, et al.; 2004).
- Suspensión de bacterias *Vibrio fischeri*, es decir, preparado obtenido mediante la propagación en cultivo e inactivación química de las bacterias, eliminando por completo su posible capacidad infecciosa.
- Equipo especializado para el test de microtox, denominado Peltier (figura 17).

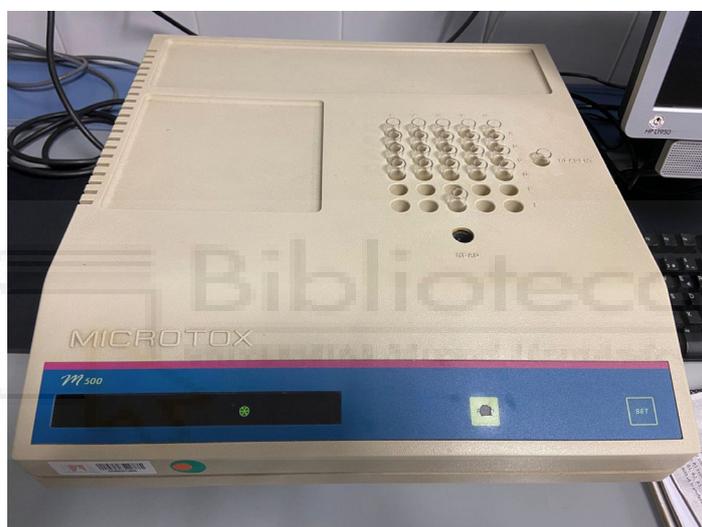


Figura 17: Peltier. Fuente: propia en el laboratorio de investigación de GICOM.

#### 4.4.2. METODOLOGÍA

El bioensayo de toxicidad, distribuido como Microtox, tal y como se ha comentado anteriormente, se basa en una bacteria marina bioluminiscente sensible a sustancias tóxicas mediante alteraciones en el metabolismo afectando la producción de luz. Esas variaciones pueden ser medidas a través de un fotómetro. Como la cantidad de luz es proporcional a la concentración de sustancias tóxicas presentes, la toxicidad relativa de la muestra puede ser calculada a través de  $EC_{50}$ , es decir una concentración efectiva que causa una disminución de la luz en 50%. Por tanto, la toxicidad se calcula mediante la siguiente ecuación (ecuación 6):

$$\text{Toxicidad} = 100/EC_{50}$$

*Ecuación 6: toxicidad*

Todo ello sucede debido a la afectación del sistema de transporte de electrones en la respiración celular sobre la reacción de bioluminiscencia bacteriana. De modo que una disminución de la bioluminiscencia indica la disminución de la respiración celular. Los contaminantes físicos, químicos y biológicos afectan a la respiración celular alterando el porcentaje de síntesis de proteínas y lípidos y modificando por tanto el nivel de emisión de luminiscencia (García, 2004).

Para realizar este análisis, existe el equipo correspondiente, denominado Peltier, que realiza el cálculo fotométrico de forma automática. Este fue el procedimiento a seguir:

1. El pH de las muestras debe estar en un rango comprendido entre 6 y 8. Por tanto, regulamos el pH hasta conseguir estos valores.
2. Una vez preparada la muestra inicial se realizan una serie de diluciones de la misma con NaCl al 2%.
3. Resuspensión de la bacteria, con NaCl 2% e incubación de la suspensión durante una hora.
4. Cuando ya se ha atemperado la suspensión de bacterias se preparan alícuotas de 100 µl y se le añade a cada una de ellas 100 µl de cada una de las disoluciones.
5. 15 minutos de incubación.
6. Se realiza las mediciones y una vez que se han medido todos los tubos, el luminómetro BG-1 da los valores de la concentración efectiva 50 ( $EC_{50}$ ) y la curva de inhibición de luz (figura 18).

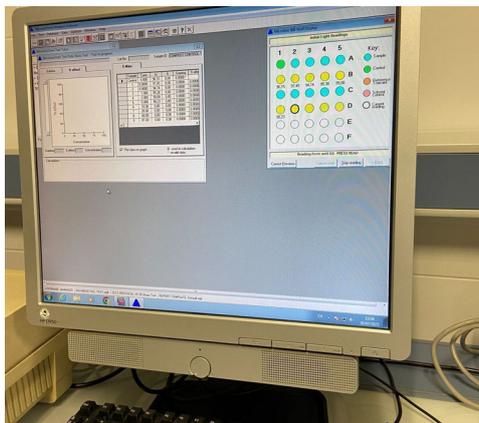


Figura 18: procedimiento del test de microtox. Fuente: propia en los laboratorios de GICOM.

7. Para comprobar la validez de los resultados, se ha empleado un patrón de  $ZnSO_4$ , cuyo valor de  $EC_{50}$  es conocido.
8. Los resultados se evalúan con porcentajes de concentración de muestra estudiada que van desde 0% hasta el 81% de concentración.

Si una muestra no presenta disminución en la emisión de luz a ninguna dilución, la muestra no se considera tóxica y no existe para ella valor de concentración efectiva 50 ( $EC_{50}$ ). Es por eso que se consideran muestras tóxicas aquellas que su efecto sobre la bacteria supere el 50%.

Para el caso de vertidos o aguas, la legislación recoge los valores en equitox/m<sup>3</sup> =  $(1/EC_{50}) * 100$ . En el caso de lixiviados, el valor de toxicidad se da en mg/l, que se corresponde con la expresión  $EC_{50} * 10.000$ .

## 5. RESULTADOS

Una vez presentada la metodología y los materiales empleados en este trabajo de fin de máster, se procede a presentar los resultados de estos.

### 5.1. CARACTERIZACIÓN COMPOST Y DIGESTATO

En la Figura 19, se presentan las fotografías de las muestras de compost (figura 19A) y de digestato (figura 19B) una vez realizado el procedimiento de degradación juntamente con la batería biodegradable.



Figura 19: A) muestra compost con batería. B) muestra digestato con batería. Fuente: propia en los laboratorios de GICOM.

Aun habiendo sufrido un proceso de digestión aerobia y anaerobia respectivamente, se destacan aún algunos puntitos brillantes y verdes restantes en la muestra. Debido a que las baterías prototipo BIDEKO son de color verde, se deduce que son restos de batería.

Por otro lado, en relación a los parámetros para caracterizar las muestras, a continuación se presentan los resultados (tabla 8) de las mediciones de pH, conductividad eléctrica (CE), materia seca (ms) y de materia orgánica (mo).

Tabla 8: pH de los materiales estudiados. CE = conductividad eléctrica; m.s.= materia seca; m.o. = materia orgánica oxidable.

	pH	CE (mS/cm)	m.s. (%)	m.o.(%)
compost control	7,5	4,48	59,74	41,64
compost con batería	6,8	5,27	62,93	41,08
digestato control	6,6	17,55	2,73	51,69
digestato con batería	7,1	17,95	2,65	49,93

## 5.2. TEST DE GERMINACIÓN

A continuación, en las siguientes figuras se muestra la germinación de las semillas de rábano (figura 20) y la germinación de las semillas de pepino (figura 21) en las placas de petri preparadas.



Figuras 20 y 21: resultado germinación semillas de rábano y de pepino, respectivamente. Fuente: propia en los laboratorios de GICOM.

A continuación se presentan los gráficos resultantes del test de germinación realizado en base a las muestras de estudio ya presentadas con las semillas de pepino y de rábano (figuras 22 a 25).

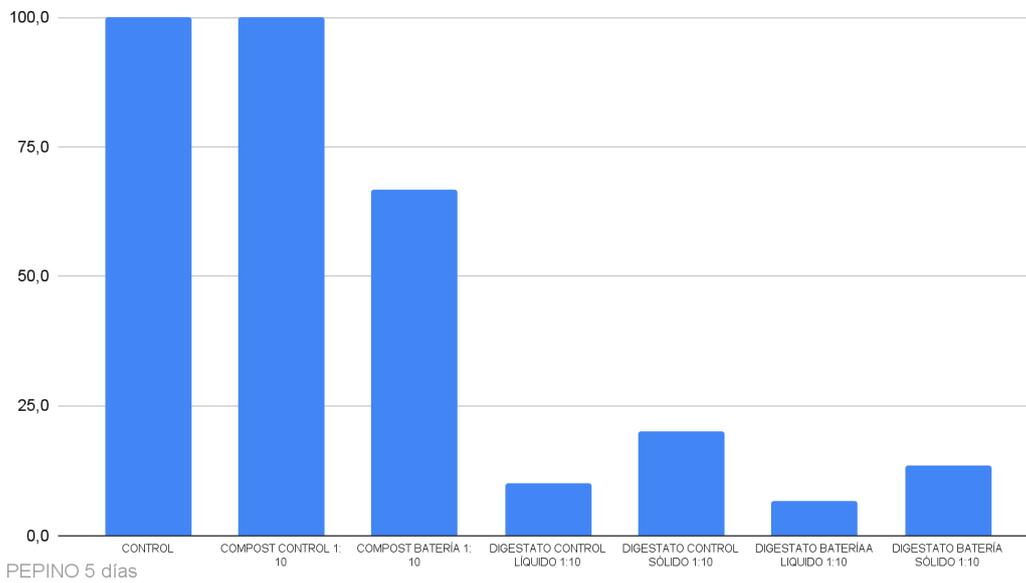


Figura 22: porcentaje de germinación respecto el control (%), en semillas de pepino en 5 días

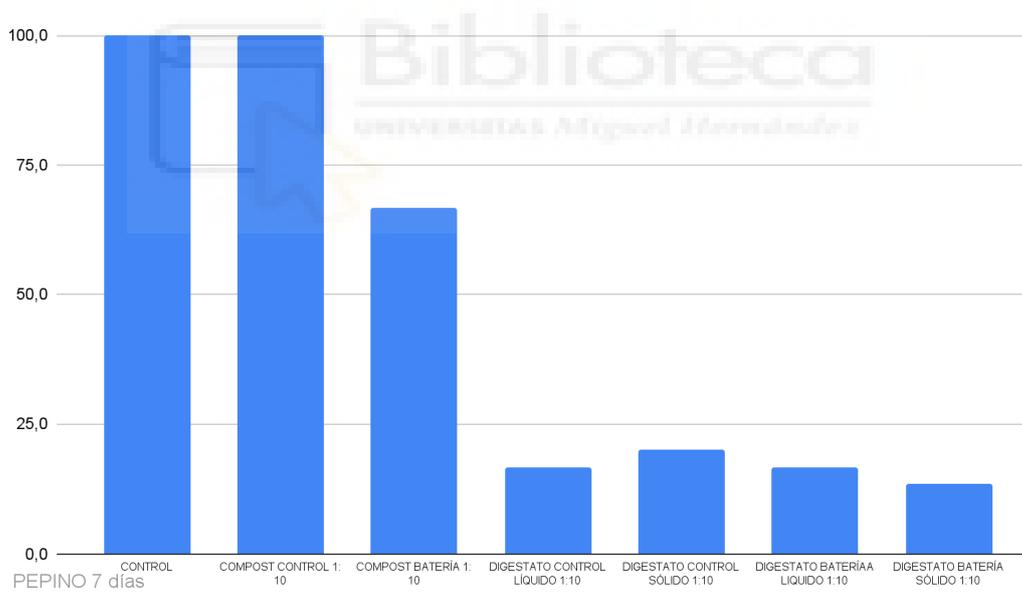


Figura 23: porcentaje de germinación respecto el control (%), en semillas de pepino en 7 días

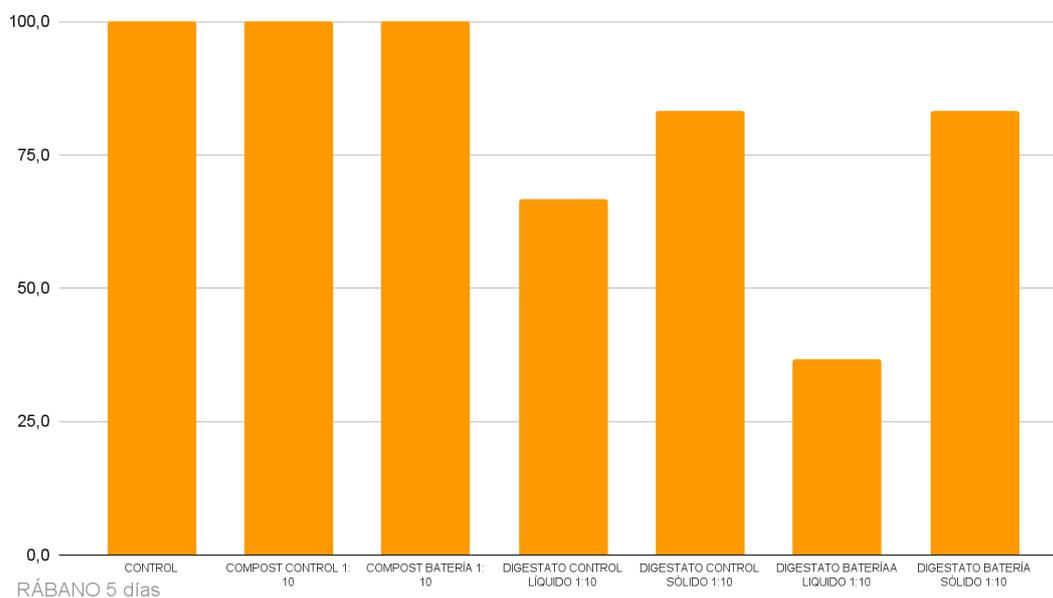


Figura 24: porcentaje de germinación respecto el control (%), en semillas de rábano en 5 días

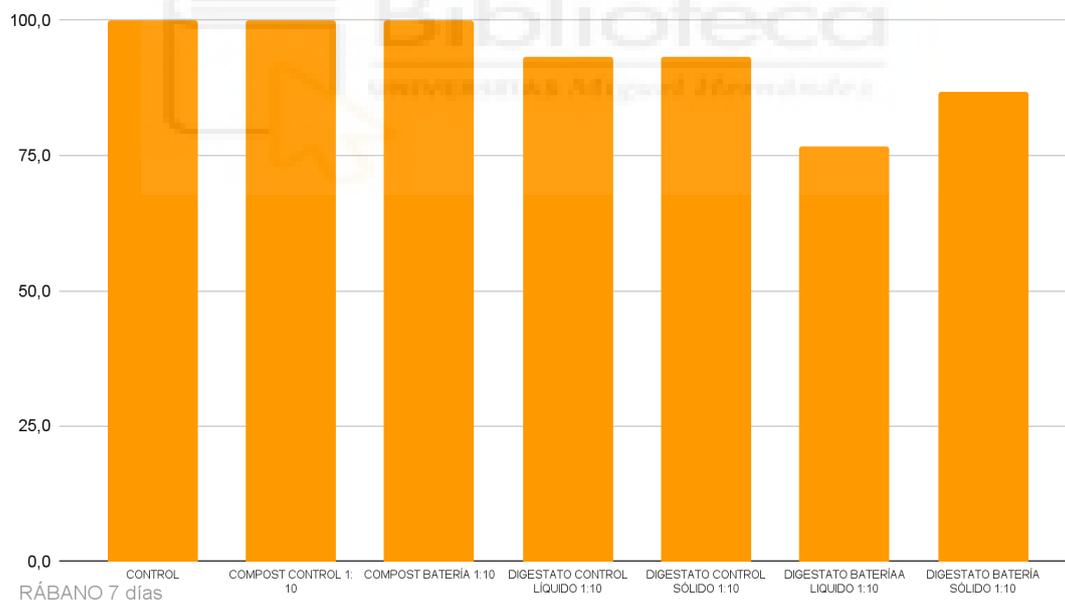


Figura 25: porcentaje de germinación respecto el control (%), en semillas de rábano en 7 días

Como se puede observar, el porcentaje de germinación se ve más elevado por parte de las semillas de *Raphanus raphanistrum* (rábano) (figura 24 y 25) que las de *Cucumis sativus* (pepino) (figura 22 y 23).

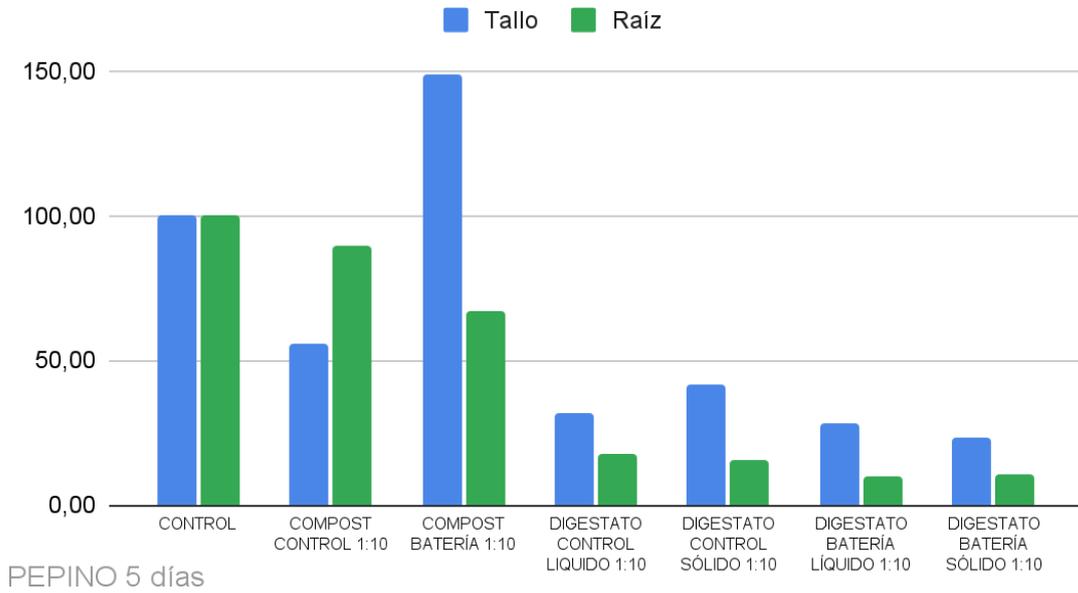
Aun así, en los dos casos, hay una muestra clara y común de no crecimiento de las semillas. Es el caso de las muestras de digestato líquido no diluido, tanto para el digestato sin baterías como el que incluye baterías. Por tanto, estas muestras se han obviado en las figuras (figura 22 a figura 33) para desprestigiar resultados nulos.

Con el resto de muestras, se puede ver también, que en los dos tipos de semillas, presentan mejores resultados las muestras de compost que las de digestato.

En referencia a las muestras que contienen batería, en las semillas de pepino (figuras 22 y 23), sí que se ve un menor crecimiento en aquellas muestras que tienen batería en comparación a las muestras control. Pero, en el caso de las semillas de rábano (figuras 24 y 25), no se ve casi afectado en la gran mayoría por el contenido de batería.

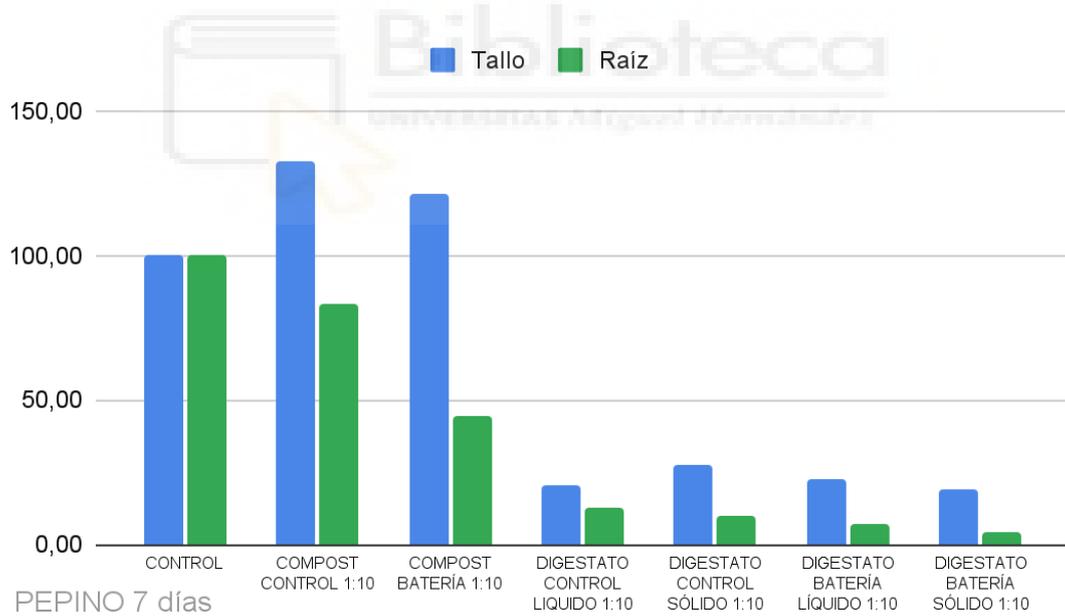
Respecto a los resultados obtenidos en 5 días (figuras 22 y 24) y en 7 días (figuras 23 y 25), en el caso del control y del compost no se ven diferencias, ya que a los 5 días ya han germinado todas las semillas. En cambio, con las muestras de digestato, si se aprecia más semillas germinadas a los 7 días.

A continuación se presentan los gráficos resultantes del porcentaje de elongación de crecimiento realizado en base a las muestras ya presentadas de estudio con las semillas de pepino y de rábano. Tal y como se comentó en la metodología, se tomaron mediciones por separado del tallo y raíz, para posteriormente hacer comparativa de resultados según la medición escogida (figuras 26 a 29).



PEPINO 5 días

Figura 26: porcentaje de elongación de crecimiento de las semillas de pepino germinadas respecto al control (%), en 5 días



PEPINO 7 días

Figura 27: porcentaje de elongación de crecimiento de las semillas de pepino germinadas respecto al control (%), en 7 días

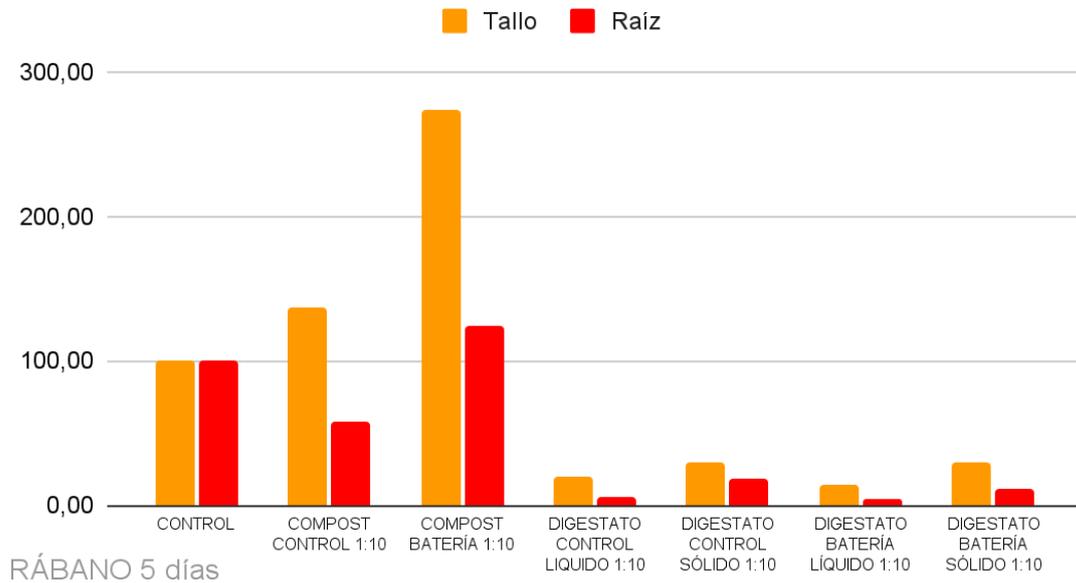


Figura 28: porcentaje de elongación de crecimiento de las semillas de rábano germinadas respecto a control (%), en 5 días

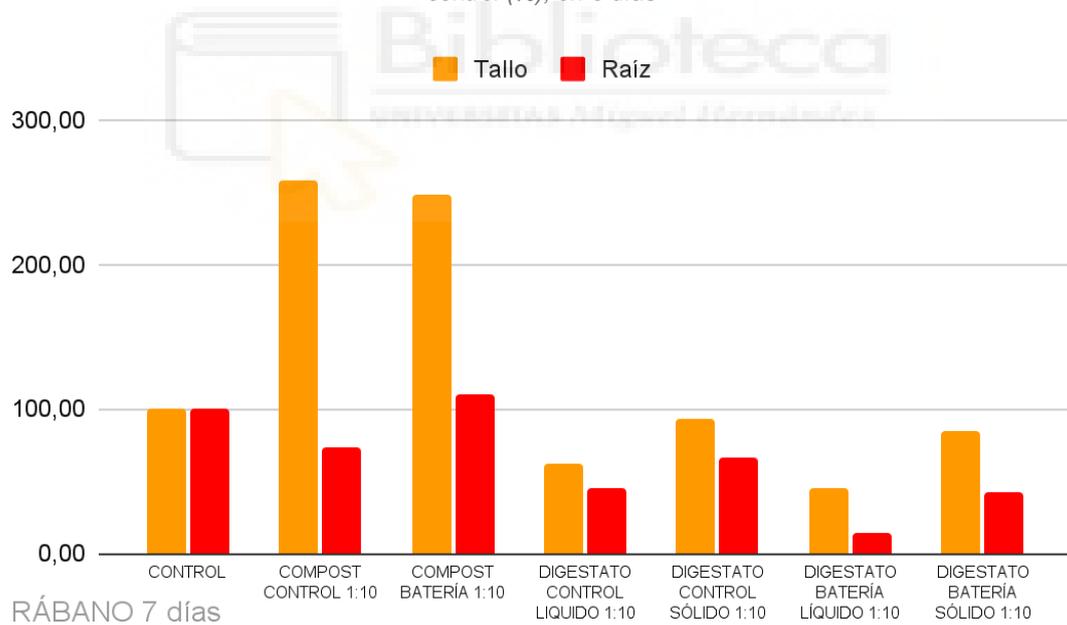


Figura 29: porcentaje de elongación de crecimiento de las semillas de rábano germinadas respecto a control (%), en 7 días.

En estas figuras anteriores también dan mejores resultados las semillas de *Raphanus raphanistrum* (rábano) (figuras 28 y 29) que las de *Cucumis sativus* (pepino) (figuras 26 y 27). En las mediciones del crecimiento de tallo y de raíz de pepino únicamente

superan el 50% un tercio de las muestras, en cambio, las del rábano prácticamente todas superan el 50%.

En las mediciones de la raíz y del tallo (figuras 26 a 29), se ve un mayor crecimiento por parte de las muestras de compost que las del control, pero sigue observándose que las del digestato no dan tan buen resultado como las muestras control o del compost. Además, en el caso de las muestras de digestato, se observa que aquellas de digestato sólido, funcionan mejor que las del digestato líquido.

En referencia a las muestras que contienen batería, las mediciones, en el caso del pepino, no dan tan buenos resultados. Pero, en cambio, con las de rábano, se mantienen unos resultados parecidos, incluso, llegan a crecer más las plántulas con aquel compost resultante de la degradación de batería. Es decir que, el compost con batería estimula el crecimiento de las semillas de rábano, ya que a los 5 días la elongación del tallo ha llegado a los mismos porcentajes que las muestras control en 7 días.

Respecto a los resultados obtenidos en 5 días y en 7 días, la elongación del tallo y de la raíz reacciona diferente en las semillas de pepino que en las de rábano. En las de pepino (figuras 26 y 27), se ve que prácticamente tanto la raíz como el tallo ya no aumenta en el séptimo día respecto al quinto. En cambio, en el caso de las semillas de rábano (figuras 28 y 29), si se ve que la elongación continúa aumentando al séptimo día, alcanzando los mismos porcentajes de elongación que la muestra control.

Finalmente, se presentan los gráficos resultantes del índice de germinación realizado en base a las muestras ya presentadas de estudio con las semillas de pepino y de rábano (figuras 30 a 34).

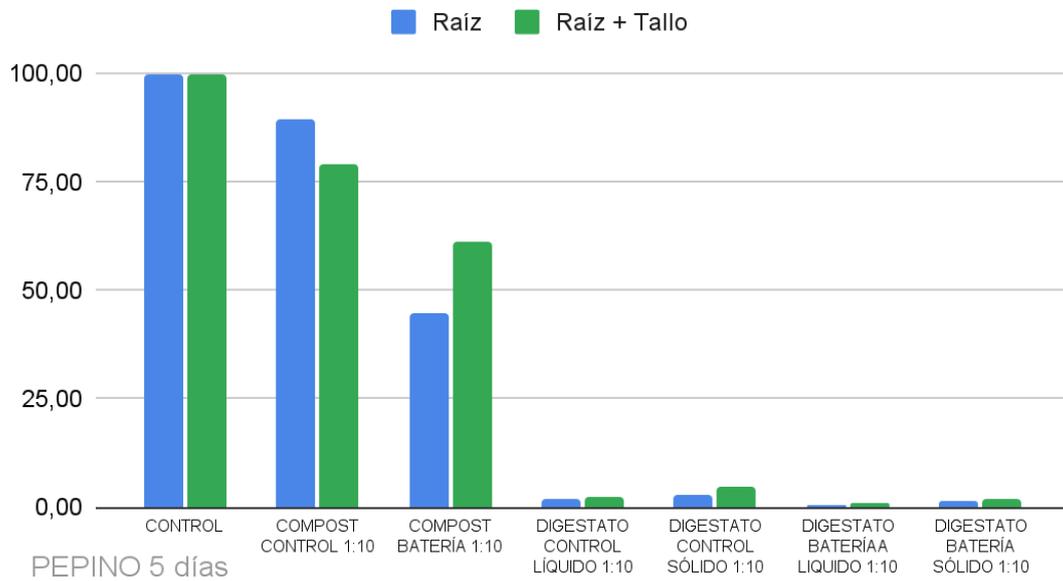


Figura 30: porcentaje del índice de germinación de las semillas de pepino (%), en 5 días

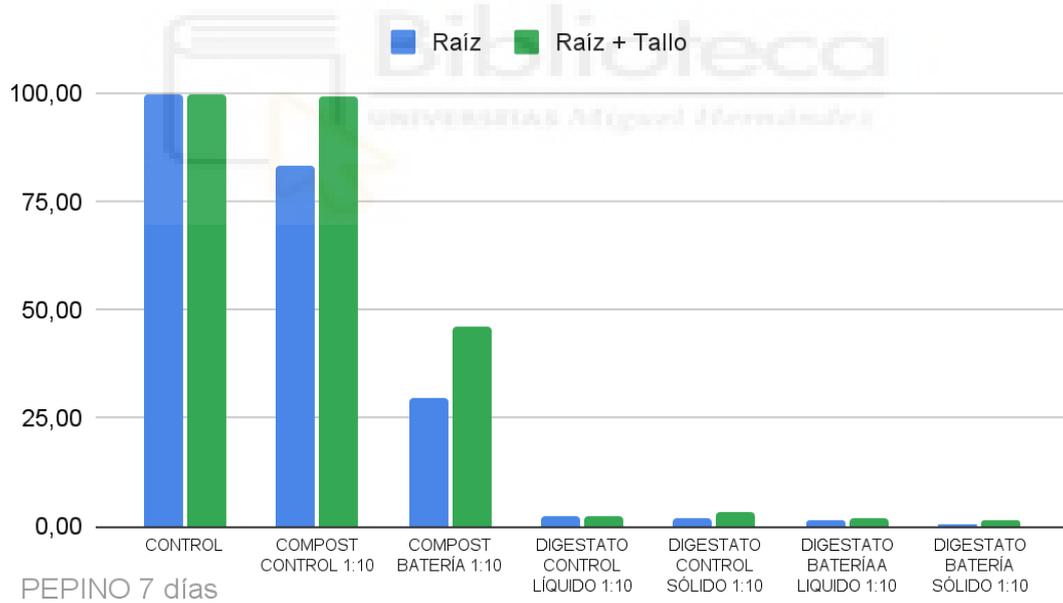


Figura 31: porcentaje del índice de germinación de las semillas de pepino (%), en 7 días

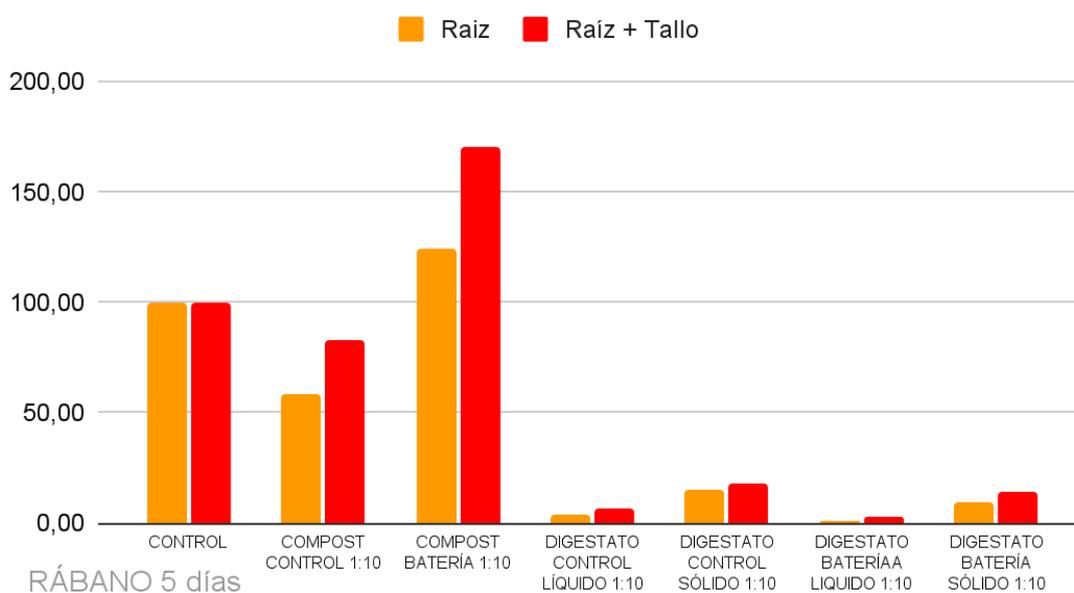


Figura 32: porcentaje del índice de germinación de las semillas de rábano (%), en 5 días

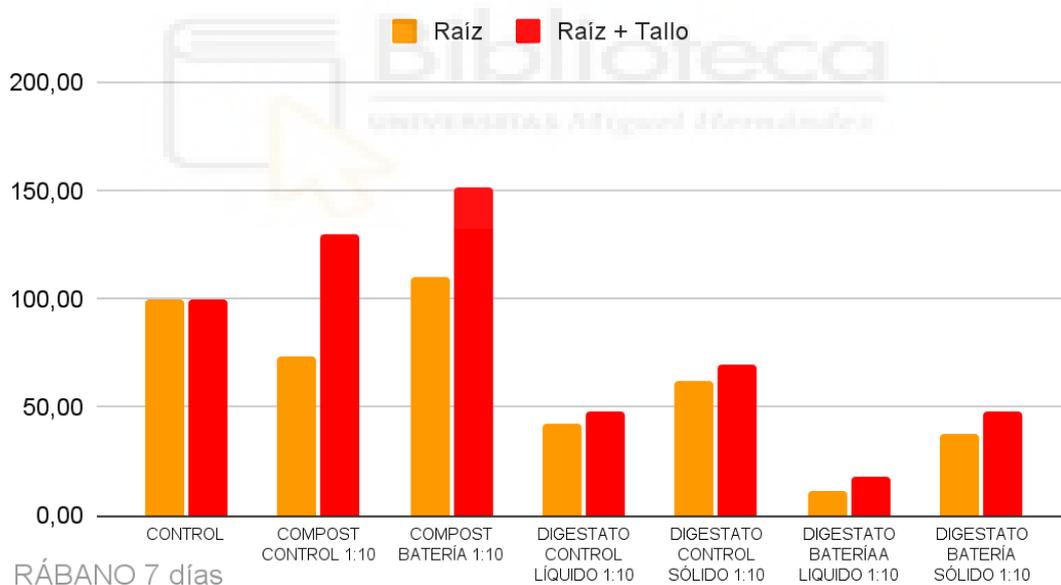


Figura 33: porcentaje del índice de germinación de las semillas de rábano (%), en 7 días

En la mayoría de las muestras se da un mayor porcentaje de índice de germinación usando la suma de raíz y tallo. Es decir que, el tallo crece igual o más que la raíz.

Por otro lado, en referencia a la toxicidad de las muestras, cogiendo el valor del 80% como referencia, tal y como se ha justificado anteriormente, únicamente aparecen como no tóxicas, la mayoría de muestras de control y de compost, tanto si contienen

batería como si no. En cambio, todas las muestras de digestato, dan un resultado tóxico.

Por lo que hace las muestras con baterías, en el caso del compost con las semillas de pepino, sí que se ve una disminución del índice de germinación, dando resultados cercanos al 50%, por tanto, considerándose con posibilidades tóxicas. Con el digestato prácticamente no se ven diferencias entre las muestras sin batería con las muestras con batería, presentando toxicidad en todos los casos.

Respecto a los resultados obtenidos en 5 días y en 7 días, sucede prácticamente como con la elongación, viendo diferencias entre los dos tipos de semillas. Es decir que, en el caso de las semillas de pepino, el índice de germinación ya no aumenta del quinto al séptimo día. En cambio, con las semillas de rábano si se ve un aumento al séptimo día.

En la tabla 9 se muestra la comparativa del índice de germinación expresada en porcentajes para ambas semillas.

Tabla 9: valores comparativos de porcentaje del índice de germinación (%). En amarillo se encuentran las muestras que superan el 80%.

COMPARATIVA RESULTADOS	RAÍZ		RAÍZ + TALLO	
	DIA 5	DIA 7	DIA 5	DIA 7
<b>PEPINO</b>	<b>GI</b>	<b>GI</b>	<b>GI</b>	<b>GI</b>
	%	%	%	%
CONTROL	100,00	100,00	100,00	100,00
COMPOST CONTROL 1:10	89,39	83,29	79,06	99,53
COMPOST BATERÍA 1:10	44,80	29,46	61,45	46,32
DIGESTATO CONTROL LÍQUIDO 1:10	1,78	2,14	2,21	2,56
DIGESTATO CONTROL SÓLIDO 1:10	3,04	2,00	4,66	3,16
DIGESTATO BATERÍA LÍQUIDO 1:10	0,66	1,22	1,03	2,05
DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO 1:10	1,39	0,60	1,91	1,22

RÁBANO	GI	GI	GI	GI
	%	%	%	%
CONTROL	100,00	100,00	100,00	100,00
COMPOST CONTROL 1:10	58,01	73,76	82,64	130,12
COMPOST BATERÍA 1:10	124,33	109,83	170,88	152,09
DIGESTATO CONTROL LÍQUIDO 1:10	3,85	42,84	6,68	47,57
DIGESTATO CONTROL SÓLIDO 1:10	14,99	61,88	18,01	69,48
DIGESTATO BATERÍA LÍQUIDO 1:10	1,34	11,07	2,55	18,18
DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO 1:10	9,43	37,25	14,09	48,29

### 5.3. TEST MICROTOX

Los datos resultantes del experimento del test de microtox son los expuestos en este apartado (figuras 34 a 37).

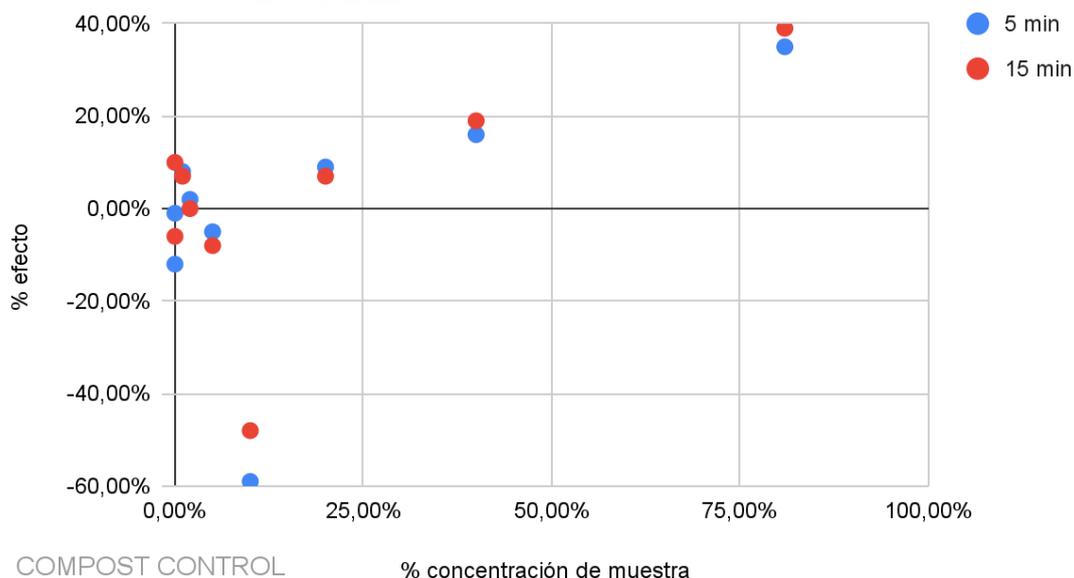


Figura 34: resultado del test Microtox (efecto del compost control sobre *Vibrio fischeri*).

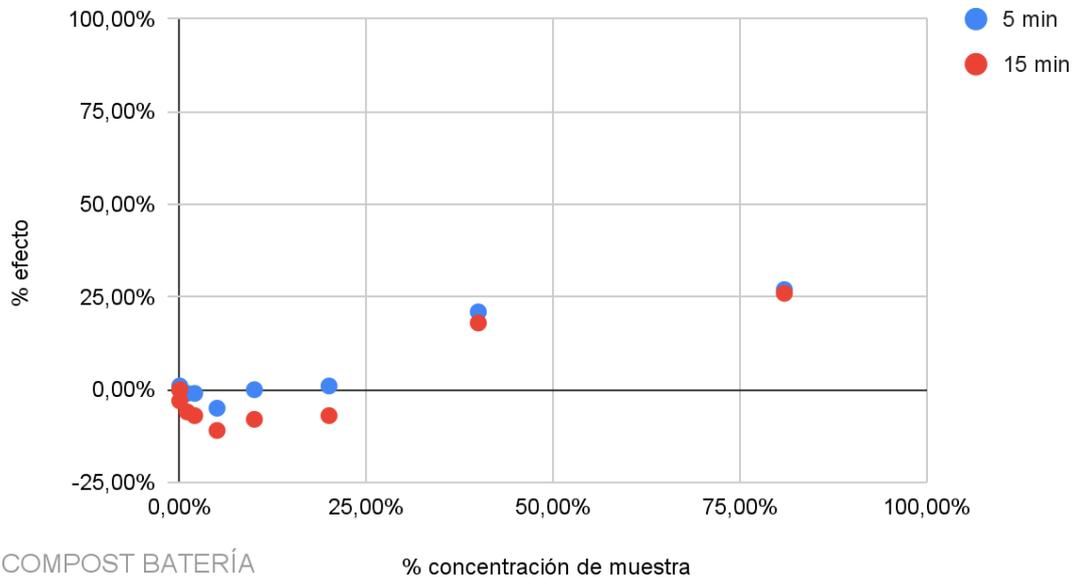


Figura 35: resultado del test Microtox (efecto del compost con batería sobre *Vibrio fischeri*).

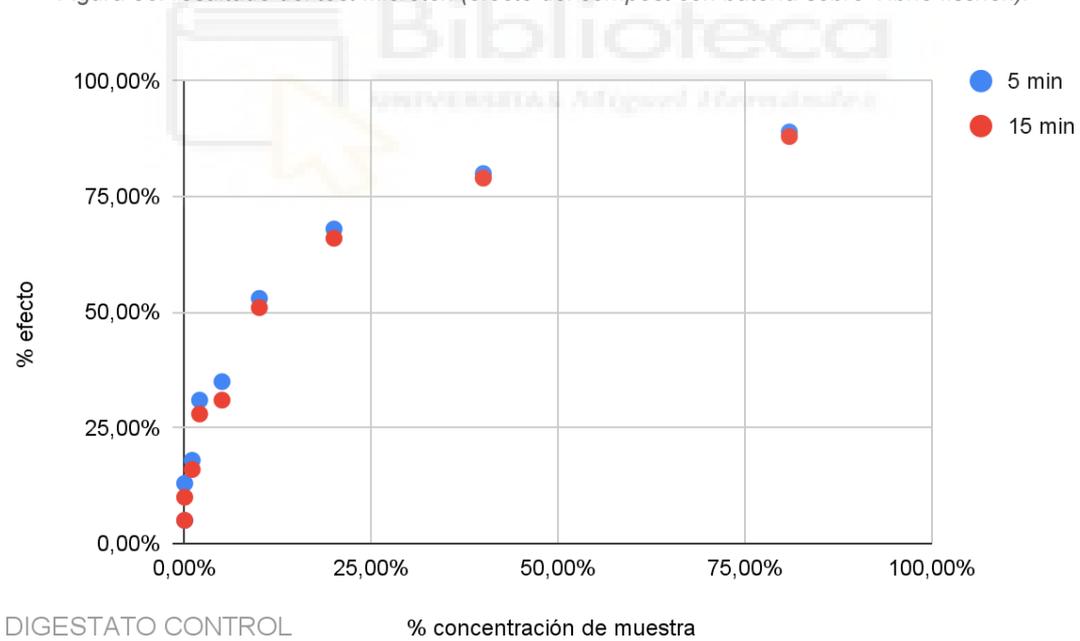


Figura 36: resultado del test Microtox (efecto del digestato control sobre *Vibrio fischeri*).

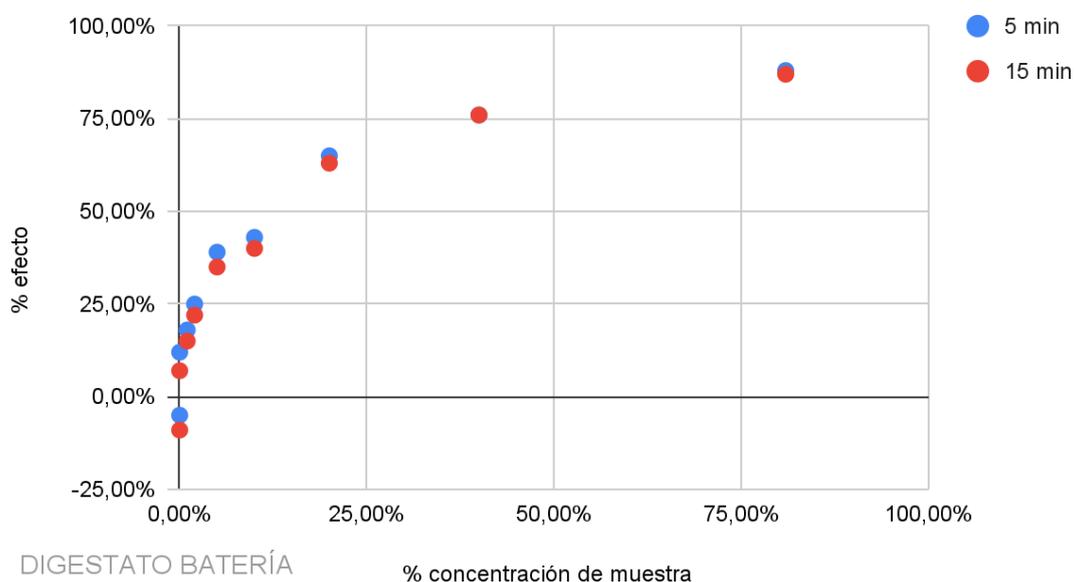


Figura 37: resultado del test Microtox (efecto del digestato con batería sobre *Vibrio fischeri*).

Como se observa en la Figura 34, el compost resulta no tóxico para los cultivos, ni con una concentración de muestra del 75%, ni del 81%, que es el máximo evaluado en el test de microtox. En cambio, el digestato sí presenta toxicidad, y la presenta ya a menos del 25% de concentración de la muestra (figura 36).

Por lo que hace a las baterías incorporadas al compost, no afecta a los resultados. El compost con incorporación de batería como materia prima en el proceso de compostaje sigue dando un resultado no tóxico para los cultivos (figura 35). En cambio, con el digestato, sigue apareciendo tóxico (figura 37).

## 6. DISCUSIÓN RESULTADOS

Según los resultados expuestos, se pueden discutir varios factores. En primer lugar, sobre la caracterización de las muestras de compost y de digestato, la visibilidad aun de pequeñas partículas del mismo color que la batería previo a su degradabilidad que restan después de sufrir una degradación controlada, nos informa que la batería no se degrada al 100%. Pendiente quedaría, analizar con un estudio estandarizado, su porcentaje de degradabilidad para poder valorar este resultado de forma adecuada. Aún así, se aprecia que las partículas no superan el centímetro, siendo casi homogéneas con el resto de la muestra, y que, según lo visto en el apartado de compostaje, en la normativa RD 506/2013, de 28 de junio, las partículas deben pasar por una malla de 25mm, cumpliendo por tanto con ese requisito.

Por lo que respecta a los valores analizados de pH, CE, m.o. y ms, en ningún caso el parámetro se ve alterado por la batería. Los resultados de las muestras con la batería no se diferencian prácticamente de las muestras control. Por otro lado, sí que existen diferencias entre los compost y los digestatos en referencia a la conductividad eléctrica y la materia seca. Los compost rodean una conductividad de 4,5-5,5 mS/cm, en cambio los digestatos de 17-18 mS/cm. Como veremos más adelante, esto nos afirmará la hipótesis de la relación entre la alta conductividad de los digestatos respecto la inhibición de la germinación de las semillas. Aunque, según las propiedades vistas en el apartado "1.2 compostaje" de este trabajo, concretamente en las tablas 2 y 3, para la germinación de semillas, una conductividad eléctrica adecuada es aquella menor de 2 mS/cm, dejando fuera las muestras tanto de los composts como los digestatos del presente trabajo.

Finalmente, la diferencia de materia seca, simplemente nos deduce la gran diferencia de cantidad de líquido que contiene un digestato respecto el compost, ya que el digestato contiene menos del 5% de materia seca, y el compost en cambio, de entre

55-65%. Eso nos afirma la diferencia entre el tratamiento de valorización a seguir con cada una de las muestras.

Centrándonos en el efecto que tienen las muestras respecto al crecimiento de las plantas y su posible efecto tóxico, analizando los resultados expuestos anteriormente, se deduce que las muestras de compost control, son muestras aptas para el crecimiento de las plantas, o como mínimo, para el crecimiento de las semillas. No contienen elementos tóxicos que inhiban su crecimiento.

Ahora bien, por lo que hace a las baterías biodegradables, una vez degradadas con digestión aerobia, aparece un posible carácter tóxico en algún tipo de semillas. En el caso de las semillas de pepino, las vemos afectadas con esa muestra, ya que no alcanza el 80% de índice de germinación (quedando a 45% de media). Aun así, no se ve afectada con las semillas de rábano, ya que estas, superan el 80% de índice de germinación. Por tanto, aunque en algún caso de las muestras de compost aparece algún valor más cercano a la toxicidad, siguen con un alto porcentaje de germinación de semillas, y, consecuentemente, siguen siendo composts aptos para el desarrollo inicial de una planta, aun teniendo una batería biodegradable como materia prima.

Por otra parte, en el caso de las muestras de digestato, no dan tan buenos resultados como el compost debido a que, podría requerir para este uso agrícola, un tratamiento posterior de compostaje, como se aplica ya en varios sectores (Suárez, 2012). Incluso en las muestras de digestato con batería, mantiene su toxicidad frente a las bacterias luminiscentes. Por ello, se confirma igualmente la necesidad de un tratamiento a posteriori, como sería un proceso de compostaje.

Esa inhibición en el caso del digestato, también podría estar explicado por la trayectoria del proceso de germinación. Morfológicamente se puede dividir en tres etapas: inhibición, aparición de la radícula y elongación de la radícula (Luo, et al.; 2018). En la primera fase, principalmente se consume el agua, donde podría verse afectada por la posible salinidad del digestato, anteriormente confirmada su alta salinidad. En la segunda fase, podría aparecer una inhibición debido al bajo peso

molecular de los ácidos orgánicos que contiene el compost. Por último, en la tercera etapa el principal inhibidor podría ser el amonio ( $NH_4^+$ ). Estas fases se ven gráficamente en la figura 38, que se presenta a continuación.

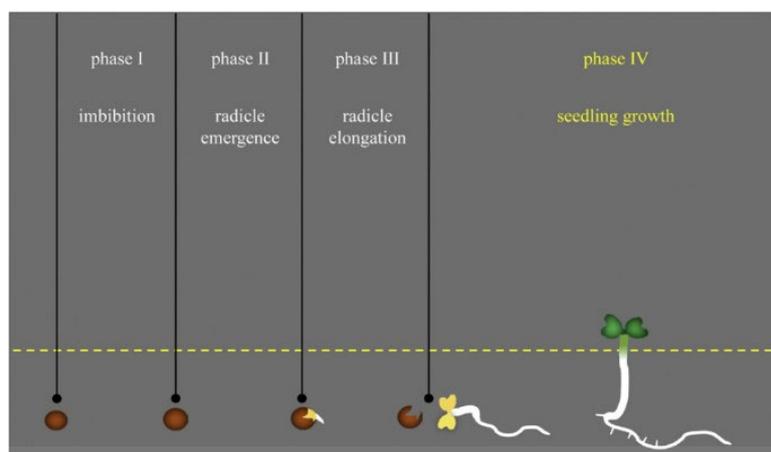


Figura 38: etapas del proceso de germinación de las semillas (Luo, et al.; 2018 / Waste Management 71, 2018).

Por tanto, aunque estas diferentes etapas del test de germinación, se necesitan profundizar y verificar más cada posible causa de inhibición de la semilla (Luo, et al.; 2018), se puede deducir que en este caso, la muestra de digestato se inhiben prácticamente todas en la primera fase, debido a la problemática comentada de la alta salinidad de la muestra.

Además, otra problemática surgida, se relaciona con la concentración de las muestras escogidas. En los resultados, pudimos comprobar que el digestato sin una dilución previa, debido a su elevada concentración, no funciona frente a las pruebas realizadas de toxicidad del compost, y por ella se descartaron sus resultados. Por tanto, es muy importante realizar esa dilución previa para que no se presenten inhibiciones de crecimiento de las semillas o las plantas.

Respecto a los resultados de las mediciones en el quinto y séptimo día, se puede apreciar que, con las semillas de rábano, el índice de germinación aumenta en el séptimo día respecto al quinto. En cambio, esta diferencia del índice entre el quinto y el

séptimo día, no se aprecia prácticamente con las semillas de pepino. Es decir que, con las semillas de pepino, el tamaño de las semillas germinadas al quinto día ya no cambió. En cambio, con las semillas de rábano, sí que aumentaron las mediciones de la elongación del tallo y la raíz. Es decir que, el compost con batería estimula el crecimiento de las semillas de rábano.

Otra comparación con el efecto de las mediciones al quinto o al séptimo día, en el caso de los digestatos, se aprecia más semillas germinadas a los siete días. Es decir que, en el caso de las muestras de compost, las semillas no germinadas en el quinto día ya no lo hicieron en el séptimo tampoco. En cambio con el digestato sí aumentaron los resultados de semillas germinadas al séptimo día. Por tanto, demuestra que con el digestato se produce una ralentización a la hora de germinar las semillas, producida en la segunda fase de la figura 38. Consecuentemente, según lo explicado en las fases de germinación, se deduce que esa ralentización puede venir producida por un bajo peso molecular de los ácidos orgánicos de la muestra.

Por último, con los resultados expuestos, las semillas que dan mejores resultados en la zona mediterránea que nos encontramos y entre los dos tipos utilizados, son las de rábano (*Raphanus raphanistrum*). Esto podría ser debido a que el pepino es un cultivo más exigente de nutrientes y de humedad (Romero, et al.; 2009). Además, la planta del rábano es de crecimiento más rápido pudiendo afectar los resultados positivamente en este caso. Aun así, hay que aclarar que, al no estar claramente establecido en el procedimiento qué semillas se recomienda usar, es fácil obtener resultados variados y no poder comparar con otras investigaciones. Por este motivo es importante utilizar varios tipos de semillas en este tipo de ensayos.

## 7. CONCLUSIONES

De la investigación realizada se deducen las afirmaciones que se presentan a continuación.

Por lo que hace a la actualidad de los materiales biodegradables, se puede afirmar que aún queda mucho por investigar, ya que faltan muchos sectores industriales por introducir. Y lo más importante, no sólo por descubrir, sino por instaurar como elemento normalizado y usado mayoritariamente por la población. Y no sólo su uso como producto, sino, su gestión una vez usado. Es decir que, la gran problemática es la falta de protocolos que lleguen a la población de cómo gestionar esos productos una vez terminada su vida útil.

Por lo que hace a la parte experimental del proyecto, aunque aún falten detalles para determinar en la normativa de los procedimientos de los tests usados, como por ejemplo la determinación del tipo de semilla, tanto el test de germinación como el microtox, reflejan resultados aptos en cuanto a determinación de la posible existencia de toxicidad.

Las semillas de pepino (*Cucumis Sativus L.*) al ser más sensibles no son tan recomendables para los tests usados en comparación con las semillas de rábano (*Raphanus raphanistrum*). Por ello, en este tipo de ensayos, es muy importante usar más de un tipo de semilla.

En cuanto a las muestras analizadas, se concluye que los composts, incluso compost de baterías biodegradables, son materiales aptos para desarrollar el crecimiento de plántulas. En cambio los digestatos no son aptos para este desarrollo, necesitando algún tipo de tratamiento adicional.

Aun así, sería ideal continuar el proyecto con la evaluación y seguimiento de estos composts y digestatos en diferentes etapas en el ciclo del cultivo y a diferentes escalas.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Agencia de Residuos de Cataluña (ARC). 2016. *Guia pràctica per al disseny i l'explotació de plantes de compostatge*.

Altamirano Ramirez, B. A., Alvarez Felipa, S. M., Tito Acuña, G. C., Rengifo Ochoa, C. M., Wong Lizano, L. P. Y. F.; 2019. *Fabricación y comercialización de cepillos dentales de bambú biodegradables y compostables con cerdas de binchotan libres de BPA*.

Azur environmental, 1994. *Microtox M500 Manual (A Toxicity Testing Handbook)*.

Baker, C. S.; VanderGheynst, J. S.; Walker, L. P.; 1999. *Equilibrium moisture isotherms for synthetic food waste and biosolids composts*. Compost science & utilization, vol. 7, nº 1, p. 6-13.

Ballif, J. L., Sur Marne, A.C., Moncomble, D., Descotes, A.; 1991. *Effects of municipal compost and pounded barks mulching on pluvial erosion of a viticultural soil in the Champagne area*. Annales ANPP (France), nº 3.

Barrena, R., Casals, E., Colón, J., Font, X., Sánchez, A., Puentes, V.; 2009. *Evaluation of the ecotoxicity of model nanoparticles*. Chemosphere, vol. 75, no 7, p. 850-857.

BOE. Reglamento UE 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, *por el que se establecen disposiciones relativas a la comercialización de los productos fertilizantes UE*.

BOE. Real Decreto 506/2013, de 28 de junio de 2013, *sobre productos fertilizantes*.

BOE. Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre de 2022, *por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios*.

Bravo, C.B., Izurieta, P.M., Gordillo, C.P.; 2021. *Construcción de la carrocería del vehículo de competición Fórmula Student a partir de materiales compuestos con fibra natural*. Revista Ingeniería, vol. 5, no 13, p. 108-122.

Bulich, A. A., Tung, K.K., Scheibner, G.; 1990. *The luminescent bacteria toxicity test: its potential as an in vitro alternative*. Journal of Bioluminescence and Chemiluminescence, vol. 5, no 2, p. 71-77.

Castellón, C.A., López, L.N.T, Benítez, L.P.T.; 2016. *Evaluación de la degradación ambiental de bolsas plásticas biodegradables*. Informador técnico, vol. 80, no 1, p. 24-31.

Cevallos, R.A.; 2022. *Trazabilidad de materiales biodegradables con fibra de yute mediante infusión en aplicaciones de construcción y mantenimiento*. Escuela superior politécnica de Chimborazo.

Chacón, V.; 2017. *Estudio técnico-económico del diseño y fabricación de una carcasa de filtro de agua para jarras con materiales poliméricos biodegradables*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Cubilla, K., González, Y., Montezuma, G., Samudino, M., Gómez, E.; 2019. *Fibra de coco y cáscara de plátano como alternativa para la elaboración de material biodegradable*. Revista de iniciación científica, vol. 5, no 2, p. 15-20.

Cuesta, N.; 2016. *Materiales anódicos alternativos para el desarrollo de baterías de ión-litio sostenibles*.

Dávila, J.L., Galeas, S., Guerrero, V.H., Pontón, P., Rosas, N.M., Sotomayor, V., Valdivieso, C.; 2011. *Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales*.

Dey, S., Veerendra, G.T.N., Babu, P.A., Manoj, A.P., Nagarjuna, K.; 2024. *Degradation of Plastics Waste and Its Effects on Biological Ecosystems: A Scientific Analysis and Comprehensive Review*. Biomedical Materials & Devices, p. 1-43.

Dolci, G., Venturelli, V., Catenacci, A., Ciapponi, R., Malpei, F., Turri, S.E.R., Grosso, M.; 2022. *Evaluation of the anaerobic degradation of food waste collection bags made of paper or bioplastic*. Journal of environmental management, vol. 305, p. 114331.

Fakhrul, T., Islam, M. A.; 2013. *Degradation behavior of natural fiber reinforced polymer matrix composites*. Procedia Engineering, vol. 56, p. 795-800.

Favoino, E., Hogg, D.; 2008. *The potential role of compost in reducing greenhouse gases*. Waste Management & Research, 26(1): 61-69.

Feipó, O.; 2002. *Utilización de materia orgánica residual urbana en la recuperación de suelos degradados*. Curso Agricultura y Medio Ambiente. Fundación Universitaria de Verano de Castilla y León. Segovia.

Ferrández, C.E.; 2013. *Valorización agroindustrial de residuos lignocelulósicos (Arundo donax L, Washingtonia robusta h. Wendl)*. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández de Elche.

Ferrández-García, M.T., Ferrández-García, A., García-Ortuño, T., Ferrández-García, C.E., Ferrández-Villena, M.; 2020. *Assessment of the physical, mechanical and acoustic properties of Arundo donax L. biomass in low pressure and temperature particleboards*. Polymers, vol. 12, no 6, p. 1361.

Flores, D.S.; 2009. *Elaboración de materiales biodegradables*. Tesis Doctoral. Centro de Investigación en Química Aplicada.

Flores, J.A.; 2005. *Fabricación y Análisis de tableros de aglomerado de caña común (Arundo donax L.)*. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández de Elche.

Flotats, X.; 2008. *Producció de biogàs per codigestió anaeròbia*. Instituto Catalán de Energía - ICAEN, Barcelona. Cuaderno práctico 1.

Gaitán, E.E., Roperó Medina, J.; 2021. *Planteamiento para el desarrollo de platos biodegradables a base de cascarilla de cacao*. Tesis de Licenciatura. Universidad EAN, Bogotá.

García, M. L.; 2004. *Bioensayo de toxicidad por Microtox® en sedimentos mineros estabilizados con CaCO<sub>3</sub>*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Murcia.

Giró, F.; 2007. *Compostarc*.

Guidi, G., Pera, A., Giovannetti, M., Poggio, G., Bertoldi, M.; 1988. *Variations of soil structure and microbial population in a compost amended soil*. Plant and Soil, vol. 106, p. 113-119.

Hernandez-Gomez, R.; Chamorro-Camazón, C.; 2016. *Current situation and prospects for biogas and biomethane in Spain and Europe*. DYNA Energía y Sostenibilidad, 5(1). [11 p.].

Herrick, J. E.; Wander, M.; 1997. *Relationships between SOC and soil quality in cropped and rangeland soils: the importance of distribution, composition, and soil biological activity*. Soil processes and the carbon cycle, p. 405-425.

Instituto Nacional de Estadística, INE, 2021. *Depósito de residuos sólidos en vertederos no gestionados*. Sistema Español de Inventario de Emisiones: Metodologías de estimación de emisiones.

Kapanen, A., Schettini, E., Vox, G., Itävaara, M.; 2008. *Performance and environmental impact of biodegradable films in agriculture: a field study on protected cultivation*. Journal of Polymers and the Environment, vol. 16, p. 109-122.

Kern, Dr. M.; 2000. *Future of agriculture*. Global dialogue EXPO, vol. 188, no 5, p. 1-65.

Lara, A., Patricia, P.; 2018. *Biodegradable batteries as sustainable power sources for portable devices*.

López, M., Martínez, F.X.; 2013. *Metodologies emprades per a la caracterització de compost*. Departament d'Enginyeria Agroalimentària i Biotecnologia, Escola Superior d'Agricultura de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.

Lu, J., Qiu, Y., Muhmood, A., Zhang, L., Wang, P., Ren, L.; 2023. *Appraising co-composting efficiency of biodegradable plastic bags and food wastes: Assessment*

*microplastics morphology, greenhouse gas emissions, and changes in microbial community*. Science of The Total Environment, vol. 875, p. 162356.

Luo, Y., Liang, J., Zeng, G., Chen, M., Mo, D., Li, G., Zhang, D.; 2018. *Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects*. Waste Management, vol. 71, p. 109-114.

Martínez, P.F., Roca, D.; 2011. *Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo*.

Mayacela, C.M., Rivera, M.F., Tavolaro, A., Molinari, A., Fallico, C.; 2017. *Use of vegetable fibers for PRB to remove heavy metals from contaminated aquifers—Comparisons among cabuya fibers, broom fibers and ZVI*. International Journal of Environmental Research and Public Health, vol. 14, no 7, p. 684.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2008. *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero*.

Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2020. *Memoria anual de generación y gestión de residuos, residuos de competencia municipal*. Secretaría de Estado de Medio Ambiente. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental.

Mittal, N., Ojanguren, A., Kundu, D., Lizundia, E., Niederberger, M.; 2023. *Bottom-Up Design of a Green and Transient Zinc-Ion Battery with Ultralong Lifespan*. Small, vol. 19, no 7, p. 2206249.

Nagaraja, B.; Rekha, B.; 2013. *A comparative study on tensile behaviour of plant and animal fiber reinforced composites*. International Journal of Innovation and Applied Studies, Vol. 2.

Navarro-Segarra, M., Tortosa, C., Ruiz-Díez, C., Desmaële, D., Gea, T., Barrena, R., ...Esquivel, J.P.; 2022. *A plant-like battery: a biodegradable power source ecodesigned for precision agriculture*. Energy & environmental science, vol. 15, no 7, p. 2900-2915.

Onorati, F.; Mecozzi, M.; 2004. *Effects of two diluents in the Microtox toxicity bioassay with marine sediments*. Chemosphere, vol. 54, no 5, p. 679-687.

Organic and Biological Properties, 05.05 Biological Assays, 2001. *Test Methods for the Examination of Composting and Compost*.

Pardos, B.; 2015. *Materiales de construcción biodegradables*. Universidad Miguel Hernández. Sapiens.

Pérez, A.; Consuelo, K.; 2022. *Recuperación de residuos líquidos industriales mediante *Arthrospira Sp.* y *Chlorella Sp.*, a escala de laboratorio, para la obtención de agua de riego*. Región Arica y Parinacota.

Pesetti, L., Abaca, C.R, Zerbino, J.O., Sustersic, M.G., Falivene, C.; 2013. *Inhibición de la electrooxidación de ácido ascórbico sobre oro mediante polipirrol sobreoxidado*. Avances en Ciencias e Ingeniería, vol. 4, no 2, p. 31-36.

Plana, R.; 2009. *Una introducción general al compostaje*. Sociedad Española de Agricultura Ecológica, Villaframil-Ribadeo, Spain. Compostaje: la salud de la Tierra. Utilización en agricultura ecológica, p-7-27.

Porras, S.A.; 2011. *Producción de compost a partir de residuos sólidos de una planta de celulosa*. Universidad de Chile.

Puyuelo, B., Arizmendiarieta, J.S., Irigoyen, I., Plana, R.; 2019. *Quality assessment of composts officially registered as organic fertilisers in Spain*. Spanish Journal of Agricultural Research, vol. 17, no 1, p. e1101-e1101.

Quishpe, F.J.; 2021. *Análisis y optimización en la producción de envases de cartón, empleando el value stream mapping*. Revista Universidad y Sociedad, vol. 13, no 3, p. 536-542.

Rabb, Ó.; 2017. *Estudio del impacto del uso de digestato anaerobio y microorganismos eficientes en el proceso de compostaje de residuos de feria*. Santiago: Universidad Andrés Bello.

Ramón, A.G.; 2017. *Influencia de la fibra de yute en el diseño de hormigones para resistencia a la compresión de 21 a 35 MPa con agregados de la cantera de Pifo*. Tesis de Licenciatura.

Romero, E., Rodríguez, A., Rázuri, L.R., Suniaga, J., Montilla, E.; 2009. *Estimación de las necesidades hídricas del cultivo de pepino (Cucumis Sativus L.) durante las diferentes etapas fenológicas, mediante la tina de evaporación*. Agricultura andina, vol. 16, p. 56-69.

Rusco, E., Jones, R.J, Bidoglio, G.; 2001. *Organic matter in the soils of Europe: Present status and future trends*. Brussels, Belgium: Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, European Commission.

Serrano, H.A.; Legarda, Y.V.; 2017. *Análisis de la implementación de materiales biodegradables en la industria de la construcción en Girardot, Ricaurte y Flandes-Cundinamarca*. Tesis Doctoral.

Serrano-Ruiz, H., Martin-Closas, L., Pelacho, A.M.; 2021. *Biodegradable plastic mulches: Impact on the agricultural biotic environment*. Science of The Total Environment, vol. 750, p. 141228.

Skrzypczak, D., Mikula, K., Kosińska, N., Widera, B., Warchoń, J., Moustakas, K., ..., Witek-Krowiak, A.; 2020. *Biodegradable hydrogel materials for water storage in agriculture-review of recent research*. Desalination and Water Treatment, vol. 194, p. 324-332.

Suárez, J.I.; 2012. *Compostaje del coproducto (digestato) que se genera en la digestión metanogénica del alperujo (residuo de olivo)*.

Swandi, I.W.; 2021. *The Benefits of Visual Cartoons in an Effort to Disseminate Plastic Waste Reduction in Bali*. Multicultural Education, vol. 7, no 12.

Tittarelli, F.; Canali, S.; 2002. *Maintaining soil organic fertility for a sustainable development of agriculture*. Proceedings of Workshop on Biological Treatment of Biodegradable Waste–Technical Aspects.

Trillas, M.I., Casanova, E., Sant, D., Tello, J.C., Ordovás, J., Borrero, C., Avilés, M.; 2004. *Composts and enriched composts as alternatives to chemicals in plant disease control*. Proceeding of International Conference Soil and Compost Eco-Biology, p. 17-6.

UNE-EN 13432. *Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje*. Madrid: AENOR, 2007.

UNE-EN 14995. *Plásticos, evaluación de la compostabilidad y programa de ensayo y especificaciones*. Madrid: AENOR, 2007.

United Nations Environment Programme (UNEP). *Annual Report, 2021*.

Velásquez, S.M., Pelaéz, G.J., Giraldo, D.H.; 2016. *Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos*.

Wambua, P., Ivens, J., Verpoest, I.; 2003. *Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?* Composites science and technology, vol. 63, no 9, p. 1259-1264.

Wang, T., Hosseinzadeh, M., Cuccagna, A., Alakenova, R., Casademunt, P., Rovatti, A. R., ... Porte, C.; 2023. *Comparative toxicity of conventional versus compostable plastic consumer products: An in-vitro assessment*. Journal of hazardous materials, 459, 132123.

Word Bank Open Data, 2018. *Base de datos vertederos*.

Xu, M., Sun, H., Chen, E., Yang, M., Wu, C., Sun, X., Wang, Q.; 2023. *From waste to wealth: Innovations in organic solid waste composting*. Environmental Research, 115977.

Young, B. J., Rizzo, P. F., Riera, N. I., Della Torre, V., López, V. A., Molina, C. D., ... Sánchez, A.; 2016. *Development of phytotoxicity indexes and their correlation with ecotoxicological, stability and physicochemical parameters during passive composting of poultry manure*. Waste management, 54, 101-109.

Zapata, A., Pujol, O., Coda, F.; 2012. *Biodegradable polymers: An alternative of future to the sustainability of the environment*. Técnica Ind, vol. 297, p. 76-80.

Zucconi, F.; 1981. *Evaluating toxicity of immature compost*. Biocycle, p. 54-57.



## 9. ANEXOS

### 9.1. TABLAS MEDICIONES

En el anexo que se presenta a continuación, se adjuntan las tablas con las mediciones realizadas durante la experimentación del proyecto.

#### 9.1.1. CARACTERIZACIÓN COMPOST Y DIGESTATO

Las mediciones tomadas en la caracterización de las muestras de compost y digestado usadas en los test de germinación y de microtox, se presentan de la tabla 10 a 13.

Tabla 10: caracterización de la materia seca de las muestras compost control y compost con batería después del proceso de degradación.

Materia seca 105°C (compost degradación)							
Muestra	Crisol (g)	Crisol + Mtra (g)	Mtra sola (g)	Peso 105°C	Mtra-crisol (g)	Materia seca (%)	Promedio
Ctrl (réplica 1)	32,28	38,30	6,02	35,88	3,60	59,74	<b>59,74</b>
Ctrl (réplica 2)	25,90	31,84	5,94	29,42	3,52	59,21	
Ctrl (réplica 3)	30,76	36,62	5,87	34,29	3,54	60,26	
Bateria (réplica 1)	32,55	38,51	5,97	36,27	3,72	62,36	<b>62,93</b>
Bateria (réplica 2)	25,03	31,05	6,02	28,78	3,75	62,34	
Bateria (réplica 3)	29,11	35,14	6,03	32,97	3,87	64,10	

Tabla 11: caracterización de la materia orgánica de las muestras compost control y compost con batería después del proceso de degradación

Materia orgánica 550°C (compost degradación)					
Muestra	Peso inicial (g)	Peso 550°C	Mtra -crisol (g)	M.O (%)	Promedio
Ctrl (réplica 1)	3,60	34,37	2,09	41,95	<b>41,64</b>
Ctrl (réplica 2)	3,52	27,94	2,05	41,85	
Ctrl (réplica 3)	3,54	32,84	2,08	41,13	
Bateria (réplica 1)	3,72	34,70	2,16	41,96	<b>41,08</b>
Bateria (réplica 2)	3,75	27,19	2,15	42,56	
Bateria (réplica 3)	3,87	31,48	2,37	38,71	

Tabla 12: caracterización de la materia seca de las muestras digestato control y digestato con batería después del proceso de degradación.

Materia seca 105°C (digestato degradación 37°C)							
Muestra	Crisol(g)	Crisol + Mtra (g)	Mtra sola (g)	Peso 105°C	Mtra-crisol (g)	Materia seca (%)	Promedio
Ctrl (réplica 1)	61,28	89,70	28,42	62,07	0,78	2,76	<b>2,73</b>
Ctrl (réplica 2)	58,96	88,15	29,19	59,74	0,78	2,68	
Ctrl (réplica 3)	62,44	91,62	29,18	63,25	0,81	2,77	
Bateria (réplica 1)	42,84	71,90	29,06	43,59	0,75	2,60	<b>2,65</b>
Bateria (réplica 2)	64,21	93,14	28,94	64,96	0,76	2,61	
Bateria (réplica 3)	60,05	88,51	28,46	60,83	0,78	2,74	

Tabla 13: caracterización de la materia orgánica de las muestras digestato control y digestato con batería después del proceso de degradación.

Materia orgánica 550°C (digestato degradación 37°C)					
Muestra	Peso inicial (g)	Peso 550°C	Mtra -crisol (g)	M.O (%)	Promedio
Ctrl (réplica 1)	0,78	61,66	0,37	52,51	<b>51,69</b>
Ctrl (réplica 2)	0,78	59,34	0,38	50,99	
Ctrl (réplica 3)	0,81	62,83	0,39	51,56	
Bateria (réplica 1)	0,75	43,22	0,38	50,15	<b>49,93</b>
Bateria (réplica 2)	0,76	64,59	0,38	49,63	
Bateria (réplica 3)	0,78	60,44	0,39	50,02	

## 9.1.2. TEST DE GERMINACIÓN

Las mediciones tomadas en el test de germinación se presentan de la tabla 14 a la 21.

Tabla 14: mediciones de semillas germinadas en 5 días, de pepino y de rábano.

TEST DE GERMINACIÓN	día 5				
fecha = 23/11/2023					
<b>PEPINO</b>	<b>Nº semillas germinadas</b>				
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	mediana	%
CONTROL	10	10	10	10,0	100,0
COMPOST CONTROL 1:10	10	10	10	10,0	100,0
COMPOST BATERÍA 1:10	6	6	8	6,7	66,7
DIGESTATO CONTROL LÍQUIDO 1:10	2	0	1	1,0	10,0
DIGESTATO CONTROL SÓLIDO 1:10	3	1	2	2,0	20,0
DIGESTATO BATERÍA LIQUIDO 1:10	0	2	0	0,7	6,7
DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO 1:10	2	1	1	1,3	13,3
<b>RÁBANO</b>	<b>Nº semillas germinadas</b>				
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	mediana	%
CONTROL	10	10	10	10,0	100,0
COMPOST CONTROL 1:10	10	10	10	10,0	100,0
COMPOST BATERÍA 1:10	10	10	10	10,0	100,0
DIGESTATO CONTROL LÍQUIDO 1:10	8	8	4	6,7	66,7
DIGESTATO CONTROL SÓLIDO 1:10	10	6	9	8,3	83,3
DIGESTATO BATERÍA LIQUIDO 1:10	9	0	2	3,7	36,7
DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO 1:10	9	8	8	8,3	83,3

Tabla 15: mediciones de semillas germinadas en 7 días, de pepino y de rábano.

TEST DE GERMINACIÓN	día 7				
fecha = 23/11/2023					
<b>PEPINO</b>	<b>Nº semillas germinadas</b>				
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	mediana	%
CONTROL	10	10	10	10,0	100,0
COMPOST CONTROL 1:10	10	10	10	10,0	100,0
COMPOST BATERÍA 1:10	6	6	8	6,7	66,7
DIGESTATO CONTROL LÍQUIDO 1:10	4	0	1	1,7	16,7
DIGESTATO CONTROL SÓLIDO 1:10	3	1	2	2,0	20,0
DIGESTATO BATERÍA LIQUIDO 1:10	2	3	0	1,7	16,7
DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO 1:10	2	1	1	1,3	13,3
<b>RÁBANO</b>	<b>Nº semillas germinadas</b>				
	Placa 1	Placa 2	Placa 3	mediana	%
CONTROL	10	10	10	10,0	100,0
COMPOST CONTROL 1:10	10	10	10	10,0	100,0
COMPOST BATERÍA 1:10	10	10	10	10,0	100,0
DIGESTATO CONTROL LÍQUIDO 1:10	9	9	10	9,3	93,3
DIGESTATO CONTROL SÓLIDO 1:10	10	8	10	9,3	93,3
DIGESTATO BATERÍA LIQUIDO 1:10	9	6	8	7,7	76,7
DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO 1:10	9	8	9	8,7	86,7

Tabla 16: Mediciones del crecimiento de las raíces y los tallos de las semillas germinadas de pepino en 5 días.

		día 5																							
PEPINO		MEDIDAS (mm)																							
		Semilla 1		Semilla 2		Semilla 3		Semilla 4		Semilla 5		Semilla 6		Semilla 7		Semilla 8		Semilla 9		Semilla 10		mediana		% de vigor	
		Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz
CONTROL																									
	placa 1	16	40	15	46	13	14	15	30	12	16	15	32	14	35	14	30	16	45	16	34	13,63	31,10	100,00	100,00
	placa 2	0	13	0	8	0	1	35	42	8	26	8	24	26	40	4	24	56	90	11	21				
	placa 3	4	96	4	0	7	0	40	72	4	12	10	22	10	35	11	30	23	48	2	7				
COMPOST																									
	placa 1	8	32	8	46	10	30	7	35	13	40	8	39	9	35	7	37	7	32	9	2	7,57	27,80	55,50	89,39
	placa 2	5	26	6	18	8	32	5	32	6	25	0	1	13	31	4	25	4	22	14	36				
	placa 3	2	12	6	27	10	30	6	22	5	9	7	33	11	22	8	35	10	34	11	34				
COMPOST BATERÍA 1:10																									
	placa 1	32	45	25	40	15	0	10	0	12	28	41	42	0	0	0	0	0	0	0	0	20,33	20,90	149,14	67,20
	placa 2	45	45	60	44	92	84	6	0	6	0	26	42	0	0	0	0	0	0	0	0				
	placa 3	56	76	54	77	45	43	60	56	21	5	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0				
DIGESTATO CONTROL LIQUIDO																									
	placa 1	20	50	80	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,33	5,53	31,78	17,79
	placa 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	placa 3	30	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
DIGESTATO CONTROL SÓLIDO																									
	placa 1	22	31	1	0	2	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,70	4,73	41,81	15,22
	placa 2	8	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	placa 3	70	47	68	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
DIGESTATO BATERÍA LÍQUIDO																									
	placa 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,83	3,07	28,12	9,86
	placa 2	50	32	65	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	placa 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO																									
	placa 1	15	30	5	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,17	3,23	23,23	10,40
	placa 2	30	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	placa 3	45	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				

Tabla 17: Mediciones del crecimiento de las raíces y los tallos de las semillas germinadas de pepino en 7 días.

día 7																								
PEPINO	MEDIDAS (mm)																		mediana		% de vigor			
	Semilla 1		Semilla 2		Semilla 3		Semilla 4		Semilla 5		Semilla 6		Semilla 7		Semilla 8		Semilla 9		Semilla 10		Tajo	Raíz	Tajo	Raíz
	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz
<b>CONTROL</b>																								
placa 1	13	79	21	27	27	15	23	63	23	66	16	58	20	84	22	40	25	44	16	83	20,93	43,30	100,00	100,00
placa 2	22	58	19	40	65	93	28	59	40	55	32	64	11	30	5	23	8	21	5	12				
placa 3	56	74	25	29	43	95	24	19	7	9	5	0	3	5	8	21	9	12	7	21				
<b>COMPOST</b>																								
placa 1	21	40	31	50	23	22	25	33	15	32	32	35	23	62	31	43	27	39	3	26	27,87	36,07	133,12	83,29
placa 2	11	4	45	25	29	27	39	36	17	20	64	37	33	25	34	30	38	36	33	69				
placa 3	10	25	32	62	28	30	27	25	24	52	28	29	32	25	16	23	42	65	23	55				
<b>COMPOST BATERÍA 1:10</b>																								
placa 1	18	34	12	36	25	46	44	23	25	34	63	72	0	0	0	0	0	0	0	0	25,50	19,13	121,82	44,19
placa 2	72	29	57	8	102	61	35	30	5	10	3	16	0	0	0	0	0	0	0	0				
placa 3	85	44	44	15	67	25	58	67	31	9	8	0	5	0	6	15	0	0	0	0				
<b>DIGESTATO CONTROL LIQUIDO</b>																								
placa 1	37	45	90	91	1	11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,30	5,57	20,54	12,86
placa 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
placa 3	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>DIGESTATO CONTROL SÓLIDO</b>																								
placa 1	10	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,80	4,33	27,71	10,01
placa 2	10	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
placa 3	70	77	80	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>DIGESTATO BATERÍA LIQUIDO</b>																								
placa 1	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,73	3,17	22,61	7,31
placa 2	80	65	3	0	55	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
placa 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
<b>DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO</b>																								
placa 1	10	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,93	1,93	18,79	4,46
placa 2	45	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
placa 3	55	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				

Tabla 18: Mediciones del crecimiento de las raíces y los tallos de las semillas germinadas de rábano en 5 días.

RÁBANO	día 5																								
	MEDIDAS (mm)																				mediana		% de vigor		
	Semilla 1		Semilla 2		Semilla 3		Semilla 4		Semilla 5		Semilla 6		Semilla 7		Semilla 8		Semilla 9		Semilla 10		Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	
	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	
CONTROL																									
placa 1	17	27	16	14	17	12	18	13	7	12	17	26	15	12	13	15	13	13	13	21	18,57	40,97	100,00	100,00	
placa 2	15	165	26	90	22	20	12	65	17	15	23	22	20	34	30	37	14	61	15	18					
placa 3	30	57	14	40	16	77	15	25	30	31	26	105	8	5	36	24	24	52	18	121					
COMPOST CONTROL 1:10																									
placa 1	34	18	45	44	33	18	30	36	17	26	17	23	33	24	5	22	38	41	15	46	25,43	23,77	136,98	58,01	
placa 2	33	12	35	20	20	22	25	22	25	33	20	13	17	12	16	12	20	17	25	16					
placa 3	31	22	32	44	31	15	22	15	17	21	24	21	26	24	26	28	33	24	18	22					
COMPOST BATERÍA 1:10																									
placa 1	36	19	30	13	60	77	49	40	26	32	70	40	60	61	41	71	18	8	44	93	50,80	50,93	273,61	124,33	
placa 2	60	73	24	48	77	38	1	0	50	26	66	49	84	76	85	121	53	54	55	22					
placa 3	63	15	42	68	3	5	80	204	70	62	10	16	59	23	57	45	96	82	55	47					
DIGESTATO CONTROL LIQUIDO 1:10																									
placa 1	10	25	7	3	1	0	16	15	6	4	2	0	10	17	3	0	0	0	0	0	3,60	2,37	19,39	5,78	
placa 2	10	4	2	0	5	0	7	0	6	0	7	0	3	3	5	0	0	0	0	0					
placa 3	1	0	2	0	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
DIGESTATO CONTROL SÓLIDO 1:10																									
placa 1	16	54	20	19	11	3	12	38	7	15	8	19	10	8	1	0	6	4	1	0	5,50	7,37	29,62	17,98	
placa 2	3	0	1	0	2	0	7	0	6	0	6	7	0	0	0	0	0	0	0	0					
placa 3	0	12	1	0	5	0	10	5	5	0	8	10	5	5	6	12	8	10	0	0					
DIGESTATO BATERÍA LIQUIDO 1:10																									
placa 1	4	0	2	0	12	13	5	0	9	0	14	8	6	3	8	9	7	9	0	0	2,63	1,50	14,18	3,66	
placa 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
placa 3	2	0	10	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO 1:10																									
placa 1	9	2	13	19	8	1	8	5	2	0	6	4	8	3	12	13	1	0	0	0	5,43	4,63	29,26	11,31	
placa 2	13	26	8	14	7	15	6	11	12	1	11	14	1	0	1	0	0	0	0	0					
placa 3	1	0	2	0	8	0	3	0	7	5	5	6	10	0	1	0	0	0	0	0					

Tabla 19: Mediciones del crecimiento de las raíces y los tallos de las semillas germinadas de rábano en 7 días.

RÁBANO	día 7																							
	MEDIDAS (mm)																				mediana		% de vigor	
	Semilla 1		Semilla 2		Semilla 3		Semilla 4		Semilla 5		Semilla 6		Semilla 7		Semilla 8		Semilla 9		Semilla 10		Tajo	Raíz	Tajo	Raíz
CONTROL	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz	Tajo	Raíz
placa 1	26	21	21	34	22	27	21	23	15	20	28	32	29	37	19	36	16	23	12	41	21,67	49,17	100,00	100,00
placa 2	25	40	20	36	14	180	1	0	20	18	16	67	20	25	35	123	38	40	35	82				
placa 3	25	115	22	2	19	40	4	30	25	125	20	85	22	20	31	60	24	63	25	30				
COMPOST CONTROL 1:10																								
placa 1	60	22	76	45	48	43	68	39	88	32	27	14	56	58	46	47	42	44	69	44	55,90	36,27	258,00	73,76
placa 2	52	57	64	50	64	19	58	32	60	25	53	44	39	28	48	42	59	24	50	32				
placa 3	57	42	48	15	47	25	66	37	63	42	79	47	64	24	49	24	40	58	37	33				
COMPOST BATERÍA 1:10																								
placa 1	20	35	13	103	50	65	53	84	55	30	42	16	38	80	15	15	12	15	30	65	53,73	54,00	248,00	109,83
placa 2	70	48	67	15	110	58	111	75	28	53	85	54	101	112	68	92	72	66	1	0				
placa 3	64	37	90	95	12	30	45	59	60	20	75	70	90	91	50	46	20	42	65	49				
DIGESTATO CONTROL LIQUIDO 1:10																								
placa 1	49	80	18	30	27	80	15	38	45	50	15	10	3	0	1	0	10	0	0	0	13,53	22,57	62,46	45,90
placa 2	51	37	10	35	10	18	12	15	20	25	22	38	5	55	10	24	8	0	0	0				
placa 3	25	39	7	0	5	22	2	0	9	33	4	0	4	3	10	45	5	0	4	0				
DIGESTATO CONTROL SÓLIDO 1:10																								
placa 1	45	71	56	99	17	6	7	0	52	40	40	71	17	22	62	85	28	75	10	17	20,13	32,60	92,92	66,31
placa 2	15	44	11	4	39	83	28	42	15	53	13	45	9	0	25	34	0	0	0	0				
placa 3	37	63	13	8	12	30	23	44	15	32	5	5	4	3	4	2	1	0	1	0				
DIGESTATO BATERÍA LIQUIDO 1:10																								
placa 1	35	15	18	16	26	14	14	20	21	30	10	10	34	15	30	20	7	15	0	0	9,70	7,10	44,77	14,44
placa 2	6	4	7	3	2	0	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
placa 3	8	9	12	4	4	0	32	16	5	2	5	0	6	10	5	10	0	0	0	0				
DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO 1:10																								
placa 1	30	39	15	28	6	3	26	23	49	74	5	1	44	35	23	25	2	9	0	0	18,33	21,13	84,62	42,98
placa 2	56	63	21	40	11	2	15	30	44	32	15	44	45	24	17	46	0	0	0	0				
placa 3	10	4	23	38	9	1	8	0	41	33	17	19	10	6	7	15	1	0	0	0				

Tabla 20: Cálculos del test de germinación de las semillas de pepino y rábano en 5 días .

CÁLCULOS TEST DE GERMINACIÓN		día 5					
	Nº semillas germinadas	Nº total de semillas	SG	RSG	Medida de la radícula semillas germinadas	RRG	GI
	mediana		%	%	mediana	%	%
<b>PEPINO</b>							
CONTROL	10,0	10	100,00	100,00	44,73	100,00	100,00
COMPOST CONTROL 1:10	10,0	10	100,00	100,00	35,37	79,06	79,06
COMPOST BATERÍA 1:10	6,7	10	66,67	66,67	41,23	92,18	61,45
DIGESTATO CONTROL LÍQUIDO 1:10	1,0	10	10,00	10,00	9,87	22,06	2,21
DIGESTATO CONTROL SÓLIDO 1:10	2,0	10	20,00	20,00	10,43	23,32	4,66
DIGESTATO BATERÍA LIQUIDO 1:10	0,7	10	6,67	6,67	6,90	15,42	1,03
DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO 1:10	1,3	10	13,33	13,33	6,40	14,31	1,91
<b>RÁBANO</b>							
CONTROL	10,0	10	100,00	100,00	59,53	100,00	100,00
COMPOST CONTROL 1:10	10,0	10	100,00	100,00	49,20	82,64	82,64
COMPOST BATERÍA 1:10	10,0	10	100,00	100,00	101,73	170,88	170,88
DIGESTATO CONTROL LÍQUIDO 1:10	6,7	10	66,67	66,67	5,97	10,02	6,68
DIGESTATO CONTROL SÓLIDO 1:10	8,3	10	83,33	83,33	12,87	21,61	18,01
DIGESTATO BATERÍA LIQUIDO 1:10	3,7	10	36,67	36,67	4,13	6,94	2,55
DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO 1:10	8,3	10	83,33	83,33	10,07	16,91	14,09

Tabla 21: Cálculos del test de germinación de las semillas de pepino y rábano en 7 días .

CÁLCULOS TEST DE GERMINACIÓN		día 7					
PEPINO	Nº semillas germinadas	Nº total de semillas	SG	RSG	Medida de la radícula semillas germinadas	RRG	GI
	mediana		%	%	mediana	%	%
CONTROL	10,0	10	100,00	100,00	64,23	100,00	100,00
COMPOST CONTROL 1:10	10,0	10	100,00	100,00	63,93	99,53	99,53
COMPOST BATERÍA 1:10	6,7	10	66,67	66,67	44,63	69,49	46,32
DIGESTATO CONTROL LÍQUIDO 1:10	1,7	10	16,67	16,67	9,87	15,36	2,56
DIGESTATO CONTROL SÓLIDO 1:10	2,0	10	20,00	20,00	10,13	15,78	3,16
DIGESTATO BATERÍA LIQUIDO 1:10	1,7	10	16,67	16,67	7,90	12,30	2,05
DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO 1:10	1,3	10	13,33	13,33	5,87	9,13	1,22
RÁBANO	Nº semillas germinadas	Nº total de semillas	SG	RSG	Medida de la radícula semillas germinadas	RRG	GI
	mediana		%	%	mediana	%	%
CONTROL	10,0	10	100,00	100,00	70,83	100,00	100,00
COMPOST CONTROL 1:10	10,0	10	100,00	100,00	92,17	130,12	130,12
COMPOST BATERÍA 1:10	10,0	10	100,00	100,00	107,73	152,09	152,09
DIGESTATO CONTROL LÍQUIDO 1:10	9,3	10	93,33	93,33	36,10	50,96	47,57
DIGESTATO CONTROL SÓLIDO 1:10	9,3	10	93,33	93,33	52,73	74,45	69,48
DIGESTATO BATERÍA LIQUIDO 1:10	7,7	10	76,67	76,67	16,80	23,72	18,18
DIGESTATO BATERÍA SÓLIDO 1:10	8,7	10	86,67	86,67	39,47	55,72	48,29

### 9.1.3. MICROTOX

Las mediciones tomadas en el test de microtox se presentan de la tabla 22 a la 25.

Tabla 22: resultados test microtox de la muestra compost control.

COMPOST CONTROL		TEST 1							
		5 min			15 min				
Muestra	% concentración	bacteria (lo)	compost + bacteria (lt)	% effect	Muestra	% concentración	bacteria (lo)	compost + bacteria (lt)	% effect
control	0,00%	97,19	122,31		control	0,00%	97,19	139,94	
1	0,00%	85,39	121,10	-12,00%	1	0,00%	85,39	130,33	-6,00%
2	0,00%	74,04	94,25	-1,00%	2	0,00%	74,04	95,23	10,00%
3	1,00%	94,34	108,45	8,00%	3	1,00%	94,34	125,30	7,00%
4	2,00%	93,95	115,64	2,00%	4	2,00%	93,95	134,94	0,00%
5	5,00%	96,47	127,63	-5,00%	5	5,00%	96,47	150,11	-8,00%
6	10,00%	37,62	75,44	-59,00%	6	10,00%	37,62	80,53	-48,00%
7	20,00%	105,41	119,75	9,00%	7	20,00%	105,41	140,84	7,00%
8	40,00%	101,76	106,91	16,00%	8	40,00%	101,76	118,34	19,00%
9	81,00%	89,77	72,60	35,00%	9	81,00%	89,77	78,20	39,00%

Tabla 23: resultados test microtox de la muestra compost batería.

COMPOST BATERÍA					15 min				
5 min					15 min				
Muestra	% concentración	bacteria (lo)	compost + bacteria (lt)	% effect	Muestra	% concentración	bacteria (lo)	compost + bacteria (lt)	% effect
control	0,00%	96,22	106,64		control	0,00%	96,22	109,32	
1	0,00%	89,81	100,35	0,00%	1	0,00%	89,81	106,10	-3,00%
2	0,00%	94,78	103,14	1,00%	2	0,00%	94,78	108,32	0,00%
3	1,00%	93,59	105,05	-1,00%	3	1,00%	93,59	113,52	-6,00%
4	2,00%	95,95	107,86	-1,00%	4	2,00%	95,95	117,22	-7,00%
5	5,00%	96,88	112,80	-5,00%	5	5,00%	96,88	123,14	-11,00%
6	10,00%	96,89	107,85	0,00%	6	10,00%	96,89	119,62	-8,00%
7	20,00%	90,40	99,14	1,00%	7	20,00%	90,40	110,70	-7,00%
8	40,00%	101,18	87,88	21,00%	8	40,00%	101,18	93,60	18,00%
9	81,00%	100,03	79,98	27,00%	9	81,00%	100,03	83,70	26,00%

Tabla 24: resultados test microtox de la muestra digestato control.

DIGESTATO CONTROL					15 min				
5 min					15 min				
Muestra	% concentración	bacteria (lo)	compost + bacteria (lt)	% effect	Muestra	% concentración	bacteria (lo)	compost + bacteria (lt)	% effect
control	0,00%	94,22	110,97		control	0,00%	94,22	117,16	
1	0,00%	91,50	102,01	5,00%	1	0,00%	91,50	107,32	5,00%
2	0,00%	96,77	98,90	13,00%	2	0,00%	96,77	107,16	10,00%
3	1,00%	94,43	90,73	18,00%	3	1,00%	94,43	98,41	16,00%
4	2,00%	100,42	81,45	31,00%	4	2,00%	100,42	89,69	28,00%
5	5,00%	91,15	69,04	35,00%	5	5,00%	91,15	77,30	31,00%
6	10,00%	92,62	50,61	53,00%	6	10,00%	92,62	56,43	51,00%
7	20,00%	88,59	33,21	68,00%	7	20,00%	88,59	36,57	66,00%
8	40,00%	85,77	19,86	80,00%	8	40,00%	85,77	22,15	79,00%
9	81,00%	87,81	11,37	89,00%	9	81,00%	87,81	12,73	88,00%

Tabla 25: resultados test microtox de la muestra digestato batería.

DIGESTATO BATERÍA					15 min				
5 min					15 min				
Muestra	% concentración	bacteria (lo)	compost + bacteria (lt)	% effect	Muestra	% concentración	bacteria (lo)	compost + bacteria (lt)	% effect
control	0,00%	95,79	113,50		control	0,00%	95,79	119,63	
1	0,00%	91,00	113,69	-5,00%	1	0,00%	91,00	124,77	-9,00%
2	0,00%	91,67	95,49	12,00%	2	0,00%	91,67	105,80	7,00%
3	1,00%	91,89	88,90	18,00%	3	1,00%	91,89	97,01	15,00%
4	2,00%	87,85	77,14	25,00%	4	2,00%	87,85	84,69	22,00%
5	5,00%	91,76	67,42	39,00%	5	5,00%	91,76	76,23	35,00%
6	10,00%	91,39	60,67	43,00%	6	10,00%	91,39	67,70	40,00%
7	20,00%	90,96	37,25	65,00%	7	20,00%	90,96	41,80	63,00%
8	40,00%	82,88	22,60	76,00%	8	40,00%	82,88	24,54	76,00%
9	81,00%	93,94	13,35	88,00%	9	81,00%	93,94	15,19	87,00%