



Universidad
de La Laguna

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
SECCIÓN DE INGENIERÍA AGRARIA

Grado en Ingeniería Agrícola y del Medio Rural

Ensayo de compostaje de bioplásticos
mediante lombrices rojas (*Eisenia foetida*)

Gueton Calderón Hernández

La Laguna, julio 2023



**AUTORIZACIÓN DEL TRABAJO FIN DE
GRADO POR SUS DIRECTORES
CURSO 2022/2023**

DIRECTOR – COORDINADOR: Antonio César Perdomo Molina

DIRECTOR: Juan Luis Ramos Suárez

Como directores del alumno D. Guetón Calderón Hernández en el TFG titulado: Ensayo de compostaje de bioplásticos mediante lombrices rojas (*Eisenia foetida*), n.º de Ref. 4, damos nuestra autorización para la presentación y defensa de dicho TFG, a la vez que confirmamos que el alumno ha cumplido con los objetivos generales y particulares que lleva consigo la elaboración del mismo y las normas del Reglamento de Trabajo Fin de Grado de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería.

La Laguna, a 20 de Julio de 2023

Fdo.

Fdo.

2

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
La autenticidad de este documento puede ser comprobada en la dirección: <http://sede.ull.es/validacion>

Identificador del documento: 5531829 Código de verificación: ihZsWhI1

Firmado por: Juan Luis Ramos Suárez
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 20/06/2023 14:25:20

Antonio César Perdomo Molina
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

20/06/2023 15:55:04



Agradecimientos

A mis tutores Juan Luis Ramos Suárez y Antonio César Perdomo Molina, al grupo de investigación del Prof. Víctor S. Martín por la realización de los ensayos de ^1H RMN y su ayuda en la interpretación de los mismos. Al personal de limpieza por ayudarme a mantener la cordura en el laboratorio. A Cafetería La Troya por la aportación de las borras de café.

A mi madre, a mi padre y a mi hermano.



INDICE

1	Introducción	1
2	Objetivos	2
3	Revisión bibliográfica	3
3.1	El plástico y el bioplástico	3
3.1.1	La crisis del plástico	3
3.1.2	Nacimiento de los bioplásticos y desarrollo	3
3.1.3	Legislación del plástico e implantación del bioplástico en Europa 7	
3.1.4	Legislación del plástico e implantación del bioplástico en España 8	
3.1.5	Consumo de bolsas de un solo uso en Europa y España	9
3.2	Almidón en la industria del bioplástico	11
3.2.1	Los polímeros con base de almidón (Starch-based).....	11
3.2.2	Almidón termoplástico (TPS)	11
3.2.3	Mezclas del almidón termoplástico con otros polímeros (TPS-polymer blends)	11
3.2.4	Polímeros de almidón en la industria del envase	12
3.3	Vermicultura	12
3.3.1	Lombriz roja californiana	13
3.3.2	Explotación de la lombriz.....	14
3.3.3	Métodos y estructuras.....	15
3.3.3.1	Vermicompost en pilas	15
3.3.3.2	Vermicompost de camas.....	15
3.3.3.3	Sistema de bandejas	16
3.3.3.4	Sistemas de flujo moderno	16
3.3.4	Métodos de cosecha.....	16
4	Material y métodos	18
4.1	Material	18
4.1.1	Tipo de lecho	18
4.1.2	Sustrato.....	20



4.1.3	Población inicial.....	22
4.1.4	Bolsas de bioplástico	24
4.1.5	Alimento	26
4.1.6	Riegos.....	28
4.2	Metodología.....	29
4.2.1	Ubicación del ensayo	29
4.2.2	Diseño experimental	29
4.2.3	Finalización del ensayo	31
4.2.3.1	Recogida de bolsas	31
4.2.3.2	Análisis del espectro	33
4.2.3.3	Población final.....	33
4.3	Accidentes y observaciones	37
4.4	Análisis estadístico	40
5	Resultados y discusión.....	41
5.1	Bolsas de bioplástico	41
5.2	Lombrices.....	43
5.3	Análisis estadístico	44
6	Conclusiones	49
7	Conclusions	50
8	Referencias bibliográficas.....	51



INDICE RECURSOS

Cuadro 1. Proyección de la producción mundial de bioplástico.....	4
Cuadro 2. Capacidad mundial de producción de bioplásticos en 2022 (por tipo de material) 5	
Cuadro 3. Capacidad mundial de producción de bioplásticos en 2027 (por tipo de material) 6	
Cuadro 4. Capacidad mundial de producción de bioplástico por regiones en 2022.	7
Cuadro 5. Consumo de bolsas plásticas (inferiores a 50 y superiores a 15 µm) por habitante en Europa. 10	
Figura 1. Bandeja propileno con tapa.	18
Figura 2. Perforación de las bandejas.	19
Figura 3. Spray MTN 94 R9011 Negro 400 ml.	19
Figura 4. Pintado con spray de las bandejas.....	20
Figura 5. Hidratación de la fibra de coco.....	21
Figura 6. Reducción de humedad en la fibra de coco.....	22
Figura 7. Selección de lombrices adultas.....	23
Figura 8. Grupos de lombrices adultas sobre la fibra.	23
Figura 9. Saco de malla roja de fruta y verduras.....	24
Figura 10. Pesaje de las bolsas.....	25
Figura 11. Bolsas con malla en sus respectivas bandejas.	26
Figura 12. Aporte de borras de café.....	27
Figura 13. Aporte de café.	28
Figura 14. Sistema de riego.	29
Figura 15. Esquema del proyecto.....	30
Figura 16. Esquema del proyecto.....	31
Figura 17. Limpieza de bolsa.	32
Figura 18. Secado en estufa.....	33
Figura 19. Retirada de lombrices atrapadas en la malla.....	34
Figura 20. Recuento de lombrices.....	35
Figura 21. Diversidad de lombrices en la fibra de coco.	36
Figura 22. Puestas de cápsulas de las lombrices.	37
Figura 23. Hongos en las borras de café.....	38
Figura 24. Larvas de Drosophila melanogaster.	39
Tabla 1. Evolución muestra S.	41
Tabla 2. Evolución muestra C.....	41



Gráfica 1.	Espectro de la bolsa SPAR.....	42
Gráfica 2.	Espectro de la bolsa Cofarte.	43
Tabla 3.	Población de lombrices en muestra S.....	44
Tabla 4.	Población de lombrices en muestra C.....	44
Tabla 5.	Población de lombrices en muestra T.....	44
Tabla 6.	Análisis descriptivo.....	45
Tabla 7.	Análisis descriptivo.....	45
Tabla 8.	Prueba de Levene.....	46
Tabla 9.	Prueba ANOVA.....	47
Gráfica 3.	Diagrama de Cajas y Bigotes.	48



TITULO: Ensayo de compostaje de bioplásticos, mediante lombrices rojas (*Eisenia foetida*).

AUTOR: Guetón Calderón Hernández

TUTOR/A TUTORES/AS: Juan Luis Ramos Suárez y Antonio César Perdomo Molina

PALABRAS CLAVE: bioplástico, vermicultura, bolsa, *Eisenia foetida*, PLA, PBAT.

RESUMEN:

En el ensayo se realizó un proceso de vermicompostado de bolsas de bioplástico. La bolsa de SPAR estaba formada en su totalidad por PBAT, sin embargo, la bolsa Cofarte por 52,46±0,64% de PBAT y un 47,54±0,64% de PLA. Se aportó una cantidad de 5,3 gramos de bioplástico en cada repetición. Se realizaron 4 repeticiones con cada una de las bolsas, además de una serie testigo en la que las lombrices no fueron expuestas a biopolímero alguno. Las lombrices sometidas al proceso pertenecían a la especie *Eisenia foetida*, cada repetición lo formaban 100 adultos de similares características, se utilizó fibra de coco como sustrato y borras de café como alimento. El estudio se realizó en bandejas de 39,5 cm de largo 34 cm de ancho 18,5 cm de altura.

Además, las muestras se analizaron tanto antes como después por resonancia magnética nuclear de protón (¹H RMN) en el Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI) obteniéndose, para cada una, una imagen (espectro) que indica los distintos protones presentes en los biopolímeros que constituyen las bolsas.

Pasados 120 días se procedió a evaluar cómo había afectado el proceso a la población de lombrices y el nivel de degradación sufrido por los bioplásticos. El recuento de lombrices clasifico los individuos en adultos y jóvenes no encontrando diferencias significativas entre los tratamientos y el testigo. Las lombrices nacidas durante este ensayo no tuvieron tiempo suficiente como para alcanzar la edad adulta, por lo tanto, todas se contabilizaron como jóvenes.

Al retirar las bolsas de bioplástico, estas se separaron de los restos de materia orgánica por inmersión y sometieron a proceso de secado en horno previamente a su pesado, concluyendo con una pérdida de peso de 0,9 gramos de media en ambos ensayos. No se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto a la pérdida de masa.

En la resonancia magnética nuclear de protón (¹H RMN) sí que se encontraron diferencias significativas a nivel molecular en los biopolímeros que formaban las bolsas Cofarte la composición final es de 57,28±0,31% de PBAT y 42,72±0,31% de PLA: hay una pérdida del 10,12% de PLA, que es estadísticamente significativo.



TITLE: Composting trial of bioplastics using red worms (*Eisenia foetida*).

AUTHOR: Guetón Calderón Hernández.

DIRECTOR/DIRECTORS: Juan Luis Ramos Suárez y Antonio César Perdomo Molina.

KEYWORDS: bioplastics, vermiculture, bag, *Eisenia foetida*, PLA, PBAT.

ABSTRACT:

The trial carried out a vermicomposting process of bioplastic bags. The SPAR bag was entirely made of PBAT, whereas the Cofarte bag consisted of $52,46 \pm 0,64\%$ PBAT and $47,54 \pm 0,64\%$ PLA. A quantity of 5,3 grams of bioplastic was added in each repetition. Four repetitions were conducted for each bag, along with a control group in which the worms were not exposed to any biopolymer. The worms used in the process belonged to the *Eisenia foetida* species, with each repetition consisting of 100 adults with similar characteristics. Coconut fiber was used as the substrate, and coffee grounds were provided as food. The study was conducted using trays measuring 39,5 cm in length, 34 cm in width, and 18,5 cm in height.

Additionally, the samples were analyzed before and after using proton nuclear magnetic resonance (^1H RMN) at the General Support Service for Research (SEGAI), obtaining an image (spectrum) for each sample that indicates the different protons present in the biopolymers constituting the bags.

After 120 days, the impact of the process on the worm population and the level of degradation experienced by the bioplastics were assessed. The worm count categorized the individuals into adults and juveniles, with no significant differences found between the treatments and the control group. The worms born during this trial did not have enough time to reach adulthood; therefore, they were all counted as juveniles.

Upon removing the bioplastic bags, they were separated from the organic matter residues through immersion and subsequently subjected to drying in an oven prior to weighing. The results showed an average weight loss of 0,9 grams in both trials. No significant differences were detected between the treatments regarding the mass loss.

Significant differences were found through proton nuclear magnetic resonance (^1H RMN) at the molecular level in the biopolymers composing the Cofarte bags. The final composition was determined to be $57,28 \pm 0,31\%$ PBAT and $42,72 \pm 0,31\%$ PLA, indicating a statistically significant 10,12% loss of PLA.



1 Introducción

El plástico es un material sintético que se utiliza ampliamente en diversos sectores industriales y domésticos. Sin embargo, su producción y consumo tienen un gran impacto negativo sobre el medio ambiente y la salud humana. El proceso de degradación del plástico es extremadamente lento y durante este proceso se acumula en los ecosistemas terrestres y marinos, causando contaminación, pérdida de biodiversidad, daños a la fauna y flora, y alteraciones en los ciclos biogeoquímicos (Geyer et al. 2017). Además, puede liberar sustancias tóxicas que afectan al equilibrio hormonal, al sistema inmunológico y al desarrollo neurológico de las personas (Gore et al., 2015).

Ante este problema, han surgido los bioplásticos como una alternativa más sostenible y ecológica (Comisión Europea, 2021). Estos son materiales biodegradables que se obtienen a partir de fuentes renovables de origen vegetal o animal, como el almidón, la celulosa, el ácido láctico o la quitina. Esta alternativa tiene algunas ventajas como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, el ahorro de recursos fósiles, la mejora de la gestión de residuos y la creación de nuevas oportunidades económicas y sociales. Sin embargo, los bioplásticos también presentan algunos desafíos como sustitutos del plástico a nivel mundial, como el aumento de la demanda de tierras agrícolas, el uso de transgénicos, la competencia con la producción de alimentos, la gestión de los residuos y la necesidad de mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas (Labeaga, 2015).

El consumo de bolsas de un solo uso, compuestas en la actualidad por bioplásticos, genera un volumen relevante de residuos, ante esto se presenta un nuevo reto en torno a su gestión. Una de las opciones que podrían tener cabida, al igual que con otros residuos orgánicos, podría ser a través de procesos de vermicompostado, tal y como se refleja en algunas agroguías (Alonso, 2014).



2 Objetivos

Comprobar en qué medida los bioplásticos presentes en las bolsas plásticas de un solo uso son vermicompostables.

Conocer la degradación de diversos tipos de bolsas sometidas al proceso de vermicompostaje.

Observar los efectos sobre las poblaciones de lombriz roja (*Eisenia foetida*), alimentadas con estos bioplásticos.



3 Revisión bibliográfica

3.1 El plástico y el bioplástico

3.1.1 La crisis del plástico

El plástico es un material sintético que se obtiene prácticamente en su totalidad a partir del petróleo, un recurso no renovable. El plástico tiene muchas aplicaciones en la industria, la medicina, la agricultura y la vida cotidiana, pero también genera problemas ambientales y sociales debido a su producción, uso y desecho.

La baquelita fue el precursor de la revolución de los plásticos y su inventor, Leo Baekeland, fue pionero en la síntesis de polímeros completamente sintéticos. Sin embargo, a pesar de su importancia histórica, la baquelita fue pronto desplazada por los plásticos derivados del petróleo (Labeaga, 2015). Estos nuevos plásticos eran más económicos, resistentes y adecuados para una producción masiva, lo que permitió su rápido crecimiento y expansión en la industria. Durante la Segunda Guerra Mundial, el plástico se convirtió en un material estratégico y se desarrollaron nuevos tipos como el polietileno o el poliuretano. Después de la guerra, el plástico se expandió por todo el mundo como un material barato, ligero y duradero (Freinkel, 2011).

Con el tiempo, se crearon nuevos tipos de plásticos como el polipropileno, el poliéster o el PVC, lo que permitió su aplicación en diferentes industrias, como la de envases, textiles, tuberías o muebles (Labeaga, 2015). Sin embargo, el uso masivo de plásticos también trajo consigo problemas ambientales, como la acumulación de residuos plásticos en los océanos y la emisión de gases de efecto invernadero durante su producción (Comisión Europea 2021).

Instituciones internacionales se han pronunciado de manera ininterrumpida arrojando datos, en especial sobre los plásticos de un solo uso. Cada minuto se consumen de manera global un millón de botellas plásticas y hasta 500.000 millones de bolsas de forma anual. Hasta ocho millones de toneladas de envases plásticos acaban en los océanos cada año, formando islas plásticas y amenazando a la vida marina (ONU 2019).

La contaminación plástica afecta de manera desproporcionada a las personas, grupos y pueblos en situaciones vulnerables, pone en riesgo sus derechos básicos, salud y bienestar, y plantea obstáculos sustanciales para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Por ello, es prioritario a nivel mundial adoptar medidas para reducir el uso de plásticos, especialmente los de un solo uso, que representan el 50% del total (ONU 2019).

3.1.2 Nacimiento de los bioplásticos y desarrollo

Los bioplásticos son materiales que se obtienen a partir de fuentes renovables, que mayoritariamente son vegetales, aunque también pueden ser de origen bacteriano. Por ello, este término se relaciona únicamente con el origen del material que los forman y no con su biodegradabilidad, cualidad que erróneamente se les adjudica.

Este tipo de materiales ya se usaban en civilizaciones tan antiguas como las egipcias 2000 a.c donde se utilizaban resinas naturales para embalsamar a los muertos (Labeaga, 2015). Otras culturas como los aztecas y mayas empleaban el caucho obtenido del látex de *Evea brasiliensis* para elaborar calzados y pelotas (Lange, 1996).

No fue hasta fechas más recientes cuando en el siglo XIX se descubrió por accidente la vulcanización del caucho natural, dando lugar a un material más elástico y resistente.

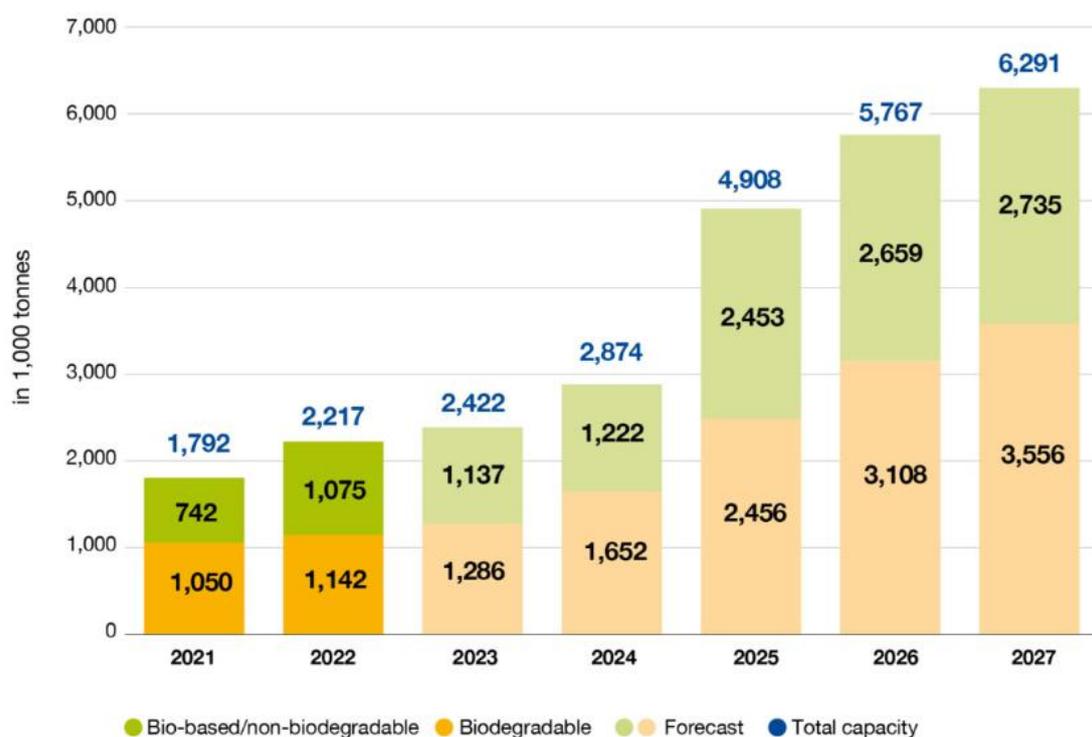
Prosiguiendo el hilo histórico, a medida que se crearon materiales como el celuloide (1869), reemplazo del marfil en teclas de piano y bolas de billar, o el celofán (1912), al que aún se le da



un uso habitual en la actualidad. Sin embargo la síntesis de los plásticos derivados del petróleo fue abrumadora durante este periodo temporal y desplazó rápidamente el desarrollo de los plásticos obtenidos a partir de materiales naturales (Labeaga, 2015).

En los 90 la cuestión ambiental empieza a ganar peso a nivel tanto gubernamental como social, a raíz de esto se vuelve a despertar la curiosidad por el bioplástico, que durante muchos años fue desplazado del plano de interés mundial. Debido a ello se ha desencadenado una nueva búsqueda de estrategias de biopolímeros empleando materias primas vegetales como trigo plátano, maíz, papa, arveja, yuca, entre otras (Huaynamarca et al., 2020).

La producción mundial de bioplásticos ha aumentado en los últimos años, debido a la creciente demanda de alternativas sostenibles al plástico convencional, pero también ha aumentado la producción del plástico después del estancamiento de 2020 principalmente a causa de la COVID-19. Según un informe de la *European Bioplastics* y el *Nova-Institute*, se espera que la producción mundial de bioplásticos pase de 2,2 millones de toneladas en 2022 a 6,3 millones de toneladas en 2027 (Cuadro 1). Los plásticos vegetales representan actualmente menos del 1% del total de 390 millones de toneladas de plástico producido anualmente (European Bioplastic, 2022).



Source: European Bioplastics, nova-Institute (2022). More information: www.european-bioplastics.org/market and www.bio-based.eu/markets

Cuadro 1. Proyección de la producción mundial de bioplástico.

Fuente. European Bioplastics, 2022.

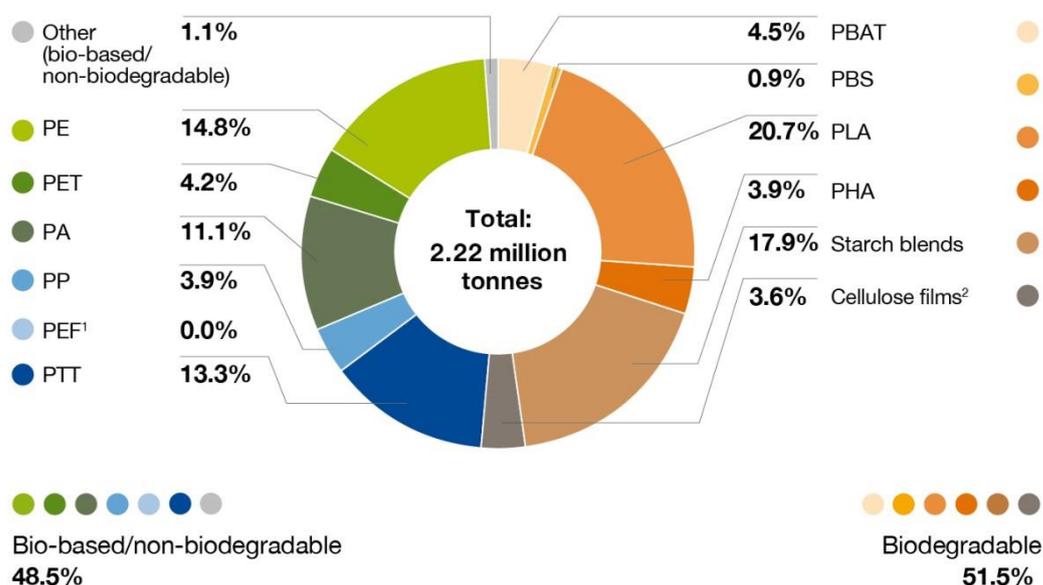
En su totalidad, los plásticos de origen vegetal biodegradables entre los que se incluyen PLA (ácidos polilácticos) y los PHA (polihidroxialcanoatos) y otros, suponen más del 51,5% (Cuadro 2) superando ligeramente el 1,1 millón de toneladas del total de la producción mundial de



bioplásticos, y se espera que el aumento previsto para los próximos años se centre en un contundente desarrollo de polímeros como el PHA, PLA. (Cuadro 3).

El restante son los plásticos no biodegradables de base biológica, y suponen el 48,5% (Cuadro 2) por debajo del 1,1 millón de toneladas de la producción mundial de los bioplásticos, entre los que destacan el PE (polietileno), PET (tereftalato de polietileno) y PA (poliamidas). La previsión indica que su porcentaje caiga hasta el 43,5% (Cuadro 3) frente a un mayor crecimiento de los biodegradables, sin embargo, en valores absolutos se estima que se alcancen los 2,7 millones de toneladas para 2027 (Gráfico 1). La producción de PET se mantendrá estable mientras que el polipropileno (PP) la poliamida (PA) y polietileno (PE) serán los protagonistas del crecimiento de los no biodegradables.

Global production capacities of bioplastics 2022 (by material type)



¹PEF is currently in development and predicted to be available at commercial scale in 2023. ² Regenerated cellulose films

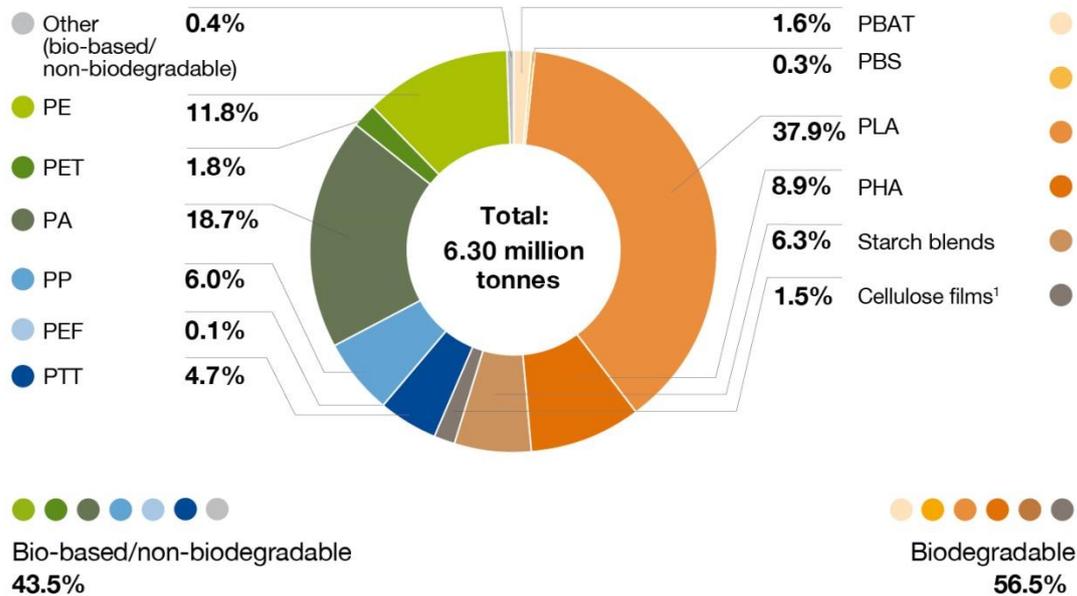
Source: European Bioplastics, nova-Institute (2022). More information: www.european-bioplastics.org/market and www.bio-based.eu/markets

Cuadro 2. Capacidad mundial de producción de bioplásticos en 2022 (por tipo de material)

Fuente. European Bioplastics, 2022.



Global production capacities of bioplastics 2027 (by material type)



¹ Regenerated cellulose films

Source: European Bioplastics, nova-Institute (2022). More information: www.european-bioplastics.org/market and www.bio-based.eu/markets

Cuadro 3. Capacidad mundial de producción de bioplásticos en 2027 (por tipo de material)

Fuente. European Bioplastics, 2022.

En la carrera por la industria del bioplástico, Asia es el principal productor a nivel mundial cubriendo el 41% (Cuadro 4) del mercado mundial. En la actualidad el 26,5% de la producción aun reside en Europa siendo el segundo mayor productor a nivel mundial, sin embargo, se estima que su participación disminuya significativamente en los próximos años, al igual que la del resto de regiones. Esto coloca a Asia con expectativas de dominar aún más este mercado, hasta poseer el 63% para el año 2027. (European Bioplastics, 2022)



Global production capacities of bioplastics in 2022 (by region)



Source: European Bioplastics, nova-Institute (2022). More information: www.european-bioplastics.org/market and www.bio-based.eu/markets

Cuadro 4. Capacidad mundial de producción de bioplástico por regiones en 2022.

Fuente. European Bioplastics, 2022.

Se estima que en 2022 una superficie de 0,8 millones de hectáreas está dedicada al cultivo de materias primas renovables para la elaboración de bioplásticos, esto supone un 0,015% de los 5.000 millones de hectáreas de superficie agrícola mundial (European Bioplastics, 2022). Se calcula que la participación del uso de suelo agrícola destinado a los bioplásticos aumentara hasta quedar entorno al 0,06% (European Bioplastics, 2022) de esta, y que en un futuro próximo no supone una competencia con otras industrias como la ganadera o la alimenticia.

3.1.3 Legislación del plástico e implantación del bioplástico en Europa

Desde Europa se han puesto en marcha numerosas normativas para realizar esta transición y sustitución del plástico por opciones más sostenibles, a continuación, se describen de manera cronológica los pasos que ha dado la Unión Europea para recipientes de plástico de un solo uso:

- A finales de 2015 la comisión europea puso en marcha un plan de acción para la economía circular, en el que los plásticos eran una prioridad, y se compromete a “preparar una estrategia en la que se aborden los retos que plantean los plásticos a lo largo de toda la cadena de valor y teniendo en cuenta la totalidad de su ciclo de vida” (European Commission, 2015).

- Esto se reafirmó en 2018, cuando la Comisión Europea propuso una directiva para reducir el impacto de ciertos productos de plástico en el medio ambiente, especialmente los que se encuentran con más frecuencia en las playas y en el mar. Con el objetivo de lograr que la totalidad de los envases de plástico fueran reciclables para 2030. (European Commission ,2018)

- En 2019, el Parlamento Europeo y el Consejo adoptaron la Directiva (UE) 2019/904 sobre la reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medio ambiente, que establece medidas para prevenir y reducir el consumo de recipientes de plástico de un solo uso, así como para fomentar su reutilización y reciclaje. (OE. 2019)



- En 2020, la Comisión Europea adoptó un reglamento que establece los requisitos para el etiquetado de algunos productos de plástico de un solo uso, que deben informar a los consumidores sobre las formas adecuadas de eliminación de los residuos, el impacto negativo de los productos en el medio ambiente y la presencia de plásticos en los productos. (European Commission, 2020)

- En 2021, en la Unión Europea entró en vigor la prohibición de comercializar ciertos productos de plástico de un solo uso para los que existen alternativas, como las bolsas, los cubiertos, los platos, las pajitas, los bastoncillos de algodón y los recipientes de poliestireno expandido para alimentos y bebidas. (European Commission, 2021)

3.1.4 Legislación del plástico e implantación del bioplástico en España

España al igual que el resto de los países de la Unión Europea se ha visto abocado al cambio, publicando unas pautas con continuos cambios durante los últimos años para adaptar de manera progresiva las normativas al entorno nacional. A continuación, se presenta una cronología de la normativa española que facilitó la transición de las bolsas de plástico de un solo uso:

- 2011: Se aprueba el Real Decreto 1494/2011, por el que se crea el Registro de Productores de Productos (REPP), que obliga a los fabricantes e importadores de bolsas de plástico a inscribirse en dicho registro y a declarar anualmente las cantidades producidas o importadas (BOE, 2011).

- 2015: Se aprueba el Real Decreto 293/2018, por el que se modifica el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados, que establece la obligación de cobrar al consumidor una cantidad por cada bolsa de plástico que se le entregue en los puntos de venta, con el fin de desincentivar su uso y fomentar el empleo de bolsas reutilizables o biodegradables. Esta medida entra en vigor el 1 de julio de 2018 (BOE, 2018).

- 2018: Se aprueba el Real Decreto 293/2018, por el que se modifica el Reglamento para el desarrollo y ejecución de la Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados, que introduce nuevas medidas para reducir el consumo de bolsas de plástico. Entre ellas, se establece la prohibición de entregar bolsas de plástico fragmentables (que se descomponen en pequeños trozos, pero no se biodegradan, comúnmente conocidos como microplásticos) a partir del 1 de enero de 2020 y la prohibición de entregar bolsas de plástico ligeras (con un espesor inferior a 50 micras) y muy ligeras (con un espesor inferior a 15 micras) que no sean compostables a partir del 1 de enero de 2021. Además, se fija un precio mínimo orientativo para las bolsas de plástico con un espesor igual o superior a 50 micras que se entreguen al consumidor, las cuales deben estar formadas por un 50% de plástico reciclado (BOE, 2018).

- 2020: Se aprueba la Ley 7/2020, por la que se modifica la Ley 22/2011, de residuos y suelos contaminados, para transponer la Directiva (UE) 2019/904 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la reducción del impacto de determinados productos plásticos en el medio ambiente. Esta ley introduce nuevas medidas para prevenir y reducir el consumo de productos plásticos de un solo uso, entre ellos las bolsas. Así, se establece la prohibición de entregar al consumidor bolsas oxodegradables (que contienen aditivos que aceleran su fragmentación, pero no su biodegradación) a partir del 3 de julio de 2021 y la prohibición de entregar al consumidor bolsas ligeras y muy ligeras que no sean compostables domésticamente (que puedan ser compostadas en condiciones domésticas sin necesidad de instalaciones industriales) a partir del 31 de diciembre de 2021. Además, se establece un objetivo nacional para reducir el consumo anual per cápita de bolsas ligeras y muy ligeras a un máximo de 40 unidades en 2026 (BOE, 2022).



3.1.5 Consumo de bolsas de un solo uso en Europa y España

La Unión Europea ha adoptado medidas para reducir el consumo de bolsas de plástico de un solo uso y promover el uso de alternativas más sostenibles, como las bolsas de bioplástico.

Según los datos disponibles en las bases de datos de Eurostat, en los últimos años ha habido una tendencia decreciente en el consumo de bolsas de plástico en la Unión Europea. Sin embargo, debido a la falta de datos actualizados desde 2020, no es posible saber cómo ha evolucionado el consumo de bolsas de bioplástico en los últimos años.

En 2021, la Unión Europea prohibió el uso de bolsas plásticas de un solo uso y promovió el uso de alternativas sostenibles. Aunque esta medida ha sido implementada recientemente, es importante seguir monitoreando y evaluando su impacto en el consumo de bolsas de un solo uso, tanto plásticas como bioplásticas. Es posible que se requiera algún tiempo para que los nuevos datos de consumo de bolsas de biopolímeros estén disponibles, debido a los cambios en la producción y el consumo para que estas se reflejen en las estadísticas oficiales. Teniendo en cuenta, además, que los datos de los últimos años pueden estar sesgados por la anomalía producida en el mercado y en la sociedad a causa de la crisis del COVID-19.

Debemos aguardar por tanto unos años para seguir monitoreando y evaluando la implementación de estas medidas y comprender mejor su impacto en el consumo, esperando que siga el descenso sostenido.

España se encuentra entre los países europeos que más bolsas plásticas de un solo uso consumían hasta el año 2020 (Cuadro 5). El consumo de estas, tanto en España como en otros países puede estar influenciado por factores culturales, como las prácticas de consumo y la conciencia ambiental de la población. En algunos lugares, el uso de bolsas de plástico se ha convertido en una costumbre arraigada, por lo que puede resultar difícil cambiar estas prácticas y hábitos. Sin embargo, cada vez son más las iniciativas y campañas que buscan fomentar el uso de alternativas sostenibles y reducir el consumo de plásticos de un solo uso, lo que puede contribuir a un cambio cultural en este sentido. Además, las políticas y regulaciones a nivel nacional y europeo también juegan un papel importante en esta transición.



Tiempo	2018	2019	2020
País			
Letonia	327,1	284,4	229,2
Lituania	322,5	331,5	293,6
Chipre	234,3	154,1	161,9
Chequia	202,6	247,4	251,4
España	186,1	151,8	186,5
Bulgaria	180,6	198,6	:
Estonia	179,9	152,1	:
Finlandia	156	147,5	:
Suecia	153,4	149	102,8
Noruega	146	139	201,2
Eslovaquia	128,9	104,7	92,9
Grecia	111,5	113,3	:
Luxemburgo	110,5	62,8	26
Hungría	110,6	86,6	90,8
Francia	104,2	103,9	70,2
Unión Europea (27 países 2020)	94,4	92,7	87,2
Italia	92,2	111,2	:
Rumania	86,1	95,5	:
Eslovenia	79,3	72,8	73,7
Alemania	57,3	54,4	44,8
Irlanda	57,2	51	49,2
Croacia	52,8	94,6	90,2
Austria	51,7	37,2	25,2
Bélgica	28,2	17,2	9,8
Polonia	23,4	23,4	19,8
Portugal	7,7	7,7	17,1

Cuadro 5. Consumo de bolsas plásticas (inferiores a 50 y superiores a 15 µm) por habitante en Europa.

Fuente. Eurostat, 2022.

El rigor de estos datos es cuestionable ya que cada país realiza los informes de consumo de maneras diferentes, en España estos provienen de informes de los productores o importadores en el registro público.

Es obligatorio para los productores e importadores proporcionar información sobre el número y el peso total de las bolsas de plástico que ponen a disposición del mercado. España ha señalado que algunas empresas pueden estar incumpliendo esta obligación, pero no ha dado una estimación de qué proporción del mercado estas empresas representan. En cuanto al consumo de bolsas de plástico en España, en 2020 se registró un total de 187 bolsas per cápita (Cuadro 5), mientras que en 2019 se registraron 152 bolsas per cápita. El consumo de bolsas de plástico de menos de 15 micras aumentó de 100 bolsas per cápita a 128 bolsas per cápita (Eurostat, 2022).



3.2 Almidón en la industria del bioplástico

3.2.1 Los polímeros con base de almidón (Starch-based)

El almidón es un polímero natural presente en las plantas y es una de las fuentes más abundantes en la naturaleza. La obtención de almidón es relativamente sencilla y económica, por ello es ampliamente utilizado en la producción de materiales bio-basados, en la industria de los bioplásticos, en particular para la fabricación de envases biodegradables (Cyras & Vázquez, 2005). Las principales fuentes de almidón son los tubérculos, cereales y leguminosas. El almidón está compuesto de cadenas de glucosa que se unen mediante enlaces glucosídicos α -D (1-4) y α -D (1-6) para formar la amilosa y la amilopectina. La estructura del almidón varía entre diferentes tipos de plantas y está compuesta de láminas cristalinas y amorfas (Fuentes, 2015).

Las características que determinan la funcionalidad del almidón son el tamaño y tipo de grano, la cristalinidad, la densidad del envase, la presencia de grasa, la capacidad de hincharse, la gelatinización, la retrogradación y las propiedades reológicas. Los almidones puros suelen requerir modificaciones químicas o físicas para mejorar sus características y hacerlos adecuados para aplicaciones industriales (Fuentes, 2015).

3.2.2 Almidón termoplástico (TPS)

El procesado físico del almidón implica la gelatinización y retrogradación para obtener un almidón modificado con una estructura compacta y termoestable, esta se utiliza en la industria alimentaria y para la producción de almidón termoplástico biodegradable. Sin embargo, la modificación física del almidón no es suficiente para obtener films con las propiedades mecánicas necesarias para su uso como envase, por lo que se requiere la mezcla con plastificantes u otros materiales. Los plastificantes afectan a las propiedades mecánicas del polímero y se utilizan para favorecer la gelatinización y evitar la degradación del polímero durante la extrusión. El glicerol es el plastificante más utilizado, pero también se utilizan otros como el agua, sorbitol y urea. Los TPS formados a partir de concentraciones elevadas de amilosa son preferibles para obtener materiales biodegradables con mejores propiedades barrera. Sin embargo, los TPS tienen limitaciones en cuanto a viscosidad, capacidad de mezcla, sensibilidad al agua y fragilidad, lo que hace necesario su combinación con otros polímeros sintéticos para cubrir estas deficiencias (Fuentes, 2015).

3.2.3 Mezclas del almidón termoplástico con otros polímeros (TPS-polymer blends)

Para obtener los polímeros de almidón mezclado se combina el almidón TPS o incluso almidón sin modificar con compuestos petroquímicos, bio-basados o inorgánicos para obtener una mezcla homogénea con diferentes propiedades según su propósito. Estos plásticos de almidón son una alternativa a los plásticos de origen petroquímico y pueden ser biodegradables en su totalidad o duraderos formados por componentes no biodegradables. Las mezclas de almidón pueden ser procesadas mediante los métodos convencionales como soplado de film, extrusión, termoformado, inyección por moldeo, espumas y revestimiento por extrusión. Se han estudiado diversas mezclas de TPS con polímeros biodegradables, renovables y no renovables, pero la mayoría de las mezclas se realizan con poliésteres biodegradables. Las mezclas de almidón y poliéster pueden ser inmiscibles, por lo que se utilizan compatibilizantes para hacerlas miscibles. El almidón reduce el coste del poliéster mientras se mantienen las propiedades mecánicas e hidrófobas, colocando al poliéster en la superficie creando una estructura multicapa (Fuentes, 2015).

Según Barragán (2012) la degradación en condiciones aeróbicas del PLA puede variar considerablemente dependiendo de los aditivos de copoliéster biodegradables. Asegura que la degradación en el suelo de los materiales basados en PLA es lenta frente a otros polímeros como el PHA, siendo las principales causas la baja temperatura y la poca hidrólisis que sufre el



material durante la degradación. Además, el alto contenido de materia orgánica y una rica actividad microbiana también puede jugar un papel importante durante su degradación.

Por su parte, Huancahuire (2016) estudió la degradación de mezclas de bioplásticos PLA/ABS en compostaje a alta temperatura concluyendo una disminución de los pesos moleculares de hasta el 50% de su valor en 5 semanas.

3.2.4 Polímeros de almidón en la industria del envase

En el mercado de los polímeros basados en almidón, se encuentran tanto empresas consolidadas como emergentes, especialmente en Asia (Fuentes, 2015).

En América la NatureWorks LLC es una empresa estadounidense que produce bioplásticos a partir de ácido poliláctico (PLA) derivado de maíz. En Brasil una de las empresas líder en el sector, Braskem, fabrica los bioplásticos a partir de la caña de azúcar (Hellvig & Flores, 2021), en Italia, Novamont, basa su producción de bioplásticos utilizando el almidón de maíz (Fuentes, 2015), Mitsubishi Chemical con base Japón y con una amplia presencia por Asia, destaca por su uso mayoritario de residuos alimenticios y otras materias orgánicas (Limiñana, 2018). Estas y muchas otras compañías compiten por cientos y miles de patentes relacionadas con tecnología aplicable a materias primas ricas en almidón, mezclas, aditivos y la obtención de almidones termoplásticos (TPS).

El desarrollo de plásticos a base de almidón está en crecimiento constante, y las aplicaciones principales son aquellas que requieren biodegradabilidad del polímero. Además, se están desarrollando mezclas que utilizan almidón como material renovable con características resistentes a la biodegradación.

Algunas de los beneficios que ofrecen los plásticos basados en almidón son su fácil procesamiento con las técnicas y equipos actuales, el desarrollo de nuevas propiedades comerciales para mejorar la apariencia del producto de cara al consumidor. Por otra parte, presentan una barrera a los gases con la que se puede trabajar y resultan útiles en ciertas aplicaciones y una transparencia razonable en comparación con otros bioplásticos para los films de TPS y mezclas de almidón (Fuentes, 2015).

3.3 Vermicultura

Las lombrices son un indicio de fertilidad en los suelos, alcanzando en algunas culturas como las egipcias el estatus de animal sagrado, donde acabar con la vida de un ejemplar o desplazarlo de su hábitat natural se castigaba con la pena máxima. Milenios más tarde fueron bautizadas por Aristóteles como los intestinos de la tierra (Alonso, 2014). Esto se sostiene en la labor de fertilización y mejora de la estructura del suelo gracias a su desplazamiento, las lombrices contraen los músculos longitudinales y el cuerpo se dilata ampliando la apertura del pasillo que recorre. Durante la contracción de los músculos longitudinales adelgaza y se desliza gracias a un movimiento peristáltico en sentido inverso al desplazamiento de la lombriz, es decir las ondas del cuerpo de la lombriz se desplazan hacia atrás permitiendo el avance del anélido, emulando el funcionamiento de un intestino (Garzón et al., 2010).

Se alimentan de la materia orgánica disponible en el medio que habitan transformándolos en desechos de gran valor. Durante su ciclo de vida son capaces de enriquecer los suelos desplazando al interior la materia orgánica de la superficie del terreno, de manera simultánea, elevan minerales de capas profundas del suelo resultando así accesibles para las plantas (Gómez et al., 2011).

En el vermicompostaje se utilizan las lombrices para generar el humus de lombriz, acelerando el proceso de degradación, obteniendo un producto final de mejor calidad y una riqueza tanto microbiana como en nutrientes superior al logrado con otras opciones de compostado. De entre las 4400 especies de lombrices terrestres identificadas, las más idóneas para llevar a



cabo estas prácticas de gestión de residuos son las lombrices del género *Eisenia*, en particular la *Eisenia foetida* y la *Eisenia andrei* (Fernández, 2011), es conocida comúnmente como lombriz roja californiana a pesar de ser nativa de las regiones templadas euroasiáticas, fue trasladada posteriormente al continente americano durante los periodos de la colonización (Gómez et al., 2011).

En este contexto se puede afirmar que la *E. foetida* divide el espacio que habita en tres niveles en los que realiza todos sus ciclos vitales (Arango & Dávila 1991), en el estrato inferior es donde deposita sus excrementos y es lo que se conoce como humus, en la capa inmediatamente superior es el espacio en el que deposita los huevos, donde la materia orgánica está aun sin descomponer, y en la parte superior es donde se encuentra el alimento y únicamente sube con este propósito.

El vermicompostaje a pequeña escala proporciona un sistema de tratamiento descentralizado que disminuye notablemente la cantidad de residuos generados en cada núcleo familiar, revaloriza los desechos y los convierte en un material con potencial, que además permita autoabastecer la fertilización de jardines y huertos. Con estas prácticas se evita el movimiento masivo de residuos en costosas distancias para su posterior gestión en plantas centralizadas que aumenta la contaminación global con el añadido del gran impacto a varios niveles que suponen estas grandes instalaciones para el tratamiento de los desechos (Gómez et al., 2011). Por otra parte, involucra de manera directa a la ciudadanía en los beneficios del autocompostaje y en la gestión de residuos.

Las administraciones promueven mayoritariamente el uso de compost de jardín como una vía principal para gestionar los residuos sin embargo esto requiere de unas superficies y terrenos de los que una gran parte de la población no dispone. Por el contrario, el vermicompostaje se antoja viable en ciudades y viviendas verticales, y se entiende como una de las técnicas de reducción urbana más eficientes, disponible para el grueso de la población en los centros urbanos. Los vermicomposteros son sistemas cerrados con recogida de líquidos por lo que no es necesario que esté en contacto con la tierra, no produce malos olores y es un sistema limpio gracias a la rápida descomposición (Gómez et al., 2011). Muchos productos del mercado como materias primas y productos intermedios pueden acogerse ya a certificados de compostado doméstico (TÜV Austria 2019).

3.3.1 Lombriz roja californiana

En mayor medida la elección de estas especies, *Eisenia foetida* y la *Eisenia andrei*, se debe a su elevada capacidad de ingesta, son capaces de llegar a consumir cantidades similares al 90% de su propio peso al día (Gómez et al., 2011). La selección de estos anélidos estuvo orientada en una primera instancia en aumentar su capacidad de ingestión, sin embargo, los nulos resultados derivaron la mejora genética en prolongar su vida y aumentar su frecuencia de reproducción (Zuluaga 2010).

A esto se suma su facilidad para adaptarse a diversos climas, las condiciones óptimas de temperatura se encuentran entre los 15 y los 20°C sin embargo sobreviven con mínimas de 4 y máximas de 35°C. Huyen de las fuentes de calor y de la luz. Requieren suelos con una humedad relativamente alta siendo lo ideal entre 80-90% sufriendo con porcentajes inferiores al 60%. Estos anélidos respiran oxígeno a través de la piel por ello su subsistencia no es compatible con suelos saturados de agua. Los pH ideales se encuentran entre 5 y 9 (Fuentes, 1987).

La vida media de una lombriz roja californiana es de entre 2 y 5 años, aunque pueden llegar a alcanzar los 16 años de longevidad, en su edad adulta su tamaño es de 5 a 6 centímetros y su diámetro oscila entre 3 y 5 milímetros, es de color rojo oscuro y pesa aproximadamente un gramo (Fuentes, 1987). Tienen una alta tasa reproductiva, se estima que un individuo adulto puede reproducirse cada 7 días si las condiciones de temperatura y humedad son óptimas. Las



cápsulas se abren una vez cumplidos entre 14 y 21 días de incubación, de acuerdo a las variaciones de la temperatura a las que se encuentre, y de ellas emergen entre 2 y 20 crías (Fuentes, 1987). Las crías nacen de color blanco y con la edad de 5 o 6 días su color se torna el rojo oscuro definitivo, con 3 meses entran en la fase de madurez sexual y empieza a ser visible el clitelo (Arango & Dávila, 1991), un área glandular en forma de anillo característica de los anélidos, sin embargo, no se las considera adultas hasta los 7 meses (Fuentes, 1987).

La actividad sexual cae tanto durante los periodos fríos como al alcanzar temperaturas extremadamente altas, logrando su máxima eficiencia reproductiva a los 20°C en el medio que habitan (Fuentes, 1987).

En contraposición con otras especies de lombriz, que de manera frecuente se alejan del lugar donde se han instalado originalmente, la lombriz roja, si las condiciones ambientales no son adversas no siente esa necesidad de trasladarse (Arango & Dávila, 1991). Este es otro de los motivos por la que su uso en vermicultura es realmente práctico.

3.3.2 Explotación de la lombriz

En la lombricultura se diferencian dos tendencias según su objetivo principal, la explotación productiva y la explotación ecológica (Fuentes, 1987). En la explotación productiva, el producto obtenido está directamente relacionado con la lombriz, se trate tanto de su humus como de su carne. El humus originario de estas explotaciones se caracteriza por ser de una calidad superior, variando según del tipo de alimento que se proporciona como materia orgánica, habitualmente estiércoles de diferentes especies ganaderas, además de su riqueza nutritiva, este humus contiene una flora bacteriana muy elevada y debido a ello cuenta con una gran variedad de enzimas que pueden actuar como agente corrector en los suelos. Se estima que la carne de lombriz posee entre el 45 y 65% de proteína, esto ha creado un mercado para la carne de lombriz, se utiliza como complemento alimenticio en animales, como cebo en actividades pesqueras e incluso para consumo humano en forma de harina (Medina et al., 2010). Se trata de un recurso no convencional que sin embargo es capaz de aportar una cantidad de nutrientes en la alimentación tanto humana como animal.

Estas lombrices no contraen enfermedades sin embargo puedes ser envenenadas por malas prácticas. En estiércoles en los que la proteína no está lo suficientemente fermentada se produce una acidificación del medio, acompañado de la emisión de gases nocivos, ambos sucesos amenazan la supervivencia de las poblaciones de lombrices (Fuentes, 1987).

En el otro modelo, la explotación ecológica, el objetivo es la gestión y transformación de las sustancias orgánicas y residuales, aplicable tanto a residuos industriales como a los poblacionales. El humus obtenido en este caso no es el objetivo prioritario, y por tanto la calidad de este es inferior, contiene una flora bacteriana menos enriquecida, puede llegar a albergar una cantidad de metales pesados más elevada, y su aplicación en cultivos para la alimentación debe ser controlada y estudiada, priorizando su uso en, floricultura, jardinería o cultivos industriales cuyo fin no sea servir de alimento ni a la población ni a los animales (Fuentes, 1987).

Se han realizado ensayos en los que poblaciones de lombrices han sido expuestas a suelos con escasa materia orgánica y contaminados por metales pesados como el Cd, Cu, Pb y Zn, obteniendo como resultado un índice de supervivencia escaso y concluyendo que las altas concentraciones efectivamente tienen un impacto negativo en el ciclo de las lombrices (Ojeda 2019). Definitivamente las lombrices son organismos que bioacumulan metales pesados a lo largo de su ciclo. A pesar de esto, en los suelos donde se depositan los residuos de muchas industrias mineras como la del oro, persiste la población natural de *Eisenia foetida*, siendo útiles para biorremediar y elevar la calidad de los suelos siempre que estos cuenten con una cantidad de materia orgánica y humedad que les facilite la supervivencia.



Barragán (2012) indica que *E. foetida* parece no ser un individuo adecuado para evaluar la ecotoxicidad de biopolímeros debido a que los plásticos biodegradables, y sus productos de degradación, fueron fácilmente digeribles para las lombrices de tierra.

3.3.3 Métodos y estructuras

3.3.3.1 Vermicompost en pilas

Se le asignan el nombre de lecho, a cada módulo individual utilizado en la producción de lombriz roja, estos pueden estar situados en pilas al igual que el compostaje. Este método resulta sencillo de controlar y barato, a la hora de ponerlo en marcha apilamos el sustrato formando pilas sobre una superficie que bien puede ser el suelo directamente, hormigón o una capa de plástico impermeable. Una vez que la materia orgánica que utilizaremos como lecho ha madurado y haya sufrido procesos de fermentación (los picos de temperatura y la emisión de ácidos durante estas fases amenazan la vida de las lombrices), se aporta la población de lombrices y se cubren las necesidades básicas de alimentación, porcentaje de humedad y temperatura. De igual forma y en pro de evitar procesos de fermentación el alimento que se proporciona a las pilas es preferible que haya sufrido un proceso de maduración incompleto (Fuentes, 1987).

Este modelo de pilas suele estar expuesto al sol e inclemencias del tiempo, que pueden afectar directamente a la calidad de vida de las lombrices, para subsanar o reducir estos efectos adversos lo apropiado es aportar un volumen de lecho, evitando una rápida evaporación, insolación o encharcamientos causados por las lluvias y caída de las temperaturas. Las cubiertas aislantes de plástico no son recomendables en estos casos ya que favorecen el encharcamiento y las condiciones de degradación anaeróbicas lo que supondría la muerte de las lombrices, los tejidos porosos o llevar a cabo las pilas bajo un techo serían siempre opciones más viables (Alonso, 2014).

3.3.3.2 Vermicompost de camas

Este sería un sistema más común, la distribución en este caso de la materia orgánica que funcionara como sustrato se distribuye en un espacio delimitado que se le da el nombre de cama, se distribuyen en hileras de entre 1 y 2,5 metros de ancho y longitudes de hasta 500 metros, en función de la producción diaria que sea necesaria y de las características de la superficie de la que dispongamos.

Las camas pueden estar situadas tanto en el propio suelo como en superficies de hormigón, utilizar un contenedor, o diversos materiales como ladrillo madera etc. Los lechos suelen alcanzar una altura de 50 cm sobre las que se le añade el alimento en capas delgadas con el fin de evitar elevar las temperaturas, de hecho, colocar lechos de alturas inferiores como 20 o 30 cm acelera la degradación de la materia orgánica (Alonso, 2014). Sin embargo, el mantenimiento es más exigente, por una parte, se corre un mayor riesgo de desecación y por otra se reduce el sustrato en el que los anélidos pueden refugiarse en caso de producirse fermentación en las capas superiores.

Esta infraestructura permite un manejo más cómodo del sistema, la materia orgánica está contenida en el espacio que se le ha asignado, facilita las aportaciones de agua y alimento. Este sistema permite la mecanización del sistema de riego automatizando las aportaciones de agua y manteniendo una uniformidad a lo largo de las camas, el mercado ofrece gran variedad de opciones desde un sistema de aspersores hasta maquinaria especializada y autopropulsada. Las labores de aportación del alimento también tienen margen de mecanización, disponiendo un remolque que pueda desplazarse por encima del lecho que a través de una apertura inferior distribuya de manera uniforme el sustento de las lombrices. Para ello es importante un correcto dimensionado inicial de las camas.



Una evolución de estas, son las camas situadas en altura sobre una estructura o soporte. Esta variación trae consigo una serie de facilidades a la hora de trabajar en ellas: un mejor drenaje y mayor comodidad en los procesos de recolección del lecho, además de una mejor ventilación favoreciendo las condiciones aeróbicas. En contraposición se debe costear una estructura que pueda soportar un peso considerable teniendo en cuenta el porcentaje de humedad al que debes mantener el sustrato y el alimento que aportas, las temperaturas pueden caer demasiado en algunos periodos del año debido al poco aislamiento que presentan, algunas lombrices pueden caer del lecho y la cantidad de material que podemos gestionar está limitada por la estructura con la que contemos. Esta opción es apropiada para climas cálidos (Alonso, 2014).

3.3.3.3 Sistema de bandejas

Se basa en un sistema a pequeña escala en la que utilizamos bandejas a modo de lecho, habitualmente se utilizan unos 30 cm de ancho y 50 cm de largo. Estos pequeños lechos facilitan el manejo y la manipulación, ocupan un espacio reducido en las instalaciones y además se pueden mover en función de las condiciones climáticas. En este tipo de recipientes es habitual realizar una técnica denominada 21 días, recibe este nombre ya que si se hace un buen manejo el primer día se produce la reproducción y el día 21 se recogen las puestas y son llevadas a cámaras de incubación, se separan las lombrices reproductoras y se llevan de vuelta a bandejas para iniciar de nuevo el ciclo (Alonso, 2014).

3.3.3.4 Sistemas de flujo moderno

Estos sistemas están compuestos por camas elevadas que permiten el intercambio de gases y el paso de la cosecha a través de una malla colocada en la parte inferior mientras que el aporte de líquidos y comida se realiza por encima mediante sistemas automatizados (Alonso, 2014). Este tipo de sistemas supone una fuerte inversión inicial, sin embargo, tienen la capacidad de gestionar una gran cantidad de materia orgánica. Se aceleran los procesos y se gestiona un mayor volumen de material con un número reducido de trabajadores.

3.3.4 Métodos de cosecha

A la hora tanto de la obtención del humus como de aislar la población de lombrices se pueden aplicar una variedad de técnicas aplicables en múltiples escenarios.

El método de iluminación es uno de los más básicos y rudimentarios, consiste en exponer las lombrices a una fuerte luminosidad, aprovechando días soleados o en su defecto utilizando focos de gran potencia. Con este método podemos ir retirando capas superiores de materia orgánica de manera progresiva mientras los anélidos continuamente se desplazan a las capas inferiores del sustrato para resguardarse de la luminosidad. Una vez realizado este proceso reiteradas veces tendremos toda la población de lombrices en una capa de pequeña altura de sustrato.

De forma similar, en provecho de una escasa luminosidad se puede retrasar el suministro del nuevo alimento, con lo cual, las lombrices agotan todo el alimento existente en los lechos y posteriormente acudirán a la superficie al realizarse el aporte de nuevo alimento. Retirando la capa superficial que estará repleta de lombrices y repitiendo el proceso una o dos veces más, se consigue retirar la mayor parte de las lombrices (Fuentes, 1987).

Un método algo más elaborado es el de los filtros de arpillera, se aplican dos técnicas, una aprovechando la luz y otra en total oscuridad. En la primera se prepara un nuevo lecho con comida y se coloca un saco de arpillera mojado cubriendo el contenedor, se coloca una capa del lecho viejo sobre el saco de arpillera y se expone a una fuerte radiación solar, de esta forma todas las lombrices se trasladan al nuevo lecho y puedes utilizar el humus libre de



lombrices (Alonso, 2014). Este proceso se puede agilizar privando de alimento durante la semana previa, predisponiendo a los anélidos a realizar el traslado.

La segunda opción se aplica en mayor medida en explotaciones industriales (Alonso, 2014). Consiste en colocar una tela de malla ancha en la superficie del lecho, y a continuación inundar el sustrato, de esta manera las lombrices acudirán a la superficie para respirar, las condiciones en la superficie no suponen una amenaza para su vida siempre que haya oscuridad. Es importante que la malla de la tela sea lo suficientemente ancha como para que pueda pasar a través de ella un adulto de lombriz con clitelo, y que estas no se queden pegadas para facilitar la retirada y recogida de las mismas.

El método más industrial es el cribado o agitación, consiste en una plancha con una amplia superficie sobre la que se coloca una caja, esta caja vibra con una gran intensidad, de forma que al colocar el lecho y las lombrices en ella el material se filtre a través de una malla inferior sin embargo las lombrices permanezcan botando sin posibilidad de aferrarse al sustrato. Esta técnica presenta dos principales inconvenientes. En primer lugar, la fuerte inversión que supone una infraestructura de este tipo, al alcance únicamente de una explotación a gran escala. Por otra parte, este sistema es considerablemente invasivo, las lombrices sufren lesiones sobre el cribado y muchas mueren al ser devueltas al lecho, por lo tanto, no es una buena opción si el objetivo es continuar contando con ellas (Alonso, 2014). Por otra parte, en explotaciones industriales esto permite clasificar cientos de kilogramos de lombrices en periodos de una hora.



4 Material y métodos

4.1 Material

4.1.1 Tipo de lecho

A la hora de escoger el tipo de estructuras con las que íbamos a contar para realizar este ensayo, se determinó que el uso de bandejas era lo más práctico teniendo en cuenta que íbamos a formar pequeños grupos de lombrices y una variedad de situaciones de las que haríamos repeticiones. Contando con esta información, se exploraron las opciones que nos ofrecía el mercado, siendo una de las prioridades encontrar un recipiente con una altura suficiente para el buen desarrollo del ciclo vital de las lombrices y que contara con una tapa para protegerlas de la luz solar.

Se adquirieron 12 unidades de cajas de propileno transparente con tapa de la casa comercial Rocasa (Figura 1). Las medidas de esta son de 39,5 cm de largo 34 de ancho 18,5cm de altura. En la parte superior de los laterales cortos presenta unas cavidades para la ventilación.



Figura 1. Bandeja propileno con tapa.

Fuente. Catálogo comercial de Rocasa, 2023.

Estas cajas no contaban con orificios en la parte inferior y para poder drenar el agua del sistema, sin embargo, su diseño contaba con pendiente para las esquinas por ello se realizaron 4 perforaciones en las partes más profundas de cada bandeja con un taladro (Figura 2).



Figura 2. Perforación de las bandejas.

Fuente. Imagen tomada durante el ensayo, 2022.

Una vez completado este proceso se procedió a opacar las paredes exteriores de las bandejas y sus correspondientes tapas para proteger del sol las lombrices, para ello utilizamos 3 unidades de Spray MTN 94 R9011 Negro 400 ml con resistencia ultravioleta y elevada opacidad (Figura 3).



Figura 3. Spray MTN 94 R9011 Negro 400 ml.

Fuente. Catálogo comercial Super Papelería, 2022.

Esta labor se llevó a cabo en uno de los terrenos de la escuela cercano al laboratorio en el que se realizó el ensayo. Para evitar contaminar el terreno con la pintura se colocaron cartones en



el suelo (Figura 4) recogidos del contenedor de papel y cartón de la propia escuela previa aplicación del spray. Por último, estas fueron rotuladas con una S (SPAR), C (Cofarte) o T (testigo) según el tipo de bolsa que contenían y numeradas del 1 al 4 cada una de las repeticiones.



Figura 4. Pintado con spray de las bandejas.

Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.

4.1.2 Sustrato

El sustrato escogido en este caso ha sido la fibra de coco, teniendo en cuenta que se utilizarían unos 11 cm de altura de sustrato en cada lecho esto nos genera la necesidad de contar con aproximadamente 15 mil centímetros cúbicos de fibra de coco. La fibra de coco se comercializa compactada en ladrillos, para emplearlos desmenuzados se deben hinchar con agua. Para realizar esta tarea contamos con un contenedor de polietileno de 500 litros en el interior de un invernadero anexo a la escuela (Figura 5). A la hora de aportar el sustrato la fibra de coco, este tiene que contar con una cantidad de agua que forma que cuando ejerzas presión a la cantidad de fibra que te cabe en la palma de la mano caigan unas gotas, para alcanzar ese punto se



redujo por gravedad el excedente de agua con la ayuda de una cernidera y una carretilla (Figura 6).



Figura 5. Hidratación de la fibra de coco.
Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.



Figura 6.Reducción de humedad en la fibra de coco.
Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.

4.1.3 Población inicial

En cada lecho se aportó una cantidad inicial de 100 lombrices adultas de características similares (Figura 7), estas fueron recogidas tanto del vermicompostero del Seminario Permanente de Agricultura Ecológica como de su homólogo ubicado en la entrada de la Sección de Ingeniería Agraria y del Medio Rural. En total unos 1.200 ejemplares fueron empleados en el ensayo. El conteo y selección se realizó de forma manual formando grupos de 50 individuos (Figura 8).



Figura 7. Selección de lombrices adultas.
Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.



Figura 8. Grupos de lombrices adultas sobre la fibra.
Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.



4.1.4 Bolsas de bioplástico

En este ensayo se experimentó con dos tipos de bolsas de plástico y un testigo. En cada lecho se aportarán 5,3 gramos de bolsa de bioplástico. Y de cada tipo de ensayo se realizarán 4 repeticiones expuestos a idénticos ambientes. Para facilitar la posterior retirada de los restos de bolsa y poder valorar la cantidad de materia que se ha descompuesto, las bolsas se introdujeron en unos sacos de malla roja de 32x44cm para frutas y verduras (Figura 9. y Figura 11).



Figura 9. Saco de malla roja de fruta y verduras.
Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.

- Bioplástico S: estas bolsas pertenecen a una promoción de la cadena de supermercados SPAR a través de una campaña de sostenibilidad emitida en el año 2019 y que ha sido relanzado en años posteriores. Estas bolsas pesan entorno a unos 10 gramos cada una de ellas, por lo que se recortaron prácticamente a la mitad de modo que cada ensayo recibiera un segmento de bolsa de 5,3 gramos (Figura 10). Estas bolsas están compuestas en su totalidad por polímeros PBAT (Polibutilén adipato-co-tereftalato) (Álvarez et al., 2023).

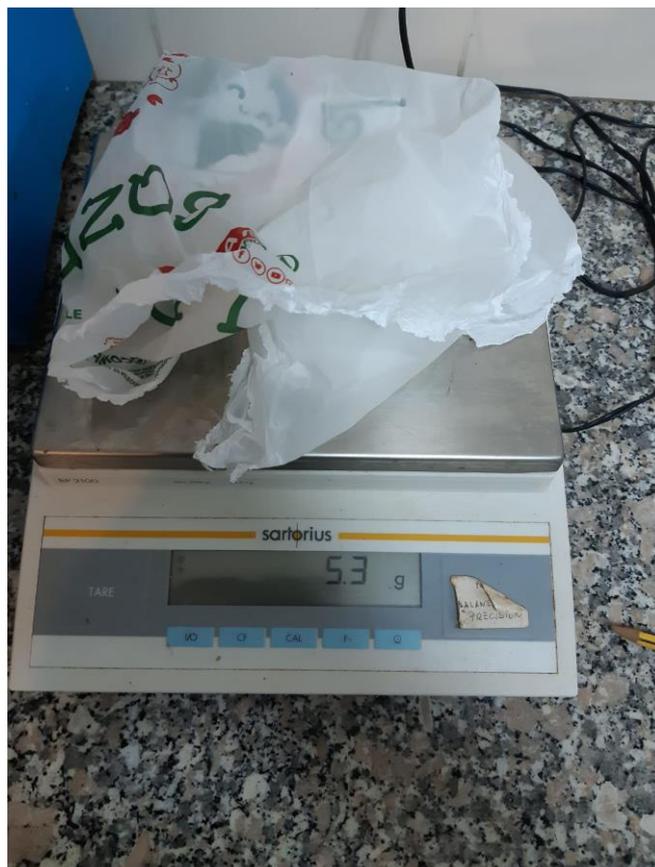


Figura 10. Pesaje de las bolsas.

Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.

- Bioplástico C: bolsas comercializadas por Cofarte, una cooperativa farmacéutica con sede en España. Cada bolsa pesa 5,3 gramos y se colocaron enteras. Están compuestas por dos tipos de polímeros de bioplásticos, PLA y PBAT. Expresado en % molar, están formadas por $52,46 \pm 0,64\%$ de PBAT y un $47,54 \pm 0,64\%$ de PLA. (Álvarez et al., 2023).
- El tercer grupo T es el testigo, en estas repeticiones los lechos carecen de bolsa de bioplástico, sin embargo, se ha añadido la malla para que su presencia o ausencia no puedan alterar los resultados del estudio.



Figura 11. Bolsas con malla en sus respectivas bandejas.

Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.

4.1.5 Alimento

Las lombrices de este ensayo han sido alimentadas únicamente por borras de café, se escogió este tipo de materia orgánica debido a su facilidad para ubicar de manera uniforme la misma cantidad de alimento a todos los lechos (Figura 12). Estas fueron recogidas en la Cafetería La Troya en el municipio de San Cristóbal de La Laguna durante el periodo aproximado de tres semanas previo a la puesta en marcha del proyecto con el objetivo de acumular la cantidad inicial necesaria. En cada lecho se aportan unos 3 cm de altura de borras de café (unos 4 mil centímetros cúbicos) encima del sustrato y de las mallas rojas en cuyo interior se encuentran las bolas de bioplástico (Figura 13).

No fue necesario realizar más aportes de alimento durante el transcurso del ensayo.



Figura 12. Aporte de borras de café.
Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.



Figura 13. Aporte de café.

Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.

4.1.6 Riegos

El objetivo de los riegos no es otro que mantener un porcentaje de humedad apropiado para el buen desarrollo de las lombrices. Este aporte de agua se realizó con una botella de agua perforada por su parte inferior creando una serie de orificios que repartirían la salida del agua a modo de regador (Figura 14), evitando así el impacto del agua con las borras café y generando irregularidades. Además, aprovechando el relieve del recipiente con un rotulador se marcaron medidas para realizar un aporte común a todos los lechos. Esta labor se llevó a cabo en la puesta en marcha del sistema y de manera regular, en función de la climatología y de cómo avanzara el grado de humedad de la fibra de coco y del alimento se repetía la tarea. La fibra de coco es un gran retenedor de agua por lo que los riegos no requerirán demasiada frecuencia, en muchas ocasiones se aportaron pequeñas cantidades de agua únicamente para humedecer el alimento, pues era el primero en mostrar síntomas de sequedad. La presencia de la malla entre la fibra y el café permite ojear por los laterales el grado de humedad del sustrato sin alterar el orden de las capas ni interrumpir la actividad de las lombrices. Con el paso de las semanas se ajustó de manera más precisa la cantidad de agua necesaria, pues los excesos resultaban en unos drenajes de difícil gestión.



Figura 14. Sistema de riego.

Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.

4.2 Metodología

4.2.1 Ubicación del ensayo

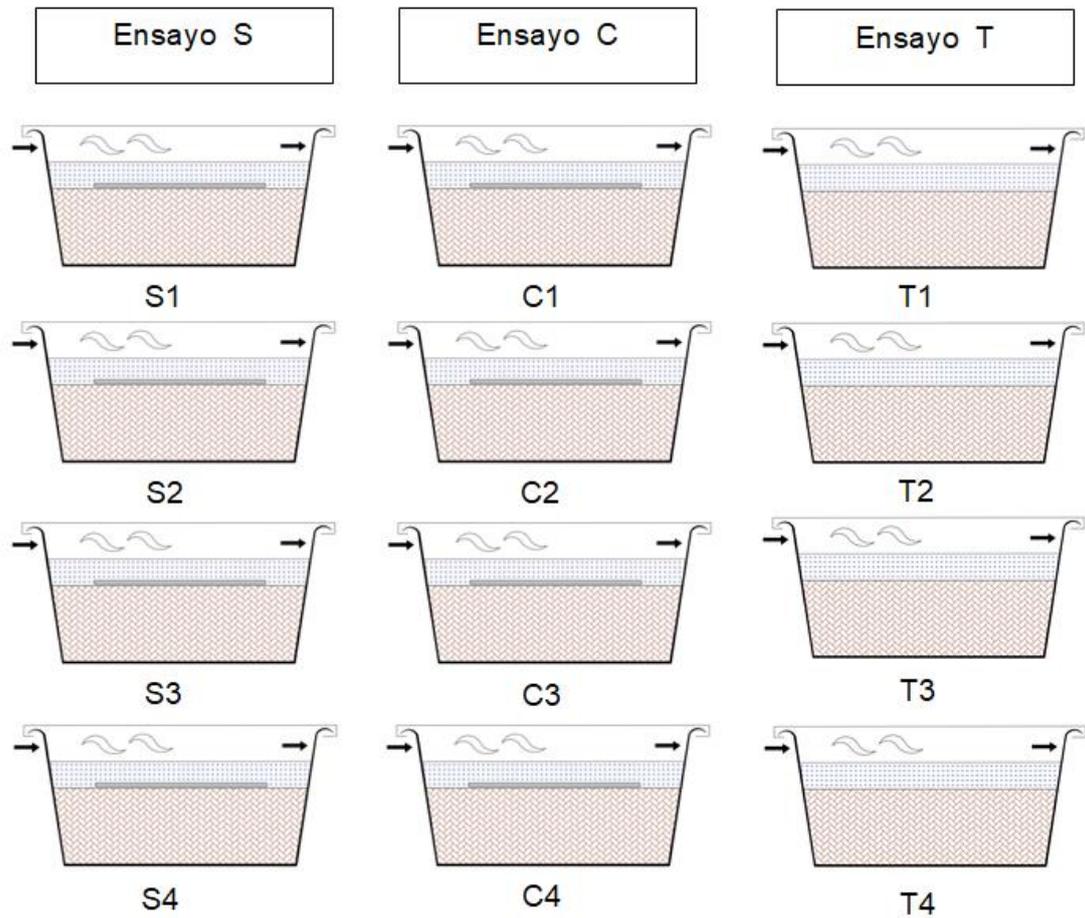
El estudio se llevó a cabo en laboratorio de producción vegetal en la planta del sótano de la Sección de Ingeniería Agrícola de la Universidad de La Laguna. Esta se sitúa en el número 2 de la carretera general de Geneto, en el ámbito municipal de San Cristóbal de La Laguna en la provincia de Santa de Cruz de Tenerife. La situación del laboratorio dentro de la escuela resulto ser un espacio idóneo, caracterizándose por ser una pequeña sala fría protegida de los picos de temperatura teniendo en cuenta que el ensayo se realizó entre los meses de marzo y julio.

4.2.2 Diseño experimental

Cada uno de los 12 lechos (Figura 15) cuenta con 11 cm de altura de sustrato, una malla de fruta que contiene una bolsa de bioplástico de 5,3 gramos, exceptuando los ensayos testigo en los que la malla está vacía, una población de 100 lombrices adultas, además de 3 cm de altura de borras de café en la capa más alta a modo de alimento, y nos restan 4,5 cm de altura hasta la cubierta destinados a la ventilación para completar los 18,5 cm de altura de cada bandeja (Figura 16).



Esquema del proyecto



S: Bolsa tipo SPAR. C: Bolsa tipo Cofarte. T: Ensayo testigo sin bolsa.

Figura 15. Esquema del proyecto.
Fuente: Imagen elaborada durante el ensayo, 2022.

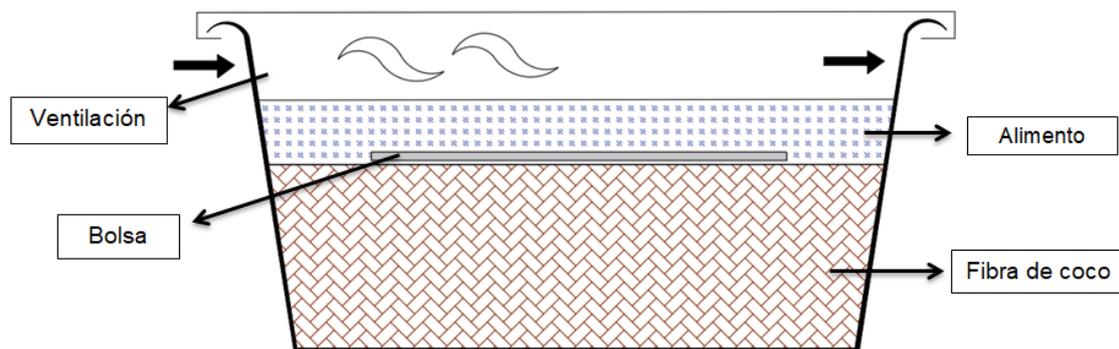


Figura 16. Esquema del proyecto.

Fuente: Imagen elaborada durante el ensayo, 2022.

El ensayo tuvo una duración de 120 días, desde el comienzo hasta la retirada de las bolsas, durante este periodo la única labor de mantenimiento que fue necesaria consistió en mantener a niveles óptimos de humedad el sustrato y el alimento.

4.2.3 Finalización del ensayo

4.2.3.1 Recogida de bolsas

El levantamiento del proyecto se inició retirando los remanentes de las bolsas de bioplástico, este delicado proceso no hubiera sido realizado con éxito de no haber incluido la malla que facilitó en gran medida que los plásticos permanecieron unidos y no se dividieron en cientos de segmentos entre la fibra de coco. Una vez extraídos los bioplásticos de las mallas, se retiraron los restos de sustrato y lombrices enredadas entre ellas, posteriormente y con la ayuda de un pequeño tamiz (Figura 17) se realizando inmersiones en agua donde los residuos menores de materia orgánica se disiparon.

Posteriormente los residuos de las bolsas fueron llevadas a una estufa contenidas en rudimentarios recipientes elaborados con papel de aluminio (Figura 18). El objetivo de esto no es otro que reducir el contenido de agua de los restos de bioplástico para poder realizar pesadas y poder determinar los gramos de residuos recogidos. Al retirar de la estufa el material se pesaba y se devolvía a la fuente de calor un lapso de tiempo, este proceso se realizó en repetidas ocasiones hasta alcanzar el punto en el que el peso de las muestras dejó de descender, y dar con el resultado final.



Figura 17.Limpieza de bolsa.

Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.



Figura 18. Secado en estufa.

Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.

4.2.3.2 Análisis del espectro

Para cada uno de los dos tipos de bolsas (SPAR y Cofarte) se tomaron muestras de 5 mg de cada una de las 4 bolsas tras haber sido expuestas a las condiciones estudiadas. Cada una de estas muestras, así como muestras de las bolsas de partida, se disolvieron en 0,5 ml de cloroformo deuterado, un disolvente típicamente empleado en la disolución de muestras para estudios de resonancia magnética en disolución. Posteriormente, se analizaron por resonancia magnética nuclear de protón (^1H RMN) en el Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI) obteniéndose, para cada una, una imagen (espectro) que indica los distintos protones presentes en los biopolímeros que constituyen las bolsas.

4.2.3.3 Población final

El conteo de la población final de lombrices se llevó a cabo durante los 20 días posteriores a la retirada y pesado de los bioplásticos. Para evitar que este periodo pudiera interferir en la obtención de datos, el levantamiento de las bandejas se realizó de manera ordenada, de forma que en la se llevaron a cabo diversas técnicas con escaso éxito con el objetivo de tratar de agrupar las poblaciones de lombrices y facilitar el proceso, el más destacado de estos consistió



en reducir la cantidad de humedad deteniendo las aportaciones de agua y utilizar las mallas para introducir restos de verduras y frutas ricas en líquidos a modo de trampa para atraer a los anélidos (Figura 19). La limitada eficacia de esto se debió en conjunto a la insuficiente pérdida de líquidos por parte del sustrato como a la dificultad que presentaba separar a las lombrices de los residuos.

Ante esto se procede a realizar un recuento de manera rudimentaria examinando todo el material orgánico de manera manual (Figura 20). Clasificando las lombrices entre jóvenes y adultas, englobando dentro de adultas a todas aquellas que han alcanzado la madurez sexual (que presenten clitelo) (Figura 21).



Figura 19. Retirada de lombrices atrapadas en la malla.
Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022

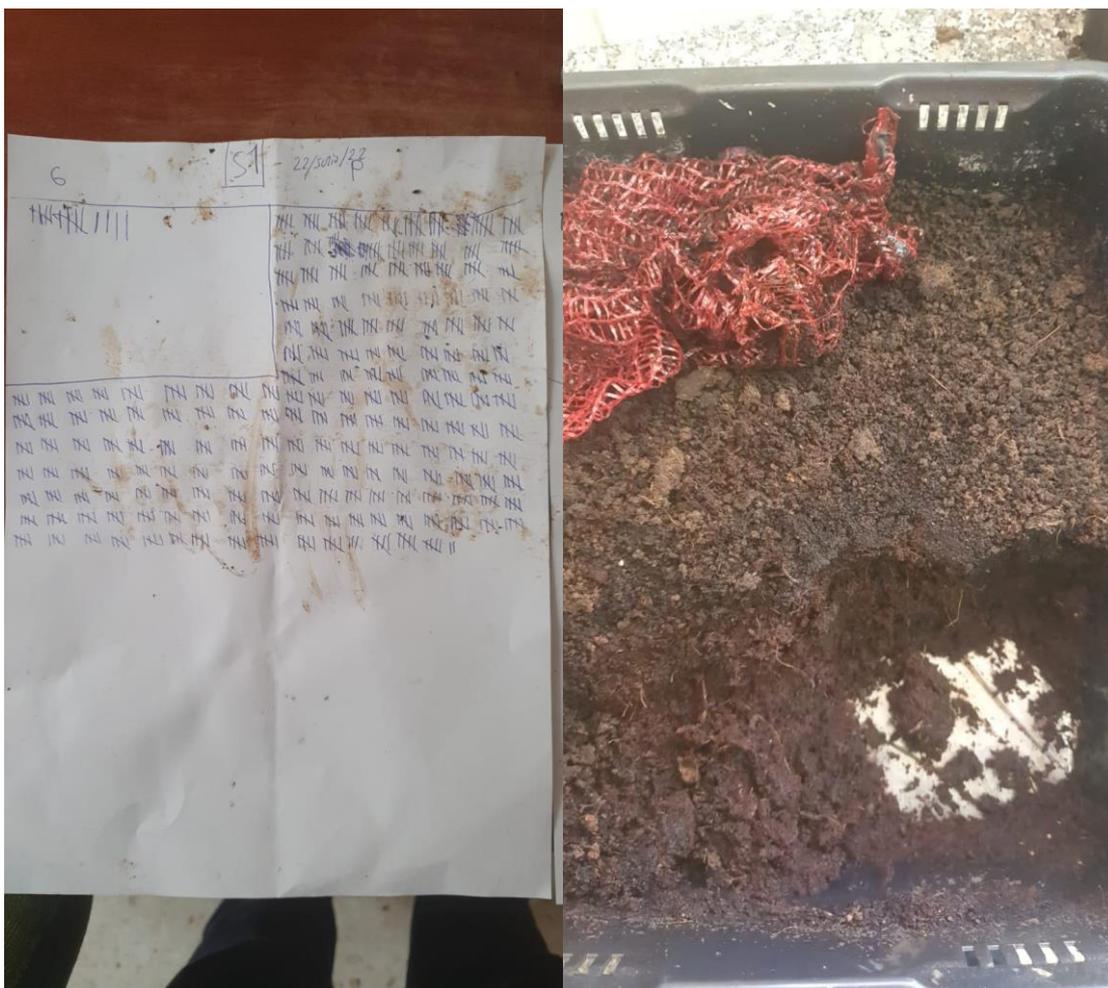


Figura 20. Recuento de lombrices.
Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.



Figura 21. Diversidad de lombrices en la fibra de coco.
Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022



4.3 Accidentes y observaciones

En el proceso las impresiones del desarrollo de las lombrices siempre fueron positivas, esto se refleja en la abundante cantidad de puestas encontradas durante el conteo (Figura 22).



Figura 22. Puestas de cápsulas de las lombrices.

Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022

Durante la tercera semana hicieron aparición los primeros hongos en la superficie de las borras de café (Figura 23), debido probablemente a una ventilación insuficiente el vapor de agua se condensaba en la cara interna de la cubierta de los lechos. Su presencia fue variando y llegando a desaparecer a medida que las borras de café fueron madurando. Además, se hizo presente durante un breve lapso de tiempo abundante cantidad de larvas de *Drosophila melanogaster* (Figura 24), conocida comúnmente como mosca de la fruta, no obstante, no hubo problemas de mosquitos durante ningún periodo en el lavatorio.



Figura 23. Hongos en las borras de café.
Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022



Figura 24. Larvas de *Drosophila melanogaster*.
Fuente: Imagen tomada durante el ensayo, 2022.



4.4 Análisis estadístico

A la hora de proceder con el análisis de los datos obtenidos, se realizó en primera instancia un análisis descriptivo, de manera posterior, la prueba de Levene con el fin de comprobar si los valores se pueden someter al método ANOVA, el cual nos confirmara la presencia o ausencia de diferencias significativas en los resultados del ensayo. Estos procesos fueron realizados mediante el editor de datos IBM SPSS Statistic 25.



5 Resultados y discusión

5.1 Bolsas de bioplástico

Teniendo en cuenta que el peso inicial de cada muestra era de 5,3 gramos, se recoge el peso final y su degradación tanto de las muestras S (SPAR) (Tabla 1) como de las muestras C (Cofarte) (Tabla 2).

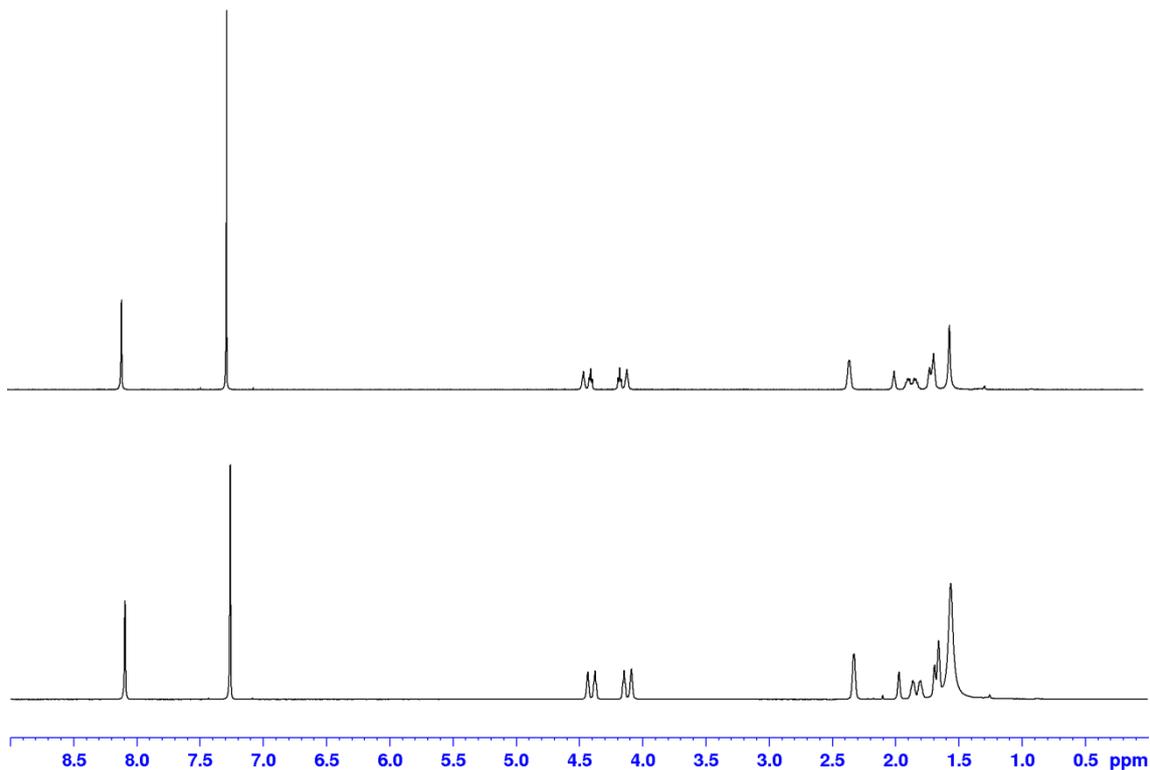
Muestras S	Peso final	Degradado	%
S1	4,3	1	18,87
S2	4,5	0,8	15,09
S3	4,3	1	18,87
S4	4,5	0,8	15,09

Tabla 1.Evolución muestra S.

Muestras C	Peso final	Degradado	%
C1	4,4	0,9	16,98
C2	4,5	0,8	15,09
C3	4,4	0,9	16,98
C4	4,3	1	18,87

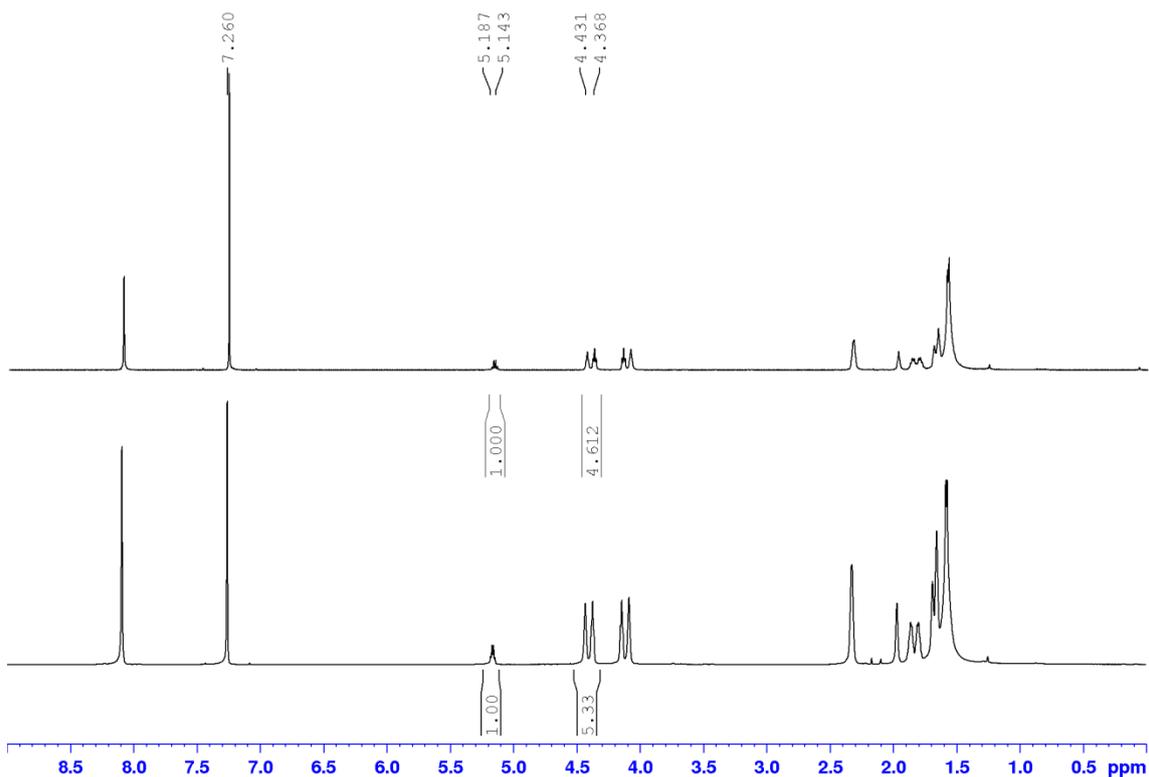
Tabla 2.Evolución muestra C.

En cuanto a la composición de las bolsas, en el primer caso (Gráfica 1), se muestran los espectros de la bolsa de SPAR antes (superior) y después (inferior) del periodo de exposición a las lombrices. Las señales que aparecen en ambos espectros son idénticas, lo que indica que no ha habido cambios a nivel molecular en el biopolímero que constituye la bolsa SPAR (PBAT).



Gráfica 1. Espectro de la bolsa SPAR.

Por su parte, en el segundo caso (Gráfica 2), se representa los espectros de la bolsa de Cofarte antes (superior) y después (inferior) del ensayo. Nuevamente se observa la ausencia de productos de degradación, mostrando ambos espectros únicamente una mezcla de los dos polímeros constituyentes del bioplásticos: PLA y PBAT, con señales características entre 5.143-5.187 ppm y 4.368-4.431 ppm, respectivamente. Sin embargo, en esta ocasión sí aparecen diferencias entre ambos espectros: la relación de señales entre PBAT y PLA era inicialmente 4.612 a 1, mientras que tras el ensayo es de 5.330 a 1. Esto quiere decir que, tras el periodo de ensayo, el bioplástico ha experimentado un empobrecimiento en PLA, o, dicho de otro modo, el PLA es más degradable en las condiciones estudiadas y por eso hay menos cantidad en la muestra final.



Gráfica 2. Espectro de la bolsa Cofarte.

Expresado en % molar, las bolsas de Cofarte tienen una composición inicial de PBAT de $52.46 \pm 0.64\%$ y de PLA de $47.54 \pm 0.64\%$. Tras el proceso de degradación en presencia de las lombrices, la composición final es de $57.28 \pm 0.31\%$ de PBAT y $42.72 \pm 0.31\%$ de PLA, por lo que se concluye que hay una pérdida del 10.12% de PLA, lo cual es estadísticamente significativa con una significancia de 0.036 (prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes). Según Álvarez-Méndez et al. (2022), cuando las mismas bolsas de Cofarte fueron cortadas en fragmentos de unos 2 cm^2 y sometidas a un proceso de digestión anaeróbica durante 52 días a $37 \text{ }^\circ\text{C}$, se obtuvo una composición final de $63.22 \pm 0.28\%$ de PBAT y de $36.78 \pm 0.28\%$ de PLA (22.62% de pérdida de PLA). Por tanto, la degradación del PLA es mayor bajo condiciones de digestión anaeróbica que en el presente ensayo con lombrices.

De acuerdo con Barragán (2012), las condiciones ensayadas de humedad podrían haber propiciado procesos de degradación por hidrólisis, sin embargo, las temperaturas en las que la lombriz se desarrolla no se encuentran entre los rangos de valor óptimos para acelerar estos procesos (Huancahuire, 2016).

5.2 Lombrices

La población de lombrices se ha clasificado en jóvenes y adultas, los resultados se muestran en la Tabla 3 para las repeticiones con bolsa SPAR, la Tabla 4 para las repeticiones con bolsa Cofarte, y por último la población testigo que no ha sufrido la exposición a ningún bioplástico Tabla 5.



SPAR	ADULTAS	JOVENES
S1	28	1.574
S2	55	1.966
S3	52	2.065
S4	89	2.442

Tabla 3. Población de lombrices en muestra S.

COFARTE	ADULTAS	JOVENES
C1	83	1.207
C2	93	917
C3	83	1.511
C4	89	2.110

Tabla 4. Población de lombrices en muestra C.

TESTIGO	ADULTAS	JOVENES
T1	65	1.959
T2	87	1.577
T3	97	1.945
T4	77	1.143

Tabla 5. Población de lombrices en muestra T.

Según Fuentes (1987), en presencia de condiciones óptimas, la *E.foetida* puede reproducirse cada 7 días, su periodo de incubación se prolonga entre 2 y 3 semanas, y alcanzan la edad adulta a los 7 meses de vida. Sin embargo, según Arango & Dávila (1991), a los 3 meses alcanzan la madurez sexual y se desarrolla el clitelo. Teniendo constancia que el ensayo se prolongó 120 días, y teniendo en cuenta el estrés que sufrieron durante la selección y su incorporación a un nuevo hábitat, las lombrices contabilizadas como adultas en el censo son las supervivientes de las 100 que originalmente se introdujeron en el momento inicial.

5.3 Análisis estadístico

A la hora de analizar los resultados, se presenta en primer lugar un análisis descriptivo (Tabla 6 y Tabla 7) donde se calculan valores útiles a la hora de visualizar el ensayo.



Descriptivos

		N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error
Degradación bolsas	Spar	4	,9000	,11547	,05774
	Cofarte	4	,9000	,08165	,04082
	Testigo	0	.	.	.
	Total	8	,9000	,09258	,03273
Lombrices adultas	Spar	4	56,0000	25,09980	12,54990
	Cofarte	4	87,0000	4,89898	2,44949
	Testigo	4	81,5000	13,69915	6,84957
	Total	12	74,8333	20,70061	5,97575
Lombrices jóvenes	Spar	4	2011,7500	356,68322	178,34161
	Cofarte	4	1436,2500	510,45821	255,22910
	Testigo	4	1656,0000	385,02814	192,51407
	Total	12	1701,3333	455,55587	131,50765

Tabla 6. Análisis descriptivo.

Descriptivos

		95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
		Límite inferior	Límite superior		
Degradación bolsas	Spar	,7163	1,0837	,80	1,00
	Cofarte	,7701	1,0299	,80	1,00
	Testigo
	Total	,8226	,9774	,80	1,00
Lombrices adultas	Spar	16,0606	95,9394	28,00	89,00
	Cofarte	79,2046	94,7954	83,00	93,00
	Testigo	59,7016	103,2984	65,00	97,00
	Total	61,6808	87,9859	28,00	97,00
Lombrices jóvenes	Spar	1444,1874	2579,3126	1574,00	2442,00
	Cofarte	623,9971	2248,5029	917,00	2110,00
	Testigo	1043,3343	2268,6657	1143,00	1959,00
	Total	1411,8869	1990,7797	917,00	2442,00

Tabla 7. Análisis descriptivo.



A continuación se procedió a realizar la prueba de Levene (Tabla 8). El objetivo de esta es determinar si se cumple el supuesto de homogeneidad de la varianza. A la hora de interpretar estos resultados se observan los valores de la columna “Sig.”, en caso de que estos sean inferiores a 0,05 se interpreta que hay una diferencia significativa entre la homogeneidad de las varianzas y por tanto no se podría aplicar el método ANOVA. En este caso todas las varianzas cumplen el requisito y no habría ninguna diferencia significativa en la homogeneidad de ninguna de las variables, por lo que se pueden someter al método ANOVA.

Prueba de homogeneidad de varianzas

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Degradación bolsas	Se basa en la media	3,000	1	6	,134
	Se basa en la mediana	3,000	1	6	,134
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	3,000	1	3,000	,182
	Se basa en la media recortada	3,000	1	6	,134
Lombrices adultas	Se basa en la media	1,511	2	9	,272
	Se basa en la mediana	1,266	2	9	,328
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	1,266	2	3,903	,377
	Se basa en la media recortada	1,449	2	9	,285
Lombrices jóvenes	Se basa en la media	,345	2	9	,718
	Se basa en la mediana	,300	2	9	,748
	Se basa en la mediana y con gl ajustado	,300	2	8,377	,748
	Se basa en la media recortada	,344	2	9	,718

Tabla 8. Prueba de Levene.

El análisis de la Varianza (ANOVA) es una fórmula estadística utilizada con el fin de comparar las varianzas entre las medias de diferentes grupos de datos, con el fin de determinar la existencia o no de diferencias significativas entre estos. Una vez se someten los datos a esta prueba se procede a interpretar el resultado. Para ello se observan los valores de la columna “Sig.” (Tabla 9), en caso de que estos sean inferiores a 0,05 se interpreta que hay una diferencia significativa entre las medias, y que por tanto habría una diferencia significativa entre alguno de los ensayos realizados.



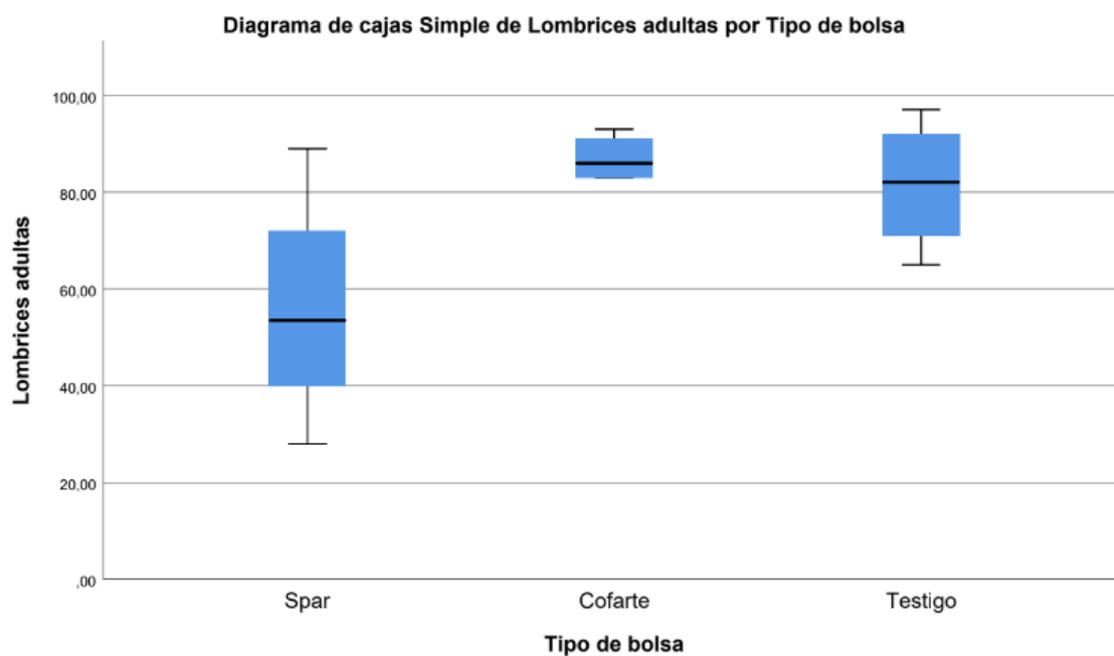
ANOVA

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Degradación bolsas	Entre grupos	,000	1	,000	,000	1,000
	Dentro de grupos	,060	6	,010		
	Total	,060	7			
Lombrices adultas	Entre grupos	2188,667	2	1094,333	3,901	,060
	Dentro de grupos	2525,000	9	280,556		
	Total	4713,667	11			
Lombrices jóvenes	Entre grupos	674731,167	2	337365,583	1,888	,207
	Dentro de grupos	1608111,500	9	178679,056		
	Total	2282842,667	11			

Tabla 9. Prueba ANOVA.

El resultado sin embargo nos indica que no ha habido diferencia significativa en ninguno de los casos y que en consonancia con Barragán (2012), los plásticos biodegradables fueron fácilmente digeribles por las lombrices. La variable de las lombrices adultas ha sido, sin embargo, la más cercana a presentar una diferencia significativa.

Mediante un diagrama de Cajas y Bigotes (Gráfica 6) podemos visualizar como se ha comportado esta variable. La línea horizontal que cruza cada caja representa la mediana, esta deja la mitad de los casos por encima y la mitad por abajo. El límite superior de la caja representa el tercer cuartil, dejando el 75% de los casos por debajo, mientras que el límite inferior marca el primer cuartil dejando el 25% de los casos por debajo. De acuerdo a esto, el 50% de los datos se encuentran representados dentro de la caja, en lo que se conoce como rango intercuartilico. Los bigotes por su parte representan los valores mínimos y máximos. Es posible que si el bigote superior del caso SPAR no tuviera un valor tan elevado y similar a los obtenidos en otros ensayos si se hubiera dado una diferencia significativa en esta variable.



Gráfica 3. Diagrama de Cajas y Bigotes.



6 Conclusiones

La degradación de las bolsas de bioplástico mediante vermicompostado no tuvo un impacto negativo en ninguno de los ciclos vitales de las lombrices.

La pérdida de masa sufrida por las diferentes bolsas fue de entre el 15 y 19%, no encontrando diferencias significativas entre ellas.

Se han encontrado diferencias significativas a nivel molecular en los biopolímeros que las formaban PLA (ácidos polilácticos) y PBAT (Polibutilén adipato-co-tereftalato) encontrando una mayor degradación del PLA en las condiciones estudiadas.

En futuros ensayos el tiempo de duración debería ser superior para permitir que las poblaciones de lombrices se autorregulen y los ejemplares jóvenes lleguen a la edad adulta. Sería interesante exponer a los anélidos a una mayor proporción de bioplásticos frente a otros tipos de alimentos y añadir una nueva serie en la que se proporcione biopolímeros como única fuente de alimento.



7 Conclusions

The degradation of bioplastic bags through vermicomposting did not have a negative impact on any of the life cycles of the earthworms.

The mass loss suffered by the different bags ranged from 15% to 19%, with no significant differences found among them.

Significant differences were found at the molecular level in the biopolymers that composed them, PLA (polylactic acids) and PBAT (Polibutilén adipato-co-tereftalato), with a higher degradation of PLA under the studied conditions.

In future experiments, the duration time should be extended to allow worm populations to self-regulate and young individuals to reach adulthood. It would be interesting to expose the annelids to a higher proportion of bioplastics compared to other types of food and add a new set where biopolymers are provided as the sole source of food.



8 Referencias bibliográficas

Alonso Peña, J. R. (2014). Compost de lombrices. Editorial [Editorial Mundi-Prensa]. https://www.google.es/books/edition/Compost_de_lombrices/rgMoDwAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&printsec=frontcover

Arango-Bernal, L.G. & Dávila-Arias, R. (1991). Descomposición de la pulpa de café por medio de la lombriz roja californiana. Cenicafé. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/940/1/avt0161.pdf>

Álvarez-Méndez, S., Ramos Suárez, JL, Ritter Rodríguez, A., Mata González, J., & Camacho Pérez, Á. (2023). Heliyon Anaerobic digestion of commercial PLA and PBAT biodegradable plastic bags: potential biogas production and ¹H NMR and ATR-FTIR assessed biodegradation. Heliyon. (HELIYON-D-22-33453)

Barragán, DJ (2012). Biodegradabilidad en la determinación del suelo y el destino de algunos materiales biodegradables emergentes para el acolchado agrícola. Universitat de Lleida, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària. <https://repositori.udl.cat/items/9e7457ae-6f36-4198-a532-b363e218d5b5>

BOE. (2011). Real Decreto 1494/2011, de 24 de octubre, por el que se crea el Registro de Productores de Productos (REPP). Boletín Oficial del Estado, núm. 255, de 25 de octubre de 2011, pp. 106418-106421. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-17631>

BOE. (2018). Real Decreto 293/2018, de 18 de mayo, sobre reducción del consumo de bolsas de plástico y por el que se crea el Registro de Productores. Boletín Oficial del Estado, núm. 122, de 19 de mayo de 2018, pp. 40107-40120. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2018-6651>

BOE. (2022). Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. Boletín Oficial del Estado, núm. 85, de 09/04/2022. <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7/con>

Cyras, V. P., & Vázquez, A. (2005). Polímeros biodegradables a base de almidón y compuestos biodegradables. Revista de Plásticos Modernos. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/96780>

European Bioplastics. (2021). Market. <https://www.european-bioplastics.org/market/>

European Commission. (2015). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>

European Commission. (2018). Commission Recommendation of 22 January 2018 on the use of the revised harmonised standards for certain categories of articles in contact with foodstuffs Text with EEA relevance. Official Journal of the European Union, C 44, 1-6. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0028&from=FR#footnote4>

European Commission. (2018). Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment. Brussels: European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A52018PC0340>

European Commission. (2020). Commission Regulation (EU) 2020/2151 of 17 December 2020 on the labeling of products made of, or containing, materials from recycled plastics. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2020/2151



European Commission. (2021). Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019L0904>

European Commission, Directorate-General for Environment. (2021). Turning the tide on single-use plastics. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/800074>

Eurostat. (2022). Consumption of lightweight plastic carrier bags in the EU: Data for 2020. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_waspcb/default/table?lang=en

Eurostat. (2022). Country-specific notes on Lightweight Plastic Carrier. https://ec.europa.eu/eurostat/documents/342366/13429143/CSN_Lightweight+plastic+carrier+bags.pdf/9c3454c9-74ee-286c-33f0-de673e6368d5?t=1642061829487
https://ec.europa.eu/eurostat/documents/342366/13429143/CSN_Lightweight+plastic+carrier+bags.pdf/9c3454c9-74ee-286c-33f0-de673e6368d5?t=1642061829487

Fernández Gómez, MJ (2011). Aplicación de la tecnología del vermicompostaje para la valoración agronómica de residuos y restos de cultivos de invernadero (Tesis doctoral). Universidad de Granada, Instituto de Biotecnología, Granada, España. <https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/21010/20373934.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Freinkel, S. (2011). Plastic: A Toxic Love Story. Houghton Mifflin Harcourt.

Fuentes Aida, F. de (2015). Análisis de la degradación, desintegración y biodegradabilidad de bolsas de poliéster y almidón en compostaje de residuos urbanos: escalas de laboratorio e industrial. Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Forestal y del Medio Natural. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/16676/u371568.pdf?sequence=1>

Fuentes Yagüe, JL (1987). La crianza de la lombriz roja. HD, núm. 1/87, Servicio de Extensión Agraria, Madrid. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1987_01.pdf

Garzón Oviedo, M., Barrientos, A., Del Cerro, J., & Rossi, C. (2010). Análisis cinemático de patrones de movimiento para un robot tipo gusano. [https://oa.upm.es/8024/2/INVE MEM 2010 80462.pdf](https://oa.upm.es/8024/2/INVE_MEM_2010_80462.pdf)

Gómez-Brandón, M., Lazcano, C., & Domínguez, J. (2011). Manual de VermiCompostaje: Tecnologías para la valorización de residuos orgánicos. VermiCan. <https://es.scribd.com/document/219101759/Manual-de-VermiCompostaje-VermiCan1>

Gore, A. C., Chappell, V. A., Fenton, S. E., Flaws, J. A., Nadal, A., Prins, G. S., ... & Zoeller, R. T. (2015). EDC-2: The Endocrine Society's second scientific statement on endocrine-disrupting chemicals. *Endocrine Reviews*, 36(6), E1-E150. <https://doi.org/10.1210/er.2015-1010>

Hellvig, E. L. F., & Flores-Sahagun, T. H. S. (2021). Os ativos verdes da Braskem x patentes verdes como instrumentos econômicos para descarbonização do meio ambiente: polipropileno e polietilenos verdes. [The green assets of Braskem x green patents as economic instruments for decarbonization of the environment: polypropylene and green polyethylenes]. *Revista de Polímeros: Ciência e Tecnologia* 2021. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.08719>

[Huancahuire Villanueva, JW \(2016\). Evaluación de la degradación de mezclas de bioplásticos en compostaje a alta temperatura. Proyecto/Trabajo final de carrera. Universitat Politècnica de Catalunya. https://upcommons.upc.edu/handle/2117/110201](https://upcommons.upc.edu/handle/2117/110201)

Huaynamarca Quispe, N., & Quispe Vargas, V. H. (2020). Revisión Sistemática: Uso del Bioplástico Elaborado a Partir de Fuentes Vegetales para Reducir la Contaminación del Suelo (Tesis de pregrado). Universidad César Valledo.



https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/67171/Huaynamarca_QN-Quispe_VVH-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Labeaga Viteri, Aitziber. (2017). Polímeros biodegradables y su aplicación en envases alimentarios. [Trabajo Fin de Máster, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España. http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Alabeaga/Labeaga_Viteri_Aitziber_TFM.pdf

Lange, K. (1996). The rubber trees of the ancient Maya. *Economic Botany*, 50(1), 38-47. <https://www.jstor.org/stable/4255784>

Limiñana Gregori, P. (2018). Desarrollo, optimización y modelización de compuestos de alto rendimiento medioambiental derivados de poli (butilén succinato) - PBS y residuos de cáscara de almendra [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/115935/Memoria%20deTesis_V3.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Medina, A., Vázquez, Y., & Díaz, M. J. (2010). Determinación de la composición química y estudios de solubilidad en la harina de lombriz *Eisenia foetida*. *Agronomía Colombiana*, 28(1), 67-72. https://www.researchgate.net/profile/Ana-Medina-12/publication/237691311_Determinacion_de_la_composicion_quimica_y_estudios_de_solubilidad_en_la_harina_de_lombriz_Eisenia_foetida/links/0f317534c6570db0a4000000/Determinacion-de-la-composicion-quimica-y-estudios-de-solubilidad-en-la-harina-de-lombriz-Eisenia-foetida.pdf

Naciones Unidas. (2019, 6 de marzo). La ONU alerta sobre el creciente problema de los plásticos en los océanos [Comunicado de prensa]. <https://news.un.org/es/story/2019/03/1452961>

Ojeda-López, JH, Franco-Hernández, MO, & Rodríguez-Quiroz, G. (2019). Absorción de metales pesados por la lombriz *Eisenia foetida* de los jales de mina de oro en Mocorito, Sinaloa, México. Recuperado de <https://aidisnet.org/wp-content/uploads/2019/07/219-Mexico-Poster.pdf>

TÜV Austria. (2019). OK Compost Home - Certificación Compostabilidad Doméstica de Productos. Versión: 17.4.2019

