



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Facultad de Ciencias Experimentales

Trabajo Fin de
Grado

**METODOLOGÍAS ANALÍTICAS
PARA EL ESTUDIO DE
CONTAMINANTES EN DIFERENTES
TIPOS DE COMPOST.**

Alumno/a: Ana Belén Megías Rodríguez

Octubre, 2023

Trabajo Fin de Grado

METODOLOGÍAS ANALÍTICAS PARA EL ESTUDIO DE CONTAMINANTES EN DIFERENTES TIPOS DE COMPOST



Alumno: Ana Belén Megías Rodríguez

Jaén, Octubre, 2023



ÍNDICE.

1. INTRODUCCIÓN.....	pág. 6.
1.1. ¿QUÉ ES EL COMPOST?.....	pág. 6.
1.2. TIPOS DE COMPOST.....	pág. 8.
1.3. PARÁMETROS PARA EL CONTROL DEL PROCESO DEL COMPOSTAJE.....	pág. 11.
1.4. CALIDAD EL COMPOST.....	pág. 13.
2. OBJETIVOS.....	pág. 14.
3. MATERIALES Y MÉTODOS BIBLIOGRÁFICOS.....	pág. 15.
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	pág. 15.
4.1. CONTAMINANTES QUÍMICOS.....	pág. 18.
4.1.1. CONTAMINANTES QUÍMICOS INORGÁNICOS: METALES PESADOS.....	pág. 18.
4.1.2. CONTAMINANTES QUÍMICOS ORGÁNICOS.....	pág. 22.
4.1.2.1. HIDROCARBUROS AROMATICOS (HAP).....	pág. 22.
4.1.2.2. COMPUESTOS ORGÁNICOS PERSISTENTES (COP).....	pág. 26.
4.2. CONTAMINANTES EMERGENTES: MICROPLÁSTICOS.....	pág. 31.
5. CONCLUSIONES.....	pág. 35.
6. BIBLIOGRAFÍA.....	pág. 37.

RESUMEN.

El compostaje, un proceso biológico antiguo y efectivo para gestionar residuos orgánicos, es esencial tanto para la eliminación de desechos como para mejorar la calidad del suelo y actuar como fertilizante natural. No obstante, su uso eficiente enfrenta desafíos importantes debido a la posible presencia de contaminantes no deseados. Estos contaminantes pueden variar desde metales pesados y pesticidas hasta sustancias emergentes, como microplásticos, productos farmacéuticos o de cuidado personal. Este problema se ha convertido en una creciente preocupación en la gestión de residuos orgánicos.

Esta revisión se centra en analizar críticamente artículos científicos disponibles para identificación y cuantificación de los contaminantes potenciales en el compost. Se examina qué tipos de compost pueden ser más propensos a contener los distintos tipos de contaminantes. Además, se analizan las diferentes metodologías utilizadas en investigaciones previas para cuantificar la concentración de contaminantes en el compost, resaltando los métodos en la preparación de la muestra. Abordando un desafío especial ya que algunos de ellos carecen de regulaciones establecidas y sus efectos en la salud humana y el medio ambiente aún están bajo investigación, subrayando la necesidad de una gestión cuidadosa de los residuos orgánicos.

ABSTRACT.

Composting, an ancient and effective biological process for managing organic waste, is essential both for waste disposal and for improving soil quality and acting as a natural fertilizer. However, its efficient use faces significant challenges due to the possible presence of unwanted contaminants. These contaminants can range from heavy metals and pesticides to emerging substances such as microplastics, pharmaceuticals or personal care products. This problem has become a growing concern in organic waste management.

This review focuses on critically analyzing available scientific articles for identification of potential contaminants in compost. It examines which types of compost may be more likely to contain the different types of contaminants. In addition, the different methodologies used in previous research to quantify the concentration of contaminants in compost are discussed, highlighting methods in sample preparation. Addressing a special challenge as some of them lack established regulations and their effects on human health and the environment are still under investigation, underlining the need for careful management of organic wastes.

1.INTRODUCCIÓN.

1.1. ¿Qué es el Compost?

Se puede definir como un abono orgánico obtenido a partir de la descomposición de restos de vegetales y animales, además contiene nutrientes esenciales para las plantas, como el nitrógeno o el potasio, aparte de microorganismos beneficiosos para el suelo (Mosquera, 2010). Se obtiene a través un proceso en el que los materiales orgánicos biodegradables se descomponen bajo la acción de microorganismos en un entorno con suficiente oxígeno. Durante este proceso, llamado proceso de compostaje, los materiales experimentan cambios químicos y biológicos que los transforman en un producto final que es biológicamente estable y rico en nutrientes. Esto se logra gracias a la actividad de una comunidad microbiana diversa que metaboliza los materiales orgánicos, descomponiéndolos y convirtiéndolos en una forma más estable y enriquecedora para el suelo. El resultado de este proceso de compostaje es un compost de alta calidad que puede mejorar la salud del suelo y servir como fertilizante orgánico (Nakasaki, Nag, & Karita, 2005).

El compost nos ofrece numerosos beneficios, como la mejora de la estructura del suelo, debido a que el compost tiene una estructura aterronada, también ayuda a la formación de conglomerados del suelo, lo que permite una buena aireación y humedad (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009), esto gracias al efecto positivo sobre las propiedades físicas. Mientras que para las propiedades químicas aporta un aumento de la capacidad de intercambio catiónico, regulación del pH y suministro de nutrientes, y por último, para las propiedades biológicas supone la regulación de la actividad microbiana y un aumento del contenido de materia orgánica (Bohórquez Santana, 2019). Por otro lado, es un producto natural, libre de patógenos y con un proceso sencillo, ya que se basa en la degradación de materia orgánica mediante su oxidación y la acción de diversos microorganismos presentes en residuos, lo que lleva a un positivo efecto ambiental, ya que de otra forma esos residuos se convertirían en contaminantes. El proceso de compostaje se divide en estas fases.

1. Fase de latencia y crecimiento.

Este periodo cuenta con la adaptación de los microorganismos a las nuevas temperaturas en las que se encuentra el medio, después se inicia la

multiplicación, en la cual, los microorganismos presentes comienzan a reproducirse activamente y aumentar en número, y, por último, la colonización de los residuos. Posee una duración de dos a cuatro días, comenzado con la degradación de las bacterias que presentan los elementos más biodegradables. Estas bacterias son mesófilas, esto quiere decir que actúan a temperaturas próximas a 50°C y como consecuencia se calienta la pila de residuo, en el que se puede observar el vapor de agua que emana de la parte superior del material vegetal.

2. *Fase termófila.*

Durante esta fase, se produce una importante liberación de calor que puede alcanzar temperaturas cercanas a los 70°C. Esto es debido a la actividad metabólica de las bacterias termófilas que descomponen la materia orgánica en compuestos más simples como CO₂ y agua. Esta fase es crucial para el éxito del proceso de compostaje ya que permite eliminar patógenos y semillas de malas hierbas presentes en los residuos. Además, el aumento de temperatura también ayuda a acelerar el proceso de descomposición, disminuyendo así el tiempo necesario para obtener un compost maduro y estable. Es importante controlar la temperatura durante esta fase para evitar que alcance niveles demasiado altos que puedan matar a las bacterias termófilas o provocar incendios en la pila. Por esta razón, es común utilizar sistemas de aireación y volteo para asegurar una distribución homogénea del oxígeno y mantener la temperatura dentro de rangos óptimos (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009).

3. *Fase de maduración.*

En esta fase se recomienda voltear la pila de compost regularmente para airearla y asegurarse de que todos los materiales estén en contacto con las bacterias y microorganismos necesarios para su descomposición. También es importante mantener la humedad adecuada para conservar la actividad biológica. Al final de la fase de maduración, el compost debe tener un aspecto homogéneo y oscuro, sin rastros visibles de los materiales originales. El olor también debería ser agradable y terroso en lugar de maloliente. Una vez que el compost ha alcanzado esta etapa, está listo para ser utilizado como fertilizante

natural en jardines, huertos o campos agrícolas. El compostaje es una forma sostenible y efectiva de reducir los residuos orgánicos y producir nutrientes naturales para ayudar al crecimiento de las plantas (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009).

Cuando un proceso de compostaje está controlado y se aplican los materiales adecuados, se reduce la humedad, el peso, el volumen de los residuos tratados y conduce a un producto estabilizado, almacenable, transportable y utilizable en un suelo agrícola o cualquier otro tipo. El producto final que es el compost, al ser aplicado en el suelo puede mejorar la infiltración y retención del agua, disminuye las fluctuaciones de temperatura, reduce la erosión, mejorar la sanidad de los cultivos al favorecer un control natural de plagas y aporta nutrientes para el sustento de las plantas (Soliva-Torrentó, y otros, 2008).

1.2. Tipos de compost.

En los últimos años se han desarrollado diferentes regulaciones sobre fertilizantes orgánicos, este estudio bibliográfico se va a basar en el Reglamento de Fertilizantes en España (Unión Europea, 2003), en el que se clasifica el compost en diferentes categorías según las materias primas utilizadas en su producción. Es importante tener en cuenta que la clasificación y los requisitos específicos pueden estar sujetos a actualizaciones y modificaciones en función de la legislación vigente. Por lo tanto, es recomendable consultar las fuentes oficiales y la legislación actualizada para obtener información precisa y actualizada sobre la clasificación del compost según el reglamento en España. Por otra parte, se hace uso del Real Decreto 506/2013 (Boletín Oficial del Estado, 2013), en el que el Anexo V habla de los criterios que han de seguir los productos fertilizantes elaborados de residuos y otros componentes, el cual forma parte del compost, de esto se va a hablar más adelante.

Para argumentar la clasificación de tipos de compost se sigue la categorización que se ve reflejada en el Anexo I, del citado BOE, bajo el enunciado de Grupo 6 de enmiendas orgánicas (Boletín Oficial del Estado, 2013), estos diferentes tipos de compost tienen aplicaciones específicas y beneficios para la agricultura, la jardinería y la mejora de los suelos. Cada uno de ellos se produce a partir de distintas materias primas y tiene características particulares que los hacen adecuados para diferentes usos y condiciones.

1.2.1. Denominación del tipo/ Clasificación.

- Enmienda orgánica-Compost (C).

Se trata de un producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante la descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), bajo condiciones controladas, de materiales orgánicos biodegradables del Anexo IV, del citado BOE, se encuentra una lista donde se recogen todas las clases de materiales orgánicos de las que puede estar compuesto esta clase de compost. En este se puede observar una lista de clasificación de los diferentes residuos de los que puede estar compuesto el compost, como por ejemplo los residuos sólidos urbanos.

- Enmienda orgánica-Compost vegetal (CV).

Es un producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo la fase termofílica), compuesto exclusivamente de hojas, hierba cortada y restos vegetales o de poda, bajo condiciones controladas.

- Enmienda orgánica-Compost de estiércol (CE).

Es un producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (Incluyendo la fase termofílica), compuesta exclusivamente de estiércol, bajo condiciones controladas.

- Enmienda orgánica-Vermicompost (VC).

Producto estabilizado obtenido a partir de materiales orgánicos, por digestión con lombrices y bajo condiciones controladas.

- Compost de alperujo (CA).

Producto obtenido por descomposición biológica y estabilización de la materia orgánica procedente del alperujo, bajo unas condiciones que permitan un desarrollo de temperaturas termofílica.

Como se ha mencionado antes, existen unos criterios para cada tipo de compost, en los que se deben de cumplir unos rangos mínimos de calidad, estos tienen en cuenta el nivel de nitrógeno orgánico, humedad, granulometría, microorganismos y metales pesados, se pueden ver detallados en la Tabla 1.

1.2.1. Tabla 1. Grupo 6: Enmiendas Orgánicas. Real decreto 506/2013.

Tipo de Compost	Contenido mínimo en nutrientes, información sobre la evaluación de los nutrientes y otros requisitos
C	- Materia orgánica total: 35% - Humedad máxima: 40% - C/N < 20 No podrá contener impurezas ni inertes de ningún tipo tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos El 90% de las partículas pasarán por la malla de 25 mm
CV	-Materia orgánica total: 40% -Humedad máxima: 40% -C/N < 15 -No podrá contener impurezas ni inertes de ningún tipo tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos
CE	-Materia orgánica total: 35% - Humedad máxima: 40% - C/N < 20 - No podrá contener impurezas ni inertes de ningún tipo tales como: piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos
VC	-Materia orgánica total: 30% - Humedad máxima: 40% - C/N < 20 - El 90% de las partículas pasarán por la malla de 25mm
CA	-Materia orgánica total: 45% -Humedad máxima: 40% -Relación C/N < 20 -Contenido máximo en polifenoles: 0,8% -No podrá contener impurezas ni inertes de ningún tipo tales como piedras, gravas, metales, vidrios o plásticos.

1.3. Parámetros para el control del proceso del compostaje.

El proceso de compostaje se debe tener en cuenta algunos factores para establecer un control de seguimiento. Estos factores son aquellos que han de ser medidos y seguidos durante todo el proceso, para que sus valores se encuentren en los intervalos considerados correctos para cada tipo de compost, estos parámetros son el pH, la temperatura, aireación y espacio de aire libre, el tamaño inicial y la relación de carbono y nitrógeno

- La temperatura es uno de los factores más importantes, ya que a una temperatura adecuada la pila de compostaje mantiene activo el proceso y equilibra el crecimiento de microorganismos. Para el compostaje el rango de temperatura promedio requerido es de 40 a 60°C (Perihar & Choundhary, 2022).
- El pH es un parámetro que nos indica la evolución del proceso de compostaje, éste decrece al inicio debido a la formación de ácidos orgánicos con bajo peso molecular y a medida que el proceso progresa el valor de pH aumenta hasta valores constantes, estos valores se encuentran entre 6.5 y 8.5 dependiendo del material. Influye tanto en los nutrientes que intervienen en el crecimiento de las plantas, como en la capacidad del intercambio catiónico y la actividad biológica (Masaguer-Rodríguez & Benito-Capa, 2008).
- El oxígeno en el compostaje controla el resto de parámetros del proceso, además de influir en el crecimiento de los microorganismos aeróbicos, lo que afecta significativamente en el contenido de humedad y la pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco. El contenido de oxígeno en el compostaje depende de la porosidad de la materia orgánica, lo que manifiesta que el tamaño de la materia orgánica está directamente relacionado con la disponibilidad de oxígeno en las pilas de compostaje (Perihar & Choundhary, 2022).
- El tamaño inicial de las partículas que componen la masa a compostar está relacionado con el ataque microbiano, ya que cuanto mayor sea la superficie expuesta al ataque, más rápida y completa será la reacción. Como consecuencia, el desmenuzamiento del material facilitara el ataque de los microorganismos y aumentara la velocidad de proceso, pero en la práctica se puede producir una reducción del espacio entre partícula, lo que provoca un aumento de las fuerzas de fricción y limita la difusión de oxígeno al interior y

dióxido de carbono al exterior, lo que causaría un colapso microbiano (Bueno-Márquez, y otros, 2008).

- La relación entre el carbono y el nitrógeno es el primer factor que acelera la degradación de los compuestos orgánicos, el carbono es necesario como fuente de energía para el microorganismo y el nitrógeno para la síntesis de aminoácidos, ácidos nucleicos y proteínas (Perihar & Choundhary, 2022). Para un correcto compostaje en el que se aproveche y retenga la mayor parte del C y del N, la relación C/N del material de partida debe ser la adecuada. Los microorganismos utilizan generalmente 30 partes de C por cada una de N; por esta razón se considera que el intervalo de C/N teóricamente óptimo para el compostaje de un producto es de 25-35 (Jhorar, Phogat, & Malik, 1991). Se utiliza como índice para la determinación de la madurez y la estabilidad de la materia orgánica, depende de la naturaleza química del material. Los daños que se pueden producir son debido a la inmovilización del nitrógeno del medio o la baja disponibilidad de oxígeno, no como consecuencia de la actividad microbiología (Masaguer-Rodríguez & Benito-Capa, 2008).

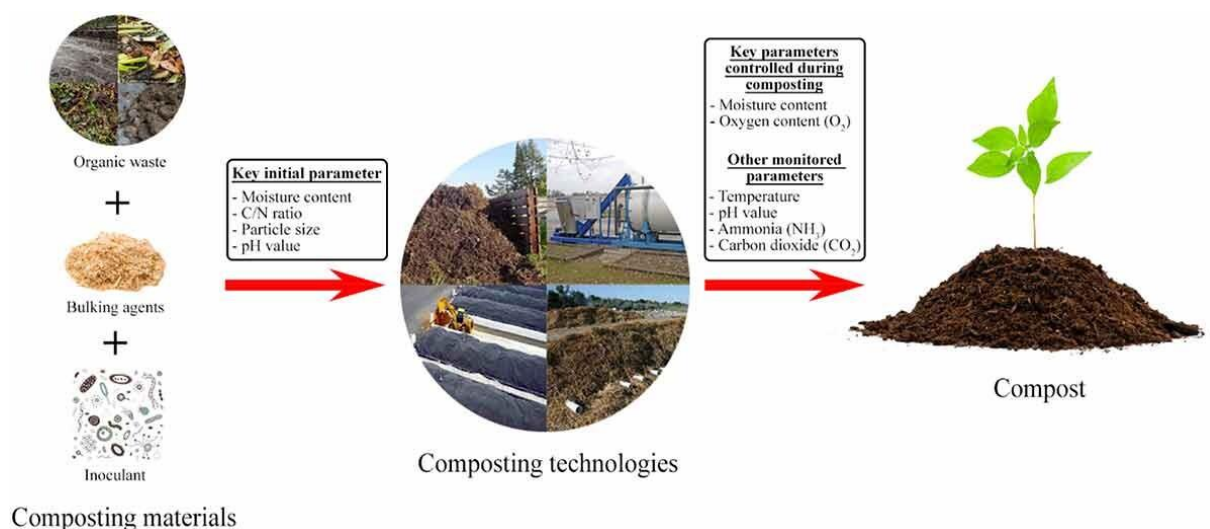


Figura 1. Resumen de los parámetros clave durante el proceso de compostaje. (Lin, y otros, 2022)

1.4. Calidad del Compost

Para definir la calidad del compost hay que tener en cuenta distintos aspectos como su estabilidad, la madurez, el contenido de patógenos, características físicas, químicas y biológicas (Campitelli P. A., 2010). En los apartados anteriores se ha hablado de los parámetros que hay que tener en cuenta durante el proceso, estos dependen esencialmente del uso que se le vaya a dar, por lo que también podemos hablar de factores externos que pueden afectar a la calidad del compost, como las materias que tenemos inicialmente, ésta determinara la calidad del material final, aquí ponemos en juego la concentración de contaminantes que contengan estas muestras (Masaguer-Rodríguez & Benito-Capa, 2008), por ende, la calidad comienza a determinarse desde el momento de la elección de los materiales y la proporción en la que se mezclarán, si hay incorporación de agentes estructuras y su proporción, el tratamiento de los materiales, frecuencia, cantidad de riesgos, volteos y la elección del momento en que se dará por concluido el proceso, entre otros (Campitelli P. A., 2010). Sin embargo, es crucial la definición de técnicas analíticas confiables y de sencilla medición con el objetivo de controlar la calidad del mismo (Mondini, Fornasier, & Sinicco, 2004).

En el ámbito agrícola la fitotoxicidad es uno de los criterios más importantes para la aprobación de un compost, en el que se utiliza el índice de germinación para evaluarlo y hay que tener especial cuidado para interpretar los resultados, ya que estos dependen del material originado y las semillas utilizadas en la elaboración del compost (Bernal, y otros, 1998). Como se ha hablado antes, existen otros criterios que hay que tener en cuenta como el pH, el contenido en carbono orgánico total, en el que las variaciones reflejan la descomposición de la materia orgánica y estabilización durante un proceso de compostaje, el contenido Nitrógeno tota y el Carbono orgánico soluble en agua, que mostraron ser parámetros de alta variabilidad (Campitelli & Ceppi, 2008). Conociendo los resultados de estos parámetros el análisis discriminante permite clasificar las enmiendas orgánicas analizadas en categorías de calidad, siendo la A la que obtiene mayor calidad, la B (B1,B2,B3) calidad media y la C una mala calidad, haciendo posible de la utilización de la matriz de datos y los parámetros seleccionados la clasificación de la calidad de compost de origen desconocido (Campitelli P. A., 2010).

No obstante, hay residuos orgánicos que deben ser tratados, para poder estar regulados a través de la exigencia de caracterización de estas enmiendas, debido a los posibles riesgos de contaminación por metales pesados o por otros posibles contaminantes, que pueden llegar a generar un problema para la protección del ambiente. En España se cuenta con leyes que regulan la eliminación y valoración de residuos (Boletín oficial del Estado, 2022), para el compost los residuos orgánicos está regulado (Boletín Oficial del Estado, 2013) entre otras cosas el contenido de metales pesados destinados al mercado agrícola. Dado a conocer esto, este estudio se va a centrar en los tipos de contaminantes que pueden encontrar en diferentes clases de compost, conociendo las metodologías analíticas que se utilizan para poder denominar la cantidad de contaminantes que se encuentra en la muestra.

2.OBJETIVOS.

El principal objetivo de esta investigación se centra en llevar a cabo una revisión de la literatura científica con el propósito de obtener información relevante acerca de los diferentes contaminantes que pueden aparecer en el compost.

A continuación, se realiza una lista de los enfoques claves de esta revisión:

- Identificar los contaminantes más frecuentes en el compost, estableciendo una clasificación de acuerdo a su naturaleza.
- Dar a conocer los tipos de contaminantes que hay en el compost y cuáles son los más preocupantes.
- Conocer las diferentes técnicas analíticas que se utilizan para analizar los contaminantes.
- Realizar una evaluación profunda de las técnicas y practicas empleadas en la producción de compost, con el propósito de minimizar la presencia de contaminantes, abordando aspectos tales como el control de la temperatura, el tiempo de compostaje y la adecuada mezcla de materiales, entre otros.

Todo esto, con el fin de aprender sobre los tipos de contaminantes que pueden aparecer en el compost y en cuáles de ellos se hallan más reiteradamente.

3. MATERIALES Y MÉTODOS BIBLIOGRÁFICOS.

Para la recopilación de datos científicos especializados en el campo del compost y los contaminantes asociados a las materias primas, se ha tenido en cuenta unos criterios específicos para seleccionar las fuentes bibliográficas relevantes, para asegurar la calidad y relevancia de la información obtenida. Se priorizaron libros, artículos científicos, informes técnicos y documentación gubernamental para obtener una visión global y actualizada sobre el tema. Al mismo tiempo, se incluyeron publicaciones recientes, preferentemente del período comprendido entre los años 2015 y 2023, con el fin de afirmar la actualidad de los datos.

El análisis crítico de las fuentes seleccionadas permite identificar los principales contaminantes asociados a las materias primas utilizadas en el compostaje y analizar su impacto ambiental y sanitario. Para ello, se ha utilizado *Scopus* y *ScientDirect* como buscadores, donde se emplearon palabras clave en inglés y en español como “compost”, “analytical methodologies”, “contaminants of compost”, entre otros, incluso se aplicaron filtros para limitar los resultados a publicaciones en idioma español e inglés. Para la selección de las fuentes bibliográficas primero se realizó una revisión de los títulos y resúmenes obtenidos de las palabras claves buscadas y se descartó aquellos que no se ajustaban al tema de investigación. Posteriormente, se realizó una comprensión lectora de los artículos seleccionados, además de utilizar el método de búsqueda de citas y referencias bibliográficas en los artículos seleccionados para encontrar fuentes adicionales que pudieran interesar. Una vez realizado esto, se procedió a clasificar la información, de manera que fuera más sencillo a la hora de buscarla.

4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este apartado se va hablar de los resultados obtenidos en la investigación de las metodologías analíticas para el estudio de los contaminantes en el compost y como afectan a su calidad, ya que normalmente la calidad del compost se relaciona con la ausencia de contaminantes. Estos resultados se discuten en función de los objetivos de investigación planteados, donde se muestran los rangos de concentraciones de los contaminantes que deben cumplir, además de una clasificación de los más comunes y la materia prima donde aparecen.

Al evaluar las fuentes de información sobre contaminantes actuales y sus impactos asociados en el medio ambiente, el suelo y la salud humana, se pueden distinguir tres grupos claves, aunque en algunos de ellos no haya demasiada información sobre su gravedad, también pueden causar importantes efectos negativos. Podemos destacar Contaminantes Físicos, Químicos y Microbianos, estos diferentes contaminantes presentan algunas complicaciones debido a su tamaño o referencias para poder tratarlos como tal.

➤ *Contaminantes Físicos.*

Se clasifican en no plásticos y plásticos, una contaminación por no plásticos surge de desechos orgánicos mixtos y pueden contener materiales de construcción, metal, vidrio, rocas y tierra. Estos se acumulan en el suelo cuando se añade el compost, pudiendo causar un bloqueo en el espacio poroso de los suelos, interrumpiendo la filtración del agua (Echavarri-Bravo, y otros, 2017). En comparación, una contaminación por plásticos en el compost surge de desechos de alimentos, recipientes y papel recubierto de plástico, se originan por una mala eliminación del plástico a través del proceso de compostaje (Braun, y otros, 2021).

➤ *Contaminantes Microbianos.*

De estos contaminantes forman parte los patógenos que se pueden dar en las materias primas utilizadas para el compost, éstos crean una serie de bacterias que se originan durante el deterioro de los desechos. Estas bacterias son la Salmonella y Escherichia coli, pueden causar enfermedades respiratorias durante en proceso de compostaje con la aparición de mohos mesófilos y bacterias mesófilas, alcanzando concentraciones máximas (Bonifait, y otros, 2017).

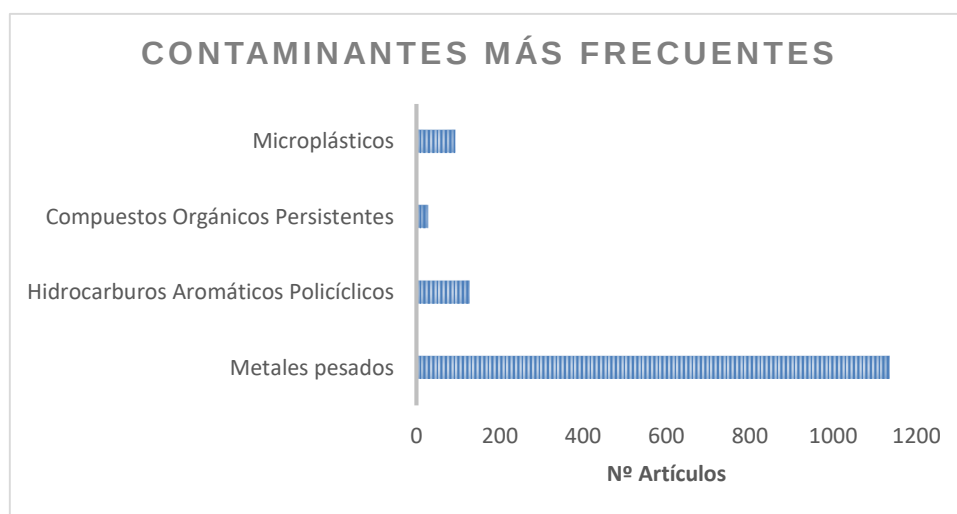
➤ *Contaminantes Químicos.*

Los clasificamos en contaminantes inorgánicos, donde forman parte los metales pesados, y contaminantes orgánicos, formados por pesticidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, bifenilos policlorados, sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas. El aumento de las concentraciones de metales pesados en los compost, con las materias primas dadas, se debe a la reducción del volumen de los desechos a través de la degradación microbiana. (O'Connor, y otros, 2021). Los pesticidas son una gran amenaza para la calidad de compost, ya que tienen una fuerte

adsorción a las partículas del suelo y se pueden encontrar en altas concentraciones dentro de los suelos agrícolas y pueden ser absorbidos por las plantas (Li, y otros, 2018).

Esta categorización se ha realizado como en O'Connor, y otros, 2021, pero en este trabajo la búsqueda se va a centrar en los contaminantes químicos y en los contaminantes emergentes como los microplásticos, porque, aunque estén clasificados como contaminantes físicos al tener un tamaño tan pequeño no se sabría cómo podrían interaccionar, de ahí que se hayan recibido más atención debido a su presencia en el medio ambiente y su potencial para causar efectos ecológicos inestables.

Figura 2. Lista de contaminantes más frecuentes encontradas en la búsqueda bibliográfica en el periodo de 2015-2023.



En esta gráfica se ve representado la cantidad de información que se encuentra sobre los metales pesados, a diferencia, por ejemplo, de los compuestos orgánicos persistentes, siendo estos los que más preocupan en la actualidad, esto se debe a que los metales pesados se encuentran legislados y deben cumplir unos rangos de concentraciones que van ligados a la calidad del compost (Boletín Oficial del Estado, 2013), por lo que se puede encontrar más información sobre ellos. Por lo contrario, hay menos información sobre los compuestos orgánicos persistentes ya que la preocupación en ellos es reciente y se desconoce el grado de contaminación que pueden causar en el medio ambiente.

4.1. Contaminantes Químicos.

Dentro de la categoría de los contaminantes químicos, se pueden distinguir dos clases fundamentales: los contaminantes químicos orgánicos y los contaminantes químicos inorgánicos, ambas clases tienen subdivisiones importantes que son relevantes para el estudio. En el caso de los contaminantes químicos inorgánicos, la atención se dirige específicamente hacia los metales pesados. Estos metales pesados, por su alta toxicidad y capacidad de persistir en el ambiente, se han establecido como factores primordiales de la contaminación en el compost. Además, es importante resaltar que están sujetos a regulaciones específicas en el contexto normativo de España.

Por otro lado, al examinar los contaminantes químicos orgánicos, este estudio se ha enfocado en dos subcategorías específicas: los hidrocarburos aromáticos policíclicos y los contaminantes orgánicos persistentes. Estas dos subdivisiones han emergido como preocupaciones cada vez más notables en relación con la calidad y seguridad del compost. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos, caracterizados por su compleja estructura química y potencial impacto carcinogénico, originan una creciente atención debido a su posible presencia en el compost y su relevancia para la salud humana y el medio ambiente. Asimismo, los contaminantes orgánicos persistentes, por su capacidad de acumularse en el ecosistema y su resistencia a la degradación, se han convertido en un tema de preocupación en el contexto del compost, generando una necesidad de evaluación y moderación.

4.1.1. Contaminantes Químicos Inorgánicos: Metales Pesados.

Los metales pesados son un grupo de elementos metálicos cuya densidad es más de cinco veces la del agua. A pesar de sus propiedades, estos elementos se han convertido en una preocupación creciente debido a las actividades humanas como la producción industrial, la minería, la agricultura y el transporte, que liberan grandes cantidades de estos elementos a la biosfera (Sardar, y otros, 2013).

En el contexto normativo de España, la gestión y control de los metales pesados se rige por unos criterios específicos para evaluar y clasificar la calidad del compost. Estos parámetros y límites se encuentran minuciosamente detallados en el Anexo V del Real Decreto 506/2013, una disposición legislativa de relevancia que regula aspectos esenciales en materia de residuos y (Boletín Oficial del Estado, 2013).

Tabla 3. Límite máximo de metales pesados. Real Decreto 506/2013. (Boletín Oficial del Estado, 2013)

Metal Pesado	Límites de concentración (mg/kg de materia seca)		
	Clase A	Clase B	Clase C
Cadmio	0.7	2	3
Cobre	70	300	400
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1000
Mercurio	0.4	1.5	2.5
Cromo (total)	70	250	300

La alarmante propagación de la contaminación por metales pesados no sólo afecta la producción agrícola y la calidad de los cultivos, sino que también afecta compresiblemente la calidad del aire y del agua, planteando amenazas potenciales a la salud y la vida de animales y organismos (Sardar, y otros, 2013).

Para comprender y cuantificar con exactitud la concentración de estos metales en diferentes tipos de compost, se recurre a diversas técnicas y metodologías analíticas especializadas. La tabla 4 que se encuentra a continuación presenta una recopilación de las metodologías analíticas utilizadas para la detección de metales pesados en el compost, junto con sus correspondientes concentraciones. Mediante estos métodos analíticos se puede obtener información detallada sobre la composición química del compost, lo que ayuda a comprender la seguridad y calidad de estos materiales orgánicos.

Tabla 4. Resumen de la información utilizada sobre los Metales Pesados.

Metal Pesado	Concentración (mg/kg)	Tipo de Compost	Preparación de la muestra	Metodología Analítica	Referencia
Cadmio (Cd)	0,35	LD	Para analizar la muestra se realiza una mezcla de digestión diácida (HNO ₃ :HClO ₄ , 4:1	AAS	(Dar, y otros, 2023)
	1,43	LD	Las muestras se digirieron en recipientes de digestión por microondas de teflón-PFA de 120 ml con 7,5 de HNO ₃ y 1,5 ml de H ₂ O ₂ , deespues se diluyeron a un volumen total de 50 ml con agua MilliQ.	ICP-MS	(Tan, y otros, 2023)
	3	RSU	Las muestras fueron digeridas con una mezcla de HCl (37%) y HNO ₃ (70%), en una relación de 3:1 (V/V), a temperatura ambiente durante 16 h y luego a 130 °C durante 2 h, en condiciones de reflujo. Posteriormente, cada suspensión fue filtrada, diluida a 100 ml con 0,5 M HNO ₃ , y se conserva a 4 °C hasta su análisis.	AAS	(Alvarenga, y otros, 2015)
Zinc (Zn)	1211,89	LD	Las muestras se digirieron en recipientes de digestión por microondas de teflón-PFA de 120 ml con 7,5 de HNO ₃ y 1,5 ml de H ₂ O ₂ , deespues se diluyeron a un volumen total de 50 ml con agua MilliQ.	ICP-MS	(Tan, y otros, 2023)
	473,5	RSU	Las muestras fueron digeridas con una mezcla de HCl (37%) y HNO ₃ (70%), en una relación de 3:1 (V/V), a temperatura ambiente durante 16 h y luego a 130 °C durante 2 h, en condiciones de reflujo. Posteriormente, cada suspensión fue filtrada, diluida a 100 ml con 0,5 M HNO ₃ , y se conserva a 4 °C hasta su análisis.	AAS	(Alvarenga, y otros, 2015)
	526,31	RSU	Las muestras fueron digeridas con una mezcla de 6 ml HNO ₃ y 2 ml H ₂ SO ₄ a 200°C durante 30 min en un digestor de microondas de alta presión.	ICP-MS	(Siles- Castellano, y otros, 2020)
Plomo (Pb)	202,3	RSU	Las muestras fueron digeridas con una mezcla de HCl (37%) y HNO ₃ (70%), en una relación de 3:1 (V/V), a temperatura ambiente durante 16 h y luego a 130 °C durante 2 h, en condiciones de reflujo. Posteriormente, cada suspensión fue filtrada, diluida a 100 ml con 0,5 M HNO ₃ , y se conserva a 4 °C hasta su análisis.	AAS	(Alvarenga, y otros, 2015)
	3021,58	RSU	Las muestras fueron digeridas con una mezcla de 6 ml HNO ₃ y 2 ml H ₂ SO ₄ a 200°C durante 30 min en un digestor de microondas de alta presión.	ICP-MS	(Siles- Castellano, y otros, 2020)
	1052,11	RSU	Las muestras fueron digeridas con una mezcla de 6 ml HNO ₃ y 2 ml H ₂ SO ₄ a 200°C durante 30 min en un digestor de microondas de alta presión.	ICP-MS	(Siles- Castellano, y otros, 2020)
Cobre (Cu)	253,64	LD	Las muestras se digirieron en recipientes de digestión por microondas de teflón-PFA de 120 ml con 7,5 de HNO ₃ y 1,5 ml de H ₂ O ₂ , deespues se diluyeron a un volumen total de 50 ml con agua MilliQ.	ICP-MS	(Tan, y otros, 2023)
	179,5	RSU	Las muestras fueron digeridas con una mezcla de HCl (37%) y HNO ₃ (70%), en una relación de 3:1 (V/V), a temperatura ambiente durante 16 h y luego a 130 °C durante 2 h, en condiciones de reflujo. Posteriormente, cada suspensión fue filtrada, diluida a 100 ml con 0,5 M HNO ₃ , y se conserva a 4 °C hasta su análisis.	AAS	(Alvarenga, y otros, 2015)
	0,63	RSU	Las muestras fueron digeridas con una mezcla de HCl (37%) y HNO ₃ (70%), en una relación de 3:1 (V/V), a temperatura ambiente durante 16 h y luego a 130 °C durante 2 h, en condiciones de reflujo. Posteriormente, cada suspensión fue filtrada, diluida a 100 ml con 0,5 M HNO ₃ , y se conserva a 4 °C hasta su análisis.	AAS	(Alvarenga, y otros, 2015)
Mercurio (Hg)	3,2	LD	Las muestras se liofilizaron primero y luego se molieron y cribaron con malia de nylon (malia 100).	AAS	(Liu, y otros, 2022)

¹Compost de Lodos de depuradoras (LD); ²Compost de Residuos Sólidos Urbanos (RSU); ³Espectrometría de Absorción Atómica (AAS); ⁴Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inducido (ICP-MS).

En la tabla 4 se observa que la Espectrometría de absorción atómica (AAS) y la Espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inducido (ICP-MS) destacan como las técnicas de elección para cuantificar metales pesados en el compost. Estos métodos se seleccionaron en función de su capacidad para proporcionar mediciones altamente precisas y confiables de concentraciones de metales pesados. La espectrometría de absorción atómica (AAS) se valora por su capacidad para obtener mediciones selectivas y sensibles de metales pesados individuales, lo cual es esencial en el análisis de compuestos complejos como el compost (Sadzawka R. 2005), mientras que la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) destaca por su versatilidad y capacidad para determinar simultáneamente varios metales pesados en una muestra, lo que acelera y enriquece significativamente el proceso analítico (Olesik, 2014). Por otro lado, la preparación de la muestra suele ser similar en todos los casos, consta de una digestión ácida sometida a una temperatura y un tiempo de espera, con el fin de que esté listo para su análisis. Estos métodos proporcionan la base analítica necesaria para estimar con precisión la presencia y concentración de metales pesados en el compost, lo cual es esencial para comprender y gestionar los impactos ambientales y de salud asociados con este material orgánico.

Tras la búsqueda en la literatura y un análisis de los datos recopilados, se observa que los compost que contienen las concentraciones más altas de metales pesados son, en particular, los compost derivados de lodos de depuradora, estiércol y residuos sólidos urbanos.

La acumulación de metales pesados en lodos de depuradora es de especial interés, porque estas sustancias, que se producen durante el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, tienen una fuerte tendencia a retener y concentrar metales pesados en su estructura (Dar, y otros, 2023). Este proceso se debe en gran medida a la precipitación y adsorción de estos metales durante el proceso de purificación. Por tanto, los lodos de depuradora pueden contener una cantidad importante de metales pesados, lo que crea importantes problemas en la gestión de residuos y la necesidad de una manipulación adecuada para su eliminación o uso posterior. El análisis cuantitativo preciso de los metales pesados en los lodos de depuradora es fundamental desde el punto de vista científico y medioambiental. La presencia de estos elementos puede afectar la calidad de los productos del lodo, como el compost,

la salud del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Yang, y otros, 2023) (Johansen, y otros, 2023) (Tan, y otros, 2023) (Siles-Castellano, y otros, 2020). Existe también una evidencia de que el estiércol del ganado es un depósito importante y una fuente ambiental de metales pesados (Liu, y otros, 2020) (Yang, y otros, 2023). Adquiere una dimensión crítica cuando se considera el fenómeno de la coexistencia de estos metales con antibióticos en el estiércol animal, ya que esta interacción puede dar lugar a procesos de coselección de genes de resistencia a antibióticos (ARG) (Liu, y otros, 2022) (Yang, y otros, 2023) (Tan, y otros, 2023) y, de manera aún más preocupante, a su promoción sinérgica, lo que desencadena una notable propagación de estos genes en el entorno. De acuerdo con investigaciones anteriores, se ha revelado que la presencia de cobre en el medio ambiente da lugar a una alteración significativa en la composición y estructura de la comunidad microbiana, y, de manera simultánea, fomenta la persistencia de los ARG en dicho entorno (Yang, y otros, 2023).

Por otra parte, otro de los metales más repetidos es el cadmio (Cd) se posiciona como uno de los elementos más dañinos en la cadena alimentaria y representa un obstáculo significativo en la gestión de lodos. Este elemento no es esencial en el entorno natural y, en realidad, es altamente perjudicial, elevadas concentraciones de cadmio disminuyen o incluso bloquean por completo la actividad de los microorganismos, tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas (Bożym & Siemiątkowski, 2018). También el plomo (Pb), afecta a la germinación de las semillas cuando es absorbido por las plantas, además de ser tóxico para el cuerpo humano. La disponibilidad biológica del Pb está relacionada con la materia orgánica, la estructura y la capacidad de intercambio catiónico del suelo (Xiong, y otros, 2022).

4.1.2. Contaminantes Químicos Orgánicos:

4.1.2.1. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) son un grupo de contaminantes orgánicos hidrófobos que constan de dos o más anillos aromáticos (Amir, y otros, 2005). Estos compuestos pueden ingresar al ambiente natural a través de la combustión incompleta de materia orgánica, como en los gases de escape de los vehículos, al quemar tabaco, carbón y madera, o contaminar el suelo y el agua a través de derrames de aceite mineral o alquitrán. Debido a sus propiedades hidrofóbicas, la mayoría de los HAP tienden a adherirse a las partículas del suelo y de los sedimentos,

reduciendo su disponibilidad para la bioabsorción (Moretto, y otros, 2005). Hay 16 tipos diferentes de HAP, según el número de anillos de benceno en su estructura se clasifican en HAP pequeños con menos de 6 anillos de benceno y HAP grandes con más de 6 anillos de benceno (Visniauské, y otros , 2018).

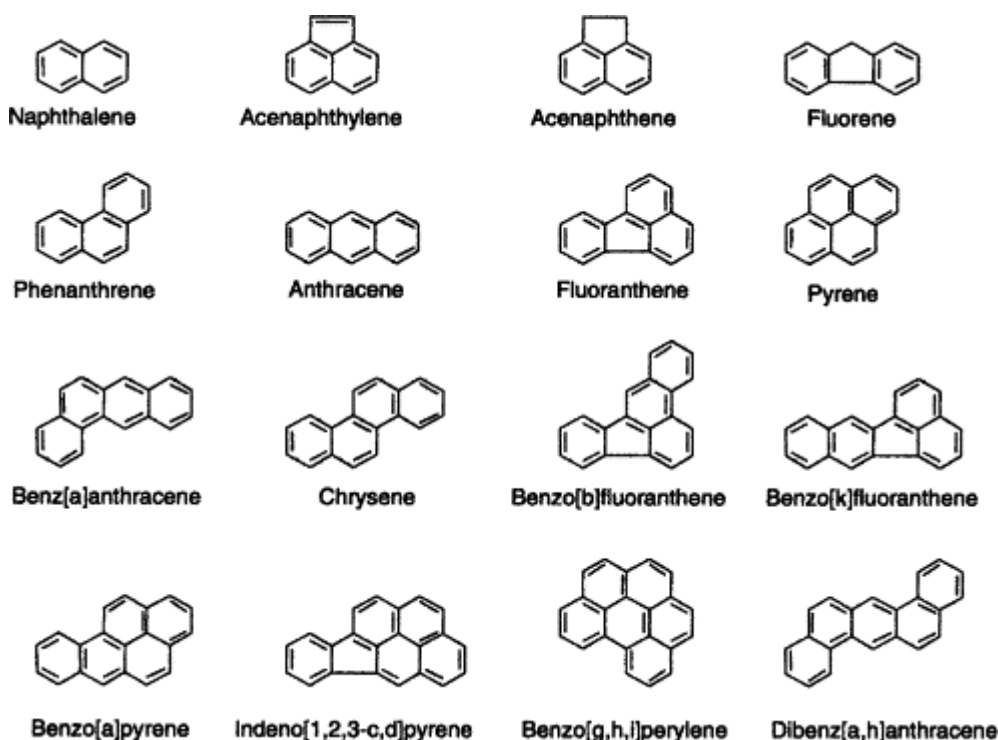


Figura 3. Estructura molecular de los 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) considerados como contaminantes prioritarios por la Agencia Americana de Protección Ambiental (EPA) (Amir, y otros, 2005).

Con el propósito de examinar en detalle los métodos analíticos utilizados para la determinación de la concentración de HAP en el compost, se ha realizado una tabla donde se resumen las técnicas más recurrentes y aplicadas en la literatura científica. El enfoque en la selección y descripción de estas técnicas aborda la importancia de evaluar a los PAH en el compost, dado que estos compuestos orgánicos persistentes plantean preocupaciones tanto ambientales como en la salud humana. Los PAH son reconocidos por su potencial carcinogénico y por su capacidad de persistir en el medio ambiente, lo que los convierte en una categoría de contaminantes de gran relevancia (Beníšek, y otros, 2015).

Tabla 5. Tabla resumen de Metodologías analíticas para HAP.

Tipo de Compost y/o materia prima	Preparación de la muestra	Concentraciones ($\mu\text{g/kg}$)	Metodología Analítica	Referencia
RSU	La muestras liofilizadas se extrajeron con una mezcla de n-hexano/acetona dos veces durante 30 min.	$2,6 \times 10^4$	GC-MS	(Beníšek, y otros, 2015)
	Extracción en fase sólida (SPE) con acetonitrilo y filtración con filtro de jeringa de nailon.	$2,1 \times 10^4$		(McGowin, Adom, & Obubuafo, 2001)
LD	Extracción mediante mezcla de n-hexano/diclorometano.	$3,2 \times 10^3$	GC-MS	(Lazzari, y otros, 1999)
RSU	Extracción Soxhlet con tolueno durante 24h y limpieza mediante cromatografía en silicagel.	$1,1 \times 10^4$	HPLC	(Grossi, Lichtig, & Krauß, 1998)
LD	Extracción mediante diclorometano, tolueno, n-hexano y acetonitrilo (metodo QuEChERS).	$4,55 \times 10^3$	HPLC	(Sahan, Sahin, & Jakubus, 2022)
RI y LD	Extracción mediante CH_2Cl_2 y $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O}$, centrifugado 15 min y secado por filtración a través de Na_2SO_4 .	$0,24 \times 10^3$	GC-MS	(Amir, y otros, 2005)
LD	Extracción mediante acetona y éter de petróleo.	$7,11 \times 10^3$	HPLC	(Visniauské, y otros, 2018)

¹Compost de Residuos Sólidos Urbanos (RSU); ²Compost de Lodos de depuradoras (LD); ³Compost de Residuos Industriales (RI); ⁴Cromatografía de gases acoplada a Espectrometría de masas (GC-MS); ⁵ Cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

El método analítico que más se repite es la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, que es un método de separación utilizado para analizar sustancias volátiles térmicamente estables. La preparación de muestras es un paso importante en el análisis de GC-MS. Por lo general, implica trituración, homogeneización y aislamiento de los analitos de las muestras, lo que puede lograrse mediante destilación, cromatografía preparativa o extracción con solventes (Jiang, y otros, 2014). Además de la cromatografía de gases, la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) es otra técnica importante para el análisis de compuestos HAP. A pesar de las similitudes en la separación cromatográfica, la HPLC se caracteriza por

su capacidad para manejar una gama más amplia de compuestos, incluidos compuestos polares o no volátiles (Grossi, Lichtig, & Krauß, 1998).

Investigaciones científicas, como el estudio llevado a cabo por Beníšek y otros, en 2015, promueven la preocupación acerca de las implicaciones negativas que pueden surgir al introducir compost contaminado con productos químicos en los suelos. En este contexto, cabe destacar que los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos constituyen un tipo de contaminante que merece particular atención. La presencia de HAP en alimentos se ha establecido como resultado de la absorción de estos compuestos por parte de las plantas que crecen en suelos contaminados. Esta preocupante transferencia de HAP de los suelos a los cultivos plantea un potencial riesgo para la salud humana, ya que estos compuestos pueden acumularse en los alimentos que consumimos (O'Connor, y otros, 2021) .

Como se ve reflejado en la tabla 5, el tipo de compost que presenta más concentración de HAP son de residuos sólidos urbanos y los lodos de depuradora. No obstante, es imprescindible subrayar que la relación entre la elección de estas materias primas y la presencia de compuestos aromáticos policíclicos (CAP) en el compost es proporcional. Como se ha documentado ampliamente en investigaciones previas, el agua, en sus diversas manifestaciones, emerge como la principal fuente de concentración de CAP en el entorno (Beníšek, y otros, 2015).

En consecuencia, los desechos originados a partir de aguas estancadas, residuos alimentarios o desechos domésticos, al entrar en contacto con esta matriz acuosa contaminada, se convierten en potenciales fuentes de estos compuestos perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana. Este factor mutuo destaca la importancia de una investigación y evaluación cuidadosas de la calidad del compost, especialmente cuando se utilizan materias primas importantes para el medio ambiente urbano y el tratamiento de aguas residuales. La identificación y cuantificación precisa de los HAP en el compost derivado de estos materiales es importante no solo para la gestión de residuos, sino también para la seguridad ambiental y la promoción de prácticas sostenibles en la agricultura y la horticultura.

4.1.2.2. Compuestos Orgánico persistentes (COPs).

Es una familia de sustancias orgánicas que cuenta con propiedades de persistencia y toxicidad, en los cuales algunos de estos contaminantes no son desechos si no subproductos indeseados. Estas sustancias se acumulan en tejidos de seres vivos y pueden ser transportadas a gran distancia de la fuente, esto forma una combinación peligrosa que hace imposible controlarlas una vez liberadas al medio ambiente. Según el Convenio de Estocolmo recoge que doce COP son causantes de efectos adversos en los seres humanos y en el ecosistema; los divide en tres categorías, pesticidas, productos químicos industriales y subproductos. Este apartado se va a centrar en los PCDD/F (dibenzo -*p*-dioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados) y PCB (bifenilos policlorados), puesto que se están convirtiendo en un problema mundial debido a un aumento en los niveles de contaminación y residuos, estos contaminantes aparecen a través de las industrias que vierten dioxinas y furanos a la tierra, además de la deforestación y quema de bosques.

➤ Dibenzo-*p*-dioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados (PCDD/PCDF)

Las dibenzo-*p*-dioxinas policloradas y los dibenzofuranos policlorados (PCDD/F) son un grupo de contaminantes ambientales persistentes y carcinógenos que causan gran preocupación. Su excelente estabilidad molecular, su marcada hidrofobicidad, lipofilia y significativa afinidad por la adsorción en la fase particulada hacen que estos compuestos tengan una baja biodisponibilidad y sean muy difíciles de eliminar del suelo y de las matrices de sedimentación (Huang, y otros, 2019).

El término "dioxina" se aplica a un conjunto de sustancias aromáticas que comparten un núcleo fundamental, el 1,10-dioxantraceno o dibenzo-*p*-dioxina, caracterizado por dos anillos de benceno interconectados mediante dos átomos de oxígeno. Entre las dioxinas más nocivas, se encuentran aquellas que presentan átomos de cloro en las posiciones 2, 3, 7 y 8 de su estructura, limitando así el número de PCDD a 7 y de PCDF a 10. (Giraldo & Ocampo, 2005).

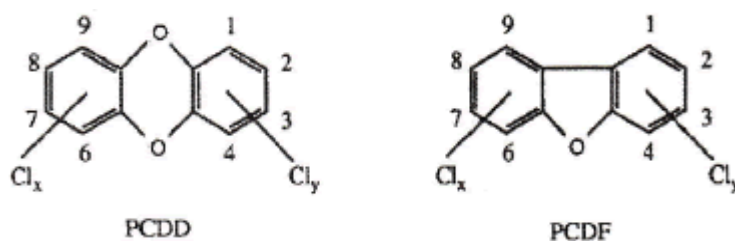


Figura 4. Estructura de dioxinas y furanos. (Giraldo & Ocampo, 2005)

La mayoría de efectos tóxicos y biológicos de estos compuestos están mediados por el receptor de hidrocarburos de arilo (AhR), una proteína receptora citosólica presente en la mayoría de los tejidos de vertebrados con alta afinidad por PCDD/F, cientos de congéneres se forman durante procesos sintéticos como la combustión y ciertas actividades industriales. Por lo que existe una gran exposición humana a estos compuestos, ya sea a través de los alimentos o del medio ambiente. Para expresarlos se dicen que presentan toxicidad similar a la dioxina, comúnmente expresada en equivalentes toxicológicos (EQT), que se define por la suma de los productos de la concentración de cada compuesto multiplicado por su valor de equivalencia toxica y es una estimación de la actividad total similar a la 2,3,7,8-DDTC de la mezcla (Van den Berg, y otros, 2006).

Actualmente, no existe un límite legal establecido para la concentración de dioxinas en fertilizantes a nivel europeo. Sin embargo, las legislaciones nacionales a menudo imponen límites de PCDD/PCDF para los desechos biológicos (Unión Europea, 2019).

Tabla 6. Resumen Metodologías Analíticas para PCDD/F.

Tipo de Compost y/o materia prima	Preparación de la muestra	Concentraciones	Metodología Analítica	Referencia
RSU	Extracción con diclorometano y purificación mediante columna de sílice.	15 ng WHO-TEQ/kg	HRGC/HRMS	(Beníšek, y otros, 2015)
	Extracción Soxhlet con tolueno durante 24h y purificación mediante cromatografía en silicagel.	1,6x10 ² ng I-TEQ/kg		(Grossi, Lichtig, & Krauß, 1998)
	Extracción metanol/tolueno y filtración en columna de Celita.	5,6 ng TEQ/kg		(Elskens, y otros, 2013)
	Extracción acelerada con disolvente y purificación mediante tratamiento acido-base.	2,5 ng WHO-TEQ/kg		(Muñoz, Gómez-Rico, & Font, 2014)
	Extracción con tolueno y purificación con columna de sílice.	83,1 ng WHO-TEQ/kg		(Rigby, y otros, 2015)
CE	Extracción con disolventes orgánicos (hexano ,acetona, etanol ...etc)	2,05 ng TEQ-I/kg	HRGC/HRMS	(Ng, Chan, & Ma, 2008)
RA	Muestra liofilizada se le realiza una extracción ultrasónica y una elución con columnas de ácido gel de sílice y sulfato de sodio anhidro.	1916 ng TEQ/kg	HRGC/HRMS	(Huang, y otros, 2019)
	Extracción acelerada por solvente (ASE) con n-hexano a 100°C.	0,74 ng WHO-TEQ/kg		(Brambilla, y otros, 2016)

¹Compost de Residuos Sólidos Urbanos (RSU); ²Compost de Estiércol (CE); ³Compost de Residuos de alimentos (RA); ⁴Cromatografía de gases/espectrometría de masas de alta resolución (HRGC/HRMS).

Como se refleja en la tabla 6, se utilizaron varios métodos analíticos avanzados para realizar un análisis total de muestras de compost para determinar la posible presencia y concentración de dibenzodioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados. En particular, se ha introducido la cromatografía de gases acoplada a la espectrometría

de masas de alta resolución, un método muy sofisticado caracterizado por la capacidad de distinguir trazas de compuestos orgánicos con una óptima precisión. La cromatografía de gases constituye la base de un proceso que permite la separación eficiente de compuestos en muestras de compost (Elskens, y otros, 2013) (Beníšek, y otros, 2015). Luego, estos compuestos aislados se analizan en detalle mediante espectrometría de masas de alta resolución, que proporciona una resolución y una identificación precisa de los iones producidos durante la ionización de los compuestos en estudio (Muñoz, Gómez-Rico, & Font, 2014). Para la preparación de la muestra se observa que se recurre al método de patrón interno con intención de enriquecer la concentración, además de extracciones mediante disolventes orgánicos.

Como se observa en la tabla 6, el tipo de compost que más presenta este tipo de contaminación, son los derivados de residuos, como los residuos sólidos urbanos y de alimentos. Por otro lado, también se observa que el compost de estiércol contiene un importante efecto sobre el suelo, después de su aplicación, por lo que también es un causante de esa contaminación que presentan los suelos agrónomos, aunque se encuentran en concentraciones inferiores.

➤ Bifenilos policlorados (PCB)

Los PCBs son sustancias cloradas sintéticas de elevada toxicidad, cada uno de los cuales consta de dos anillos bencénicos y de uno a diez átomos de cloro, se forman mediante la cloración de diferentes posiciones del bifenilo, en total 10, según la posición de esos átomos de cloro se determinan las propiedades .

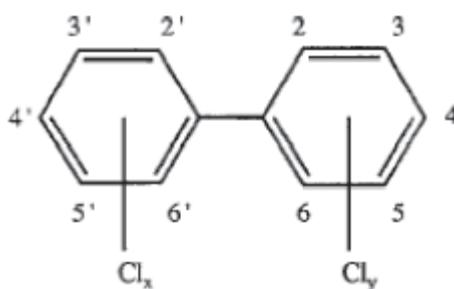


Figura 5. Estructura de PCB. (Giraldo & Ocampo, 2005)

Los Bifenilos Policlorados (PCB) exhiben propiedades similares a las dioxinas, caracterizadas por su alta estabilidad, limitada solubilidad en medios acuosos,

incombustibilidad y una notoria resistencia a la degradación tanto física, química como biológica (Giraldo & Ocampo, 2005). Estas particularidades permiten su detección y evaluación comparativa, especialmente en el análisis de su concentración en matrices de muestra, tal como se muestra en este caso con el compost.

En este contexto, el estudio llevado a cabo por Beníšek y otros en 2015, se enfocó en la comparación de las concentraciones de 2,3,7,8-tetraclorodibeno-p-dioxina (2,3,7,8-TCDD o TEQ_{bio}) con las concentraciones de PCB, a través de ensayos *in vitro* en extractos crudos de diversos tipos de compost. Esto se debe a la carencia de métodos analíticos internacionalmente reconocidos para la determinación precisa del contenido de PCB en el compost. Cabe destacar que los Compuestos Orgánicos Persistentes (COP), como los PCB, tienden a acumularse en la materia orgánica del compost, dificultando su extracción debido a sus propiedades físico-químicas particulares.

Otro enfoque analítico empleado en la evaluación de concentraciones de PCB en el compost es la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, que consta en ser uno de los métodos analíticos más sensibles y selectivos para la separación, identificación y cuantificación de componentes de mezclas orgánicas complejas (Harvey, 2005), donde la cuantificación de los contaminantes se realiza mediante la utilización de una curva de calibración, como se muestra en el estudio de Barcauskaitė en 2019, que respalda la precisión de este método en la determinación de PCB en muestras de compost.

Tras una parcial revisión bibliográfica, diversos estudios corroboran que los PCB se encuentran en mayor proporción en los residuos urbanos y en mezclas de residuos heterogéneos (Barcauskaitė, 2019) (Brändli, y otros, 2007) (Muñoz, Gómez-Rico, & Font, 2014) (Grossi, Lichtig, & Krauß, 1998). Estos resultados resaltan la importancia de una gestión adecuada de estos residuos para mitigar la presencia y dispersión de los PCB en el medio ambiente

4.2. Contaminantes emergentes: Microplásticos.

Los microplásticos representan partículas de plástico con dimensiones que oscilan entre 1 y 5000 μm , constituyendo una creciente preocupación en el contexto de la salud del ecosistema (de Souza Machado, y otros, 2018). A pesar de sus variadas aplicaciones, aproximadamente el 80% del plástico producido se divide en seis categorías: polietileno (PE), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), poliuretano (PUR), tereftalato de PE (PET) y poliestireno (PS) (Weithmann, y otros, 2018). Estos diminutos fragmentos de polímero desencadenan efectos tóxicos, dado que han sido detectados tanto en las deposiciones de animales como en los tejidos vegetales, lo que sugiere que las dietas humanas se ven inmersas en la influencia de este contaminante emergente (Chang, y otros, 2022).

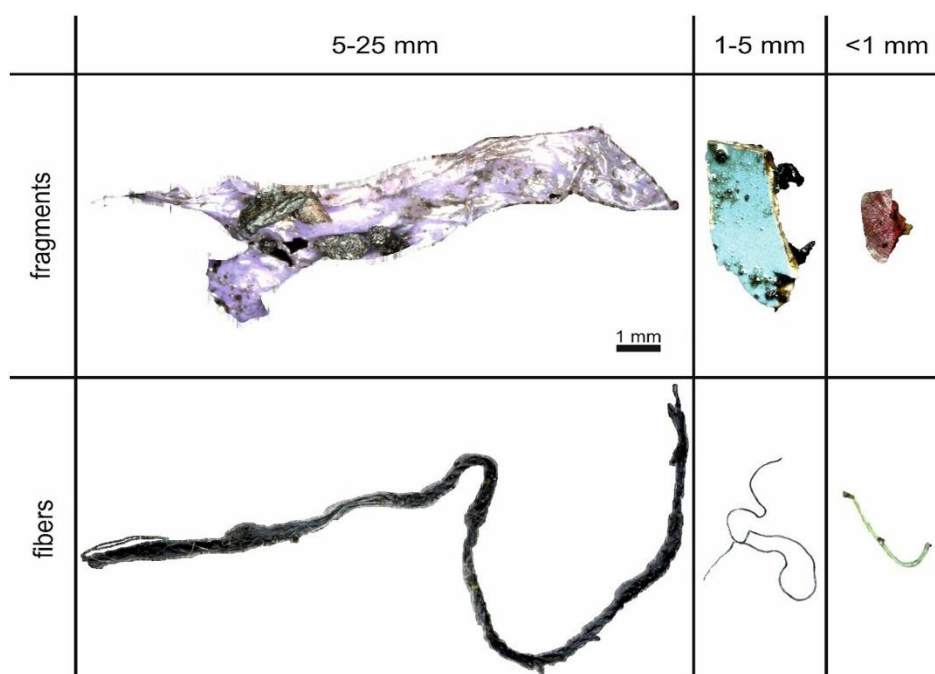


Figura 6. Ejemplos de microplástico en forma de fragmentos y fibras que se encuentran en el compost de desechos domésticos (Braun, y otros, 2021).

Por otra parte, los resultados de concentración de microplásticos se expresan de muchas maneras diferentes en la literatura, lo que dificulta las comparaciones entre los estudios (Colombini, y otros, 2022). Con el fin de poder comparar los resultados, se han expresado la mayoría de ellos en partículas/kg, mientras que los demás solo aparecen en las unidades reflejadas en la tabla 7.

Tabla 7. Tipo de Compost en los que aparecen los Microplásticos y la Metodología Analítica utilizada.

Tipo de Compost y/o materia prima	Tipo de Plástico	Concentración	Preparación de la muestra.	Metodología Analítica	Referencia
RSU	PE y PP	130,1 kg de mp/ hectárea	Eliminación de material orgánica por peroxidación	Py-GC-MS	(Colombini, y otros, 2022)
CE	PE y PP	4333 partículas/kg	Método de separación por densidad y extracción con $ZnCl_2$.	Microscopia FTIR	(Wang, y otros, 2023)
		14720 partículas/kg	Método de separación por densidad con una solución saturada de NaCl.		(Zhang, y otros, 2022)
		300 partículas/kg	Secado en horno $\leq 40^\circ C$ y tamizado húmedo.		(Sa'adu & Farsang, 2023)
		997 partículas/kg	Centrifugado a 3000 rpm y secado durante 24h.		(Beriot, y otros, 2021)
DD	PE y PP	24 partículas/kg	Tamización en húmedo y filtración.	Microscopia FTIR y Microscopio óptico	(Weithmann, y otros, 2018)
		28 partículas/kg	Método de separación por densidad y extracción con $ZnCl_2$.		(Braun, y otros, 2021)
		180 mg/kg	Método de fraccionamiento por densidad.		(Bläsing & Amelung, 2018)

¹Compost de Residuos Sólidos Urbanos (RSU); ²Compost de Estiércol (CE); ³Compost de desechos domésticos (DD); ⁴Pirolisis acoplada a cromatografía de gases/espectrometría de masas (Py-GC-MS); ⁵ Polietileno (PE) y Polipropileno (PP).

La tabla 7 proporciona un resumen de los resultados de diferentes estudios que investigaron la presencia de microplásticos en diferentes tipos de compost. Lo que resalta es la preferencia por dos metodologías analíticas específicas que se han empleado de manera repetida para llevar a cabo este tipo de análisis. La primera de ellas es la cromatografía de gases acoplada a la espectrometría de masas, conocida comúnmente como GC-MS, sumado a la pirolisis analítica. En el que se obtiene información estructural sobre la materia orgánica en el compost sin necesidad de pretratamiento de la muestra. Mediante esta técnica, una cantidad adecuada de calor se utiliza de forma consistente para descomponer los enlaces orgánicos en una

mezcla compleja, transformándolos en moléculas más pequeñas y duraderas. De esta manera, al analizar la estructura de estos nuevos productos, es posible la identificación de la composición original del material, lo que puede relacionar con su origen bioquímico (Rueda, y otros, 2022). Esta técnica, reconocida por su alta sensibilidad y precisión, ha sido ampliamente utilizada en la detección y caracterización de microplásticos en el compost (Colombini, y otros, 2022).

Otro método que se ha utilizado con frecuencia es la microscopia FTIR (Microscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier). Esta técnica mezcla la capacidad de observación microscópica con la espectroscopia infrarroja, permitiendo una identificación más precisa y detallada de los microplásticos presentes en las muestras de compost (Braun, y otros, 2021). Con la utilización de este método se repite un proceso de preparación de la muestra en particular, ese proceso es la separación por densidad, en la que se utilizan diferentes disolventes, el más frecuente ZnCl_2 .

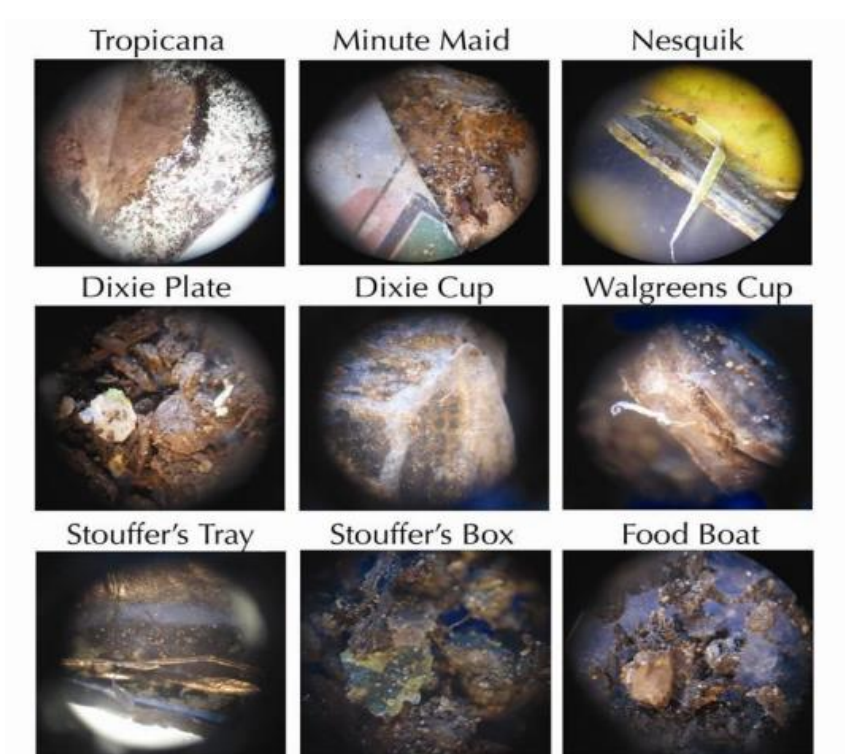


Figure 7. Imágenes al microscopio óptico (30x) de fragmentos residuales en compost a 30x (Brinton, y otros, 2011)

En esta imagen se pueden observar los filamentos de plástico que se encuentra en el compost, mediante un microscopio óptico, es un instrumento analítico que utiliza la luz (fotones) como fuente de iluminación, donde la forma del objeto se puede conocer iluminando la luz sobre él y observando el contorno de la forma de la luz transmitida o reflejada (Yamamoto, 2023), gracias a ello se puede conocer la procedencia del microplástico.

Por otro lado, el plástico ingresa al compost por la eliminación inadecuada de desechos y la basura, así como por el uso de bolsas de plástico convencionales para la recolección de biorresiduos, estos últimos se relacionan con el compost producido a partir de biorresiduos, como consecuencia las plantas de compost reducen la cantidad de plástico en el compost mediante varios procedimientos, incluida la clasificación manual y el tamizado antes y después del compostaje. Sin embargo, el plástico todavía se puede encontrar en el producto final y es tolerado por la mayoría de las empresas (Braun, y otros, 2021). La generación de microplásticos puede ser atribuida en parte al proceso de reciclaje de desechos urbanos, mediante la utilización de compost o lodos de depuradora como enmiendas orgánicas (Colombini, y otros, 2022) (Bläsing & Amelung, 2018). Estos materiales orgánicos a menudo albergan cantidades sustanciales de polímeros sintéticos, contribuyendo así a la propagación de microplásticos en el medio ambiente. Sin embargo, los tipos de microplásticos que en más cantidad se encuentra son el polietileno (PE) y el polipropileno (PP), tal y como se puede ver reflejado en la tabla 7. Son dos de los polímeros plásticos más comunes y utilizados en una variedad de aplicaciones industriales y de consumo, son conocidos por su durabilidad y resistencia, lo que los hace persistentes en el medio ambiente y problemáticos en términos de gestión de residuos, incluido en el compostaje. Para abordar este problema es importante separar adecuadamente los residuos plásticos de los residuos orgánicos antes de iniciar el proceso de compostaje.

Cabe destacar que, aunque existen normativas relacionadas con el umbral de contenido de microplásticos en las enmiendas orgánicas, estas normativas varían entre distintos países y no hacen referencia a las mismas categorías de tamaño de microplásticos. Como resultado, se genera una carencia de conocimiento en cuanto a la naturaleza y las cantidades de microplásticos presentes en diferentes tipos de compost (Colombini, y otros, 2022). Esta falta de estandarización y claridad en las

regulaciones dificulta la evaluación y gestión adecuada de esta preocupante forma de contaminación.

El foco de contaminación más preocupante en el compost son las heces de animales, ya que estos animales ingieren cantidades de plástico que se encuentran en los pastos o atrapadas en la vegetación. Esto ocurre a través del viento, que transporta películas microplásticas como bolsas de plástico, restos de mantillo plástico, escombros de láminas de ensilaje y las deposita en el campo donde se guarda el rebaño (Beriot, y otros, 2021).

5.CONCLUSIONES.

El proceso de compostaje implica la descomposición de la materia orgánica y tiene varios beneficios que están relacionados con la mejora de la calidad del suelo agrícola. Sin embargo, se debe reconocer que la calidad del compost obtenido está estrechamente relacionada con la calidad de las materias primas utilizadas en el proceso. El manejo inadecuado de estas materias primas puede provocar que entren contaminantes en el producto final, lo que genera preocupaciones sobre la seguridad y eficacia de los fertilizantes orgánicos, especialmente el compost.

Es importante destacar que los contaminantes más comunes en el compost son los metales pesados, debido a esto existen regulaciones para poder combatir su presencia en los productos de compost. Las metodologías analíticas más destacadas incluyen tanto la espectrometría de absorción atómica como la espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inducido. Además, se emplean métodos en la preparación de la muestra como la digestión ácida. En particular, se ha observado que el compost derivado de residuos sólidos urbanos tiende a ser más propenso a la contaminación de contaminantes químicos orgánicos e inorgánicos.

Por otro lado, las técnicas más utilizadas para el análisis de contaminantes químicos orgánicos, en este caso los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y los compuestos orgánicos persistentes (COP), incluyen la cromatografía de gases acoplada a la espectrometría de masas y la cromatografía líquida de alta resolución, ambas técnicas requieren una preparación de la muestra que implica extracciones con disolventes orgánicos.

En cuanto a los contaminantes emergentes, como los microplásticos, su determinación se lleva a cabo con un microscopio FTIR, permitiendo identificar con precisión el tipo de plástico presente en la muestra de compost. En la preparación de la muestra, el método más concreto es la separación por densidad, ya que según los estudios es el más preciso. La contaminación por microplástico es más propensa a aparecer en compost de estiércol, debido a la ingesta de ellos por parte de animales que consumen el pasto.

Todo esto se lleva a cabo con el fin de establecer un marco sólido de conocimiento sobre las metodologías analíticas aplicadas en la detección y cuantificación de los contaminantes químicos, biológicos y físicos presentes en el compost.

6. BIBLIOGRAFÍA/REFERENCIAS.

- Alvarenga, P., Mourinha, C., Farto, M., Santos, T., Palma, P., Sengo, J., . . . Cunha-Queda, C. (2015). Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. *Waste Management*, 40, 44-52. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.027>
- Amir, S., Hafidi, M., Merlina, G., Hamdi, H., & Revel, J. (2005). Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons during composting of lagooning sewage sludge. *Chemosphere*, 58, 449-458. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.039>
- Barcauskaitė, K. (2019). Gas chromatographic analysis of polychlorinated biphenyls in compost samples from different origin. *Waste Management & Research*, 556-562. doi:10.1177/0734242X19828156
- Beníšek, M., Kukučka, P., Mariani, G., Suurkuusk, G., Gawlik, B., Locoro, G., . . . Bláha, L. (2015). Dioxins and dioxin-like compounds in composts and digestates from European countries as determined by the in vitro bioassay and chemical analysis. *Chemosphere*, 168-175. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.039>
- Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V., & Lwanga, E. (2021). Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain,. *Science of The Total Environment*, 755. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>
- Bernal, M., Paredes, C., Sánchez-Montero, M., & Cegarra, J. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, 63.
- Bläsing, M., & Amelung, W. (2018). Plastic in soil: Analytical methods and possible sources. *Science of The Total Environment*, 612, 422-435. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086>
- Bohórquez Santana, W. (2019). *El proceso de compostaje*. Universidad de la Salle. Obtenido de destinados Bohórquez Santana, W. (2019). El proceso de compostaje. 1. Universidad de La Salle - Ediciones Unisalle.
- Boletín Oficial del Estado. (2013). *Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes*. Ministerio de la Presidencia.
- Boletín oficial del Estado. (2022). *Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular*. Jefatura del Estado.
- Bonifait, L., Marchand, G., Veillette, M., M'Bareche, H., Dubuis, M.-E., Pépin, C., . . . Duchaine, C. (2017). Workers' exposure to bioaerosols from three different types of composting facilities. 815-822. doi:<https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1335054>
- Bożym, M., & Siemiątkowski, G. (2018). Characterization of composted sewage sludge during the maturation process: a pilot scale study. *Environ Sci Pollut Res*, 25, 34332-34342. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3335-x>
- Brändli, R., Bucheli, T., Kupper, T., Furrer, R., Stahel, W., Stadelmann, F., & Tarradellas, J. (2007). Organic pollutants in compost and digestate. Part 1. Polychlorinated biphenyls, polycyclic aromatic hydrocarbons and molecular markers. *Journal of Environmental Monitoring*, 9, 456-464.
- Brambilla, G., Abate, V., Battaccone, G., De Filippis, S., Esposito, M., Esposito, V., & Miniero, R. (2016). Potential impact on food safety and food security from persistent organic pollutants in top soil improvers on Mediterranean pasture. *Science of The Total Environment*, 543, Part A, 581-590. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.159>
- Braun, M., Mail, M., Hayse, R., & Amelung, W. (2021). Plastic in compost: Prevalence and potential input into agricultural and horticultural soils. *Science of The Total Environment*, 760. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143335>
- Brinton, W., Dietz, C., Bouyouunan, A., & Matsch, D. (2011). Microplastics in Compost: The Environmental Hazards Inherent in the Composting of Plastic-Coated Paper Products. 19.
- Bueno-Márquez, P., Díaz-Blanco, M. J., & Cabrera-Capitán, F. (2008). *Factores que afectan*

- al proceso de Compostaje* (Vols. Capitulo4, bloque 2). Madrid: Mundi-Prensa.
- Campitelli, P. A. (2010). Calidad de compost y vermicompuestos para su uso como enmiendas orgánicas en suelos agrícolas. *Tesis Doctoral en Ciencias Agropecuarias*.
- Campitelli, P., & Ceppi, S. (2008). Effects of composting Technologies on the chemical and physicochemical properties of humic acids. *Geoderma*, 144.
- Chang, X., Fang, Y., Wang, Y., Wang, F., Shang, L., & Zhong, R. (2022). Microplastic pollution in soils, plants, and animals: A review of distributions, effects and potential mechanisms. *Science of the Total Environment*, 850. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.157857
- Colombini, G., Rumpel, C., Houot, S., Biron, P., & Dignac, M.-F. (2022). A long-term field experiment confirms the necessity of improving biowaste sorting to decrease coarse microplastic inputs in compost amended soils. *Environmental Pollution*, 315. doi:https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120369
- Dar, Z., Bhat, J., Qazi, G., Ganie, S., Amin, A., Farooq, S., . . . Rasool, A. (2023). Municipal sewage sludge, aquatic weed compost on soil enzymatic activity and heavy metal accumulation in Kale. *Applied Water Science*, 13. doi: https://doi.org/10.1007/s13201-022-01855-5
- de Souza Machado, A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., & Rillig, M. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biol*, 24, 1405-1416. doi:10.1111/gcb.14020
- Echavarri-Bravo, V., Thygesen, H., & Aspray, T. (2017). Variability in physical contamination assessment of source segregated biodegradable municipal waste derived composts. *Waste Management*, 59, 30-39. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.049.
- Elskens, M., Pussemier, L., Dumortier, P., Vna Langenhove, K., Scholl, G., Goeyens, L., & Focant, J. (2013). Dioxin levels in fertilizers from Belgium: Determination and evaluation of the potential impact on soil contamination. *Science of The Total Environment*, 454-455, 366-372. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.094
- Giraldo, J., & Ocampo, A. (2005). Determinación de precursores de dioxinas y furanos de los gases procedentes de un incinerador en un reactor fotocatalítico. *EIA*, 3, 83-94.
- Grossi, G., Lichtig, J., & Krauß, P. (1998). PCDD/F, PCB and PAH content of brazilian compost. *Chemosphere*, 2153-2160. doi:https://doi.org/10.1016/S0045-6535(98)00277-X
- Harvey, D. (2005). Gas Chromatography | Mass Spectrometry. *Encyclopedia of Analytical Science (Second Edition)*, 106-116. doi:https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00223-5
- Huang, W.-Y., Ngo, H.-h., Lin, C., Vu, C.-T., Kaewlaoyoong, A., Boonsong, T., . . . Chen, J.-R. (2019). Aerobic co-composting degradation of highly PCDD/F-contaminated field soil. A study of bacterial community. *Science of The Total Environment*, 660, 595-602. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.312
- Jhorar, B., Phogat, V., & Malik, R. (1991). Kinetics of composting rice straw with glue waste at different carbon: Nitrogen ratios in a semiarid environment. 297-306. doi: DOI: 10.1080/15324989109381289
- Jiang, B., Tsao, R., Li, Y., & Miao, M. (2014). Food Analysis Technologies/Techniques. (N. Van Alfen, Ed.) *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 273-288. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00052-8
- Johansen, J., Dam, M., Kudjoerdjie, E., Santos, S., Palmqvist, A., Magid, J., & Vestergard, M. (2023). Effects of long-term fertilization with contemporary Danish human urine, composted household waste and sewage sludge on soil nematode abundance and community structure. *Science of The Total Environment*, 860. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160485
- Lazzari, L., Sperti, L., Salizzato, M., & Pavoni, B. (1999). Gas chromatographic determination of organic micropollutants in samples of sewage sludge and compost: Behaviour of PCB and PAH during composting. *Chemosphere*, 38, 1925-1935. doi:https://doi.org/10.1016/S0045-6535(98)00406-8
- Li, H., Sun, Z., Qiu, Y., Yu, X., Han, X., & Ma, Y. (2018). Integrating bioavailability and soil

- aging in the derivation of DDT criteria for agricultural soils using crop species sensitivity distributions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 165, 527-532. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.035.
- Lin, C., Kiprotich Cheruiyot, N., Bui, X.-T., & Hao Ngo, H. (2022). Composting and its application in bioremediation of organic contaminants. *Bioengineered*, 1073-1089. doi:10.1080/21655979.2021.2017624
- Liu, J., Bao, Z., Wang, C., Wei, J., Wei, Y., & Chen, M. (2022). Understanding of mercury and methylmercury transformation in sludge composting by metagenomic analysis. *Water Research*, 226. doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119204
- Liu, W.-R., Zeng, D., She, L., Su, W.-X., He, D.-C., Wu, G.-Y., . . . Ying, G.-G. (2020). Comparisons of pollution characteristics, emission situations, and mass loads for heavy metals in the manures of different livestock and poultry in China. *Science of The Total Environment*, 734. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139023
- Masaguer-Rodríguez, A., & Benito-Capa, M. (2008). *Evaluación de la calidad del compost* (Vol. 7). Madrid: Mundi-Prensa.
- McGowin, A., Adom, K., & Obubuafo, A. (2001). Screening of compost for PAHs and pesticides using static subcritical water extraction. *Chemosphere*, 45, 857-864.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2009). *Manual de Compostaje*. Madrid: Gobierno de España.
- Mondini, C., Fornasier, F., & Sinicco, T. (2004). Enzymatic activity as a parameter for the characterization of the composting process. *Soil Biology Biochemistry*, 36.
- Moretto, L., Silvestri, S., Ugo, P., Zorzi, G., Abbondanzi, F., Baiocchi, C., & Iacondini, A. (2005). Polycyclic aromatic hydrocarbons degradation by composting in a soot-contaminated alkaline soil. *Journal of Hazardous Materials*, 141-148. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.06.020
- Mosquera, B. (2010). *Abonos orgánicos. Protegen el suelo y garantizan alimentación sana. Manual para elaborar y aplicar abonos y plaguicidas orgánicos*. Estados Unidos.
- Muñoz, M., Gomez-Rico, M., & Font, R. (2014). PCDD/F and dioxin-like PCB concentrations during municipal solid waste biomethanation and subsequent composting. *Chemosphere*, 98, 73-77. doi:(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653513013751)
- Nakasaki, K., Nag, K., & Karita, S. (2005). Microbial succession associated with organic matter decomposition during thermophilic composting of organic waste. *Waste Management and Research*, 9. doi:10.1177/0734242X05049771
- Ng, Q., Chan, A., & Ma, S. (2008). A study of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans (PCDD/Fs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in the livestock waste compost of Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 57, 381-391. doi:https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.02.012
- O'Connor, J., Hoang, S., Bradney, L., Dutta, S., Xiong, X., Tsang, D., . . . Bolan, N. (2021). A review on the valorisation of food waste as a nutrient source and soil amendment. *Environmental Pollution*, 272. doi:https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115985.
- Olesik, J. (2014). 15.17 - Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometers. (H. Holland, & K. Turekian, Edits.) *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, 309-336. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.01426-1
- Perihar, P., & Choundhary, R. (2022). Quality Assessment of Composts from different Organic sources. *1084*, 7. doi:10.1088/1755-1315/1084/1/012070
- Rigby, H., Dowding, A., Fernandes, A., Humphries, D., Petch, R., Reynolds, K., . . . Smith, S. (2015). Organic Contaminant Content and Physico-Chemical Characteristics of Waste Materials Recycled in Agriculture. *Agriculture*, 5. doi:https://doi.org/10.3390/agriculture5041289
- Rueda, M., Comino, F., Aranda, V., Domínguez-Vidal, A., & Ayora-Cañada, M. (2022). Analytical pyrolysis (Py-GC-MS) for the assessment of olive mill pomace composting efficiency and the effects of compost thermal treatment. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 168. doi:https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105711
- Sa'adu, I., & Farsang, A. (2023). Plastic contamination in agricultural soils: a review.

doi:10.1186/s12302-023-00720-9

- Sadzawka R., A., Carrasco R., M., Grez Z., R., & Mora G., M. (2005). *Métodos de Análisis de Compost*. Santiago de Chile: Ministerio de agricultura.
- Sahan, S., Sahin, U., & Jakubus, M. (2022). Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHS) in Sewage Sludge and Compost by Dispersive Solid-Phase Microextraction (SPME) and Ultra-High Performance Liquid Chromatography (UHPLC) with Diode Array Detection (DAD). *Analytical Letters*, 56, 832-846. doi: <https://doi.org/10.1080/00032719.2022.2106237>
- Sardar, K., Ali, S., Hameed, S., Afzal, S., Fatima, S., Shakoor, M., . . . Tauqeer, H. (2013). Heavy Metals Contamination and what are the impact on living organisms. *Greener Journal of Environmental Management and Public Safety*, 2, 172-179.
- Siles-Castellano, A., López, M., López-González, J., Suárez-Estrella, F., Jurado, M., Estrella-González, M., & Moreno, J. (2020). Comparative analysis of phytotoxicity and compost quality in industrial composting facilities processing different organic wastes. *Journal of Cleaner Production*, 252. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119820>
- Soliva-Torrentó, M., López-Martínez, M., & Huerta-Pujol, Ó. (2008). *Antecedentes y fundamentos del proceso de compostaje*. (Vol. 3). Madrid: Mundi-Prensa.
- Tan, Y., Cao, X., Chen, S., Ao, X., Li, J., Hu, K., . . . Zhao, K. (2023). Antibiotic and heavy metal resistance genes in sewage sludge survive during aerobic composting. *Science of The Total Environment*, 566. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161386>
- Unión Europea. (2003). *Reglamento (CE) nº 2003/2003 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 2003 relativo a los abonos*. doi:DOUE-L-2003-81869
- Union Europea. (2019). *Reglamento (UE) 2019/1021 del Parlamento Europeo y del Consejo de 20 de junio de 2019 sobre contaminantes orgánicos persistentes*. 33.
- Van den Berg, M., Birnbaum, L., Denison, M., De Vito, M., Farland, W., Feeley, M., . . . Peterson, R. (2006). The 2005 World Health Organization Reevaluation of Human and Mammalian Toxic Equivalency Factors for Dioxins and Dioxin-Like Compounds. *Toxicological Sciences*, 93, 223-241. doi:<https://doi.org/10.1093/toxsci/kfl055>
- Visniauskė, I., Barauskaitė, K., Baksienė, E., & Mazeika, R. (2018). Evaluation of contamination levels of different types of composts and their suitability for usage in agriculture. *Zemdirbyste-Agriculture*, 105, 211-220. doi:10.13080/z-a.2018.105.027
- Wang, Y., Liu, L., Cao, S., Yu, J., Li, X., Su, Y., . . . Zhao, Z. (2023). Spatio-temporal variation of soil microplastics as emerging pollutant after long-term application of plastic mulching and organic compost in apple orchards. *Environmental Pollution*, 328. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121571>
- Weithmann, N., Moller, J., Loder, M., Piehl, S., & Laforsch, C. (2018). Organic fertilizer as a vehicle for the entry of microplastic into the environment. *ScienceAdvances*. doi:10.1126/sciadv.aap8060
- Xiong, R., Gao, X., Tu, X., Mao, Y., Jiang, L., Zheng, L., & Du, Y. (2022). Heavy Metal Remediation in Sludge Compost: Recent Progress. *Tech Science Press*, 10. doi:DOI: 10.32604/jrm.2022.017226
- Yamamoto, N. (2023). Chapter 6 - Analytical Methods. (N. Yamamoto, Ed.) *Fundamentals of Bioarodols Science*, 295-358. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824411-1.00007-7>
- Yang, F., Wang, X., Tian, X., Zhang, Z., Zhang, K., & Zhang, K. (2023). Cow manure simultaneously reshaped antibiotic and metal resistome in the earthworm gut tract by metagenomic analysis. *Science of The Total Environment*, 856, part 1. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159010>
- Zhang, J., Wang, X., Xue, W., Xu, L., Ding, W., Zhao, M., . . . Chen, Y. (2022). Microplastics pollution in soil increases dramatically with long-term application of organic composts in a wheat–maize rotation. *Journal of Cleaner Production*, 356. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131889>