

EFICACIA EN LA ELIMINACIÓN DE PATÓGENOS: COMPARACIÓN ENTRE PASTEURIZACIÓN, COMPOSTAJE Y DIGESTIÓN ANAEROBIA. UNA REVISIÓN BASADA EN LA EVIDENCIA.

Autores: Eli Annaert, Jorge Diamantino Miranda, Juanjo Linares, Norbert Nägele, Sara Ortega, Laura Peláez, Cynthia Alcántara

1. RESUMEN

El estiércol ha sido utilizado a lo largo de la historia como el primer y más extendido abono agrícola. En la actualidad, sigue empleándose con ciertos controles motivados por su contenido en nutrientes y microorganismos potencialmente patógenos.

Este subproducto contiene una amplia gama de microorganismos, la gran mayoría beneficiosos para la salud del suelo, incluyendo bacterias, arqueas, virus y parásitos. Sin embargo, algunos de ellos pueden presentar riesgos para la salud humana y animal si el estiércol no se maneja o trata adecuadamente antes de su aplicación a campo. En este sentido, los microorganismos patógenos pueden persistir en el medio ambiente y difundirse a través del agua, del aire y los sistemas agrícolas mediante vías de exposición indirecta.

Además de la presencia de los microorganismos mencionados, las deyecciones animales suelen contener semillas de distintas plantas que se encuentran en perfecto estado de germinación lo que puede dar lugar al crecimiento de especies no deseadas en un determinado cultivo.

Esta revisión evalúa la inactivación de patógenos y, por tanto, la capacidad de suprimir el riesgo asociado para la salud humana y los ecosistemas en tres procesos de tratamiento de estiércol: digestión anaerobia (mesófila y termófila), compostaje y pasteurización.

Se centra, especialmente, en las diferencias en eficacia, velocidad y aplicabilidad general. Los patógenos representativos considerados incluyen *Salmonella* spp., *Escherichia coli*, *Enterococcus* spp., *Clostridium* spp., virus como el parvovirus porcino y el virus de la enfermedad vesicular porcina, y parásitos como los huevos de *Ascaris suum* y ooquistes de *Cryptosporidium parvum*.

Los tres procesos logran reducciones significativas de microorganismos patógenos bajo condiciones adecuadas, alcanzándose para la mayoría la eliminación del riesgo. La digestión anaerobia termófila, el compostaje y la pasteurización muestran niveles de reducción de riesgo ampliamente comparables para la mayoría de las bacterias no formadoras de esporas y virus, mientras que la digestión anaerobia mesófila presenta una inactivación más moderada, especialmente en organismos resistentes. Sin embargo, los 3 procesos evaluados no resultan efectivos frente a bacterias formadoras de esporas.

Por consiguiente, la digestión anaerobia termófila, el compostaje y la pasteurización cumplen de forma equivalente con los requisitos técnicos establecidos en el Reglamento (UE) n.º 142/2011, Anexo V, Capítulo III, Sección 2, d), (i) y (ii).

La digestión anaerobia termófila produce, además, una energía renovable (el biogás), lo que la convierte en una opción sostenible y con una baja huella medioambiental. Ofrece un enfoque

más eficiente en la medida en que presenta un balance energético positivo, es decir, produce más energía de la que consume y es, además, renovable.

En conclusión, los resultados del estudio muestran como la digestión anaerobia termófila, el compostaje y la pasteurización alcanzan resultados equivalentes con niveles de reducción de riesgo comparables para la mayoría de las bacterias no formadoras de esporas y virus. En este sentido, la ventaja de la pasteurización radica en su mayor velocidad de tratamiento, pero no en una mayor cobertura microbiana. Por su parte, la digestión anaerobia mesófila presenta una inactivación más moderada, especialmente en organismos resistentes.

2. INTRODUCCIÓN

El estiércol animal contiene una comunidad microbiana amplia. Algunos de los microorganismos presentes pueden ser patógenos. Entre ellos, se encuentran bacterias Gram negativas como *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. y *Campylobacter* spp., bacterias Gram positivas como *Listeria monocytogenes* y *Enterococcus* spp., así como virus como el parvovirus porcino y el virus de la enfermedad vesicular porcina, y parásitos como los huevos de *Ascaris suum*. Estos patógenos están asociados con enfermedades gastrointestinales y, en algunos casos, con infecciones más graves en humanos y animales [1].

La supervivencia y la prevalencia de estos microorganismos varían considerablemente en función de la especie y del entorno, incluyendo la temperatura y las condiciones de almacenamiento, como se muestra en la Tabla 1 [1], [2].

Tipo de patógeno	Prevalencia (%)	Supervivencia (días)	Temperatura de almacenamiento (°C)	Enfermedades / Síntomas
<i>E. coli</i> O157:H7	16	10 a >100	5 a 30	Diarrea leve a sanguinolenta, vómitos, síndrome urémico hemolítico, colitis hemorrágica
<i>Salmonella typhimurium</i> , <i>Salmonella dublin</i>	0 a 13	28 a 196	5 a 30	Salmonelosis
<i>Campylobacter</i> spp.	31.1	7 a 21	5 a 30	Campilobacteriosis, síndrome de Guillain-Barré, artritis reactiva y síndrome de intestino irritable postinfeccioso
<i>Listeria monocytogenes</i>	24.4	168	<20	Listeriosis, síntomas gripales, vómitos, diarrea, meningitis, septicemia, abortos espontáneos
<i>Yersinia enterocolitica</i>	<1	10 a 100	5 a 30	Yersiniosis, diarrea, linfadenitis, neumonía, abortos
<i>Cryptosporidium parvum</i>	1 a 100	28 a 56	5 a 30	Gastroenteritis y criptosporidiosis
<i>Giardia lamblia</i>	10 a 100	7	5 a 30	Giardiasis (diarrea y calambres abdominales)

Tabla 1: Tasa de supervivencia y síntomas de diferentes patógenos en estiércol bovino [1]

Una vez liberados, los patógenos presentes en el estiércol pueden persistir y dispersarse a través de diferentes vías ambientales. Tras la aplicación al suelo, los microorganismos pueden ser transportados a aguas superficiales mediante la escorrentía o infiltrarse en aguas subterráneas. El contacto directo con el estiércol, así como la dispersión por vía aérea también pueden

contribuir a la exposición [3], [4], [5], [6]. Estas vías de transporte se ilustran en la Figura 1. En consecuencia, el riesgo para la salud humana y animal depende no solo de la presencia de patógenos en el estiércol, sino también de su persistencia, movilidad y condiciones del entorno, como la temperatura, la disponibilidad de nutrientes y aceptores de electrones.

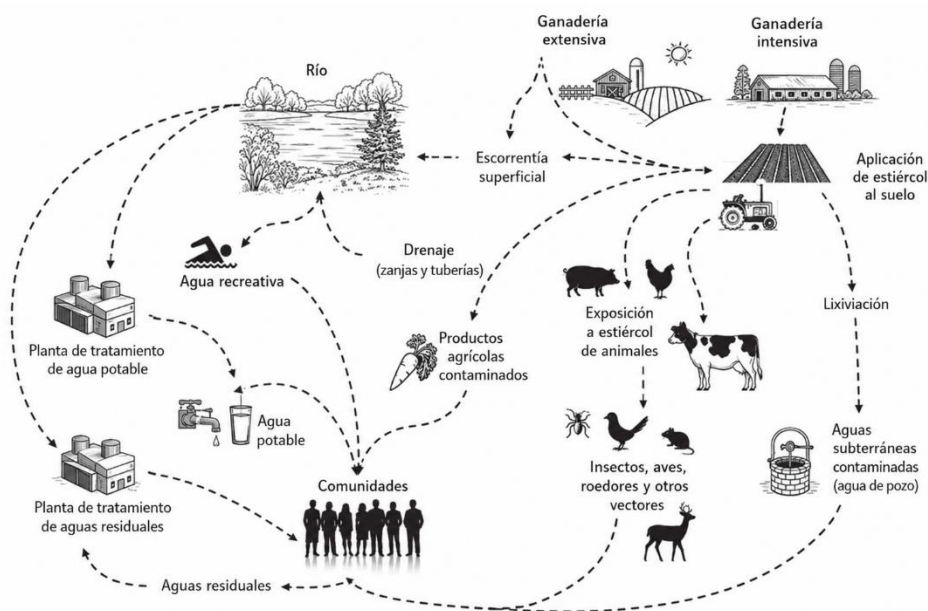


Figura 1: Vías de transporte de contaminantes microbianos procedentes de explotaciones ganaderas intensivas y extensivas hacia aguas superficiales y subterráneas [3]

En la práctica agrícola, el estiércol se aplica con frecuencia al suelo tras su almacenamiento en condiciones ambientales variables. Sin una higienización adecuada, los patógenos pueden permanecer viables. Esto pone de manifiesto la importancia de establecer procedimientos seguros para su aplicación directa al campo o de implementar tratamientos que reduzcan la carga de patógenos antes de su aplicación al suelo [1], [2], [3].

La eficacia de la reducción de patógenos se expresa comúnmente como una reducción logarítmica, que describe la disminución de los microorganismos viables en relación con su concentración inicial en el estiércol crudo. Una reducción de 1 log corresponde a una disminución del 90 %, una reducción de 2 log corresponde al 99 %, 3 log corresponde al 99,9 % y una reducción de 4 log corresponde al 99,99 % en comparación con el estiércol no tratado.

Además de los requisitos sanitarios generales, la legislación europea establece criterios específicos de higienización para los métodos alternativos, i.e. distintos a la esterilización a presión o la pasteurización. El Reglamento (UE) n.º 142/2011, Anexo V, Capítulo III, Sección 2, d), (i) y (ii), exige que los métodos alternativos de tratamiento demuestren al menos una reducción de 5 log de *Enterococcus faecalis* o *Salmonella Senftenberg*, una reducción mínima de 3 log de parvovirus termorresistentes y al menos una reducción de 3 log de huevos viables de *Ascaris* spp. Estos criterios constituyen un importante punto de referencia para evaluar el rendimiento de higienización de los procesos de digestión anaerobia, compostaje y pasteurización.

El presente artículo tiene por objeto demostrar, desde la perspectiva científica, que la digestión anaerobia termófila alcanza niveles de eliminación de patógenos equivalentes a los de la pasteurización y, por tanto, cumple con todos los criterios específicos de higienización previstos en el Reglamento (UE) n.º 142/2011, Anexo V, Capítulo III, Sección 2, d), (i) y (ii).

Dentro de este marco regulatorio, existen diversas tecnologías de tratamiento disponibles para lograr la higienización del estiércol, cada una caracterizada por distintos mecanismos de reducción de patógenos, demandas energéticas e implicaciones prácticas. El presente estudio

se centra en la digestión anaerobia, el compostaje y la pasteurización, y evalúa sus respectivas capacidades de reducción de patógenos bajo diferentes condiciones operativas.

En consecuencia, el objetivo de este estudio es evaluar y comparar la eficacia de estos tres métodos de tratamiento en la reducción de patógenos presentes en el estiércol, con especial énfasis en su idoneidad como estrategias de higienización. Cada método se analiza por separado en las secciones siguientes, seguido de un análisis comparativo resumido en la Tabla 2.

3. EFECTO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA SOBRE LOS PATÓGENOS

La digestión anaerobia se emplea principalmente como una tecnología para la valorización de residuos a través de la producción de biogás y digerido como fuente de nutrientes para el campo. Aunque la reducción de patógenos no es su objetivo principal, las condiciones del proceso inherentes a la digestión anaerobia, como la temperatura elevada, la competencia microbiana, las concentraciones de amoníaco y el tiempo de retención, dan lugar a una disminución significativa de los microorganismos viables. En comparación con el estiércol sin tratar o únicamente almacenado, la digestión anaerobia proporciona una reducción controlada y medible de la carga de patógenos [7], [8]

El grado de reducción de patógenos durante la digestión anaerobia depende en gran medida de la temperatura y del tiempo de retención. Asimismo, la resistencia microbiana varía entre grupos. Las bacterias Gram negativas, como *E. coli* y *Salmonella spp.*, son generalmente más susceptibles a la inactivación, mientras que las bacterias Gram positivas, como *Enterococcus spp.*, muestran reducciones menores. Las bacterias formadoras de esporas, como *Clostridium spp.*, son particularmente resistentes y pueden mostrar poca o ninguna reducción incluso en condiciones termófilas, como se indica en el **Anexo I: Reducción logarítmica en digestión anaerobia bajo diferentes condiciones**. Sin embargo, esta limitación no es exclusiva de la digestión anaerobia y también se observa en otros métodos de tratamiento, como la pasteurización [9].

En condiciones termófilas, entre 50 y 56 °C, la inactivación de patógenos es rápida y sustancial. Un metaanálisis de Álvarez Fraga et al. (2025) indica una reducción media en relación con el estiércol crudo de aproximadamente 4 log para bacterias Gram negativas y de 2,7 log para bacterias Gram positivas. Estudios experimentales muestran que *Escherichia coli* puede reducirse por debajo del límite de detección (LOD) en cuestión de minutos a horas a estas temperaturas [10]. En el caso de los virus entéricos, la digestión termófila logra reducciones de aproximadamente 2,0 log según el metaanálisis de Álvarez Fraga et al. (2025). Con respecto a los requisitos de higienización del Reglamento (UE) n.º 142/2011, las condiciones termófilas pueden reducir todos los patógenos objetivo en un período que varía de horas a días. Se ha observado la eliminación completa de *Salmonella Senftenberg* después de 6,1 horas, mientras que *Enterococcus faecalis* puede eliminarse tras aproximadamente 5,5 horas [8]. En el caso de los virus termorresistentes, los estudios indican que los parvovirus pueden inactivarse completamente en condiciones termófilas en aproximadamente dos días [11]. Para los organismos parasitarios, la digestión termófila alcanza reducciones de más de 2 a 5 log para ooquistes de *Cryptosporidium* y de más de 2 log para huevos de *Ascaris suum*, con inactivación completa reportada a 55°C en cuestión de horas [12], [13].

En condiciones mesófilas, entre 35 y 40°C, la reducción de patógenos es menor, pero sigue siendo significativa cuando se aplica un tiempo de retención suficiente. Las reducciones reportadas suelen oscilar entre 1,6 y 2,0 log para organismos como *E. coli* y bacterias coliformes, lo que corresponde a una reducción de aproximadamente entre el 96 % y el 99 % en comparación con el estiércol crudo [14], [15]. Aun así, puede lograrse una inactivación completa, aunque generalmente requiere periodos de tratamiento de varias semanas [16]. En el caso de los virus

entéricos, la digestión mesófila alcanza reducciones más moderadas, normalmente en el rango de aproximadamente 1,4 a 1,9 log para indicadores como los bacteriófagos somáticos tras tiempos de retención prolongados. Al examinar los patógenos especificados en la normativa, se observa que las condiciones mesófilas no son tan ineficaces o requieren tiempos de retención muy prolongados para alcanzar las reducciones requeridas. Para *Salmonella Senftenberg* se ha reportado una reducción de 2,2 log en dos semanas [17], mientras que *Enterococcus faecalis* solo alcanza una reducción de entre 1 y 1,5 log en 20 días [18]. En el caso de los parvovirus, las condiciones mesófilas pueden ser efectivas, pero se requiere un tiempo de retención prolongado de aproximadamente 10 días para eliminar el virus [11]. Para los organismos parasitarios, la digestión mesófila logra reducciones de 0,9 a 1,5 log para ooquistes de *Cryptosporidium* tras 6 días, y aproximadamente 1 log para huevos de *Ascaris suum* después de 10 días [12].

4. EFECTO DEL COMPOSTAJE SOBRE LOS PATÓGENOS

El compostaje representa otro método ampliamente aceptado para el tratamiento del estiércol. Durante el compostaje, la actividad microbiana aerobia genera temperaturas entre 55 y 70 grados Celsius, lo que resulta en una inactivación rápida de patógenos. Los estudios reportan reducciones de *Escherichia coli*, *Salmonella spp.* y *Listeria spp.* hasta niveles no detectables en cuestión de días a temperaturas superiores a 55°C, como se resume en el

Anexo II: Reducción logarítmica en compostaje bajo diferentes condiciones [19], [20]. Bacterias Gram positivas como *Enterococcus spp.* muestran reducciones de 3,8 log tras 1 día entre 60–70°C [15]. En el caso de los virus, los resultados son variables: el norovirus murino y el virus Aichi se reducen en más de 4 y 3,1 log respectivamente en 2 a 5 días entre 55–70°C, mientras que el adenovirus humano requiere de 5 a 7 días para alcanzar una reducción de 2,1 log [21]. El virus de la influenza aviar se inactiva en un plazo de 7 días incluso en un rango de temperatura tan bajo como 35–55°C [22]. Los organismos parasitarios, incluidos *Giardia* y *Cryptosporidium parvum*, se reducen por debajo del límite de detección después de 42 a 56 días a temperaturas superiores a 55°C [23]. De forma similar a la digestión anaerobia, tras el proceso de compostaje las bacterias formadoras de esporas como *Bacillus licheniformis* y *Clostridium sporogenes* no muestran reducción [24].

El compostaje también puede cumplir con los criterios de higienización establecidos en el Reglamento (UE) n.º 142/2011 cuando se mantienen temperaturas suficientemente altas y homogéneas en toda la masa de compost. Los estudios indican que organismos resistentes como *Salmonella Senftenberg* y los huevos de *Ascaris suum* generalmente requieren aproximadamente cuatro semanas de compostaje termófilo para lograr su eliminación completa [25]. De manera similar, los parvovirus termorresistentes pueden requerir periodos de tratamiento de hasta 28 días para una inactivación suficiente [11]. Sin embargo, la eficiencia del tratamiento depende en gran medida de la distribución de la temperatura, la aireación y la posición del material dentro de la pila de compost. Bonjoch et al. 2009 reportaron únicamente una reducción de 3 a 4 log para *Enterococcus spp.*, lo que queda por debajo de la reducción de 5 log exigida por el Reglamento (UE) n.º 142/2011. En consecuencia, generalmente se requieren periodos de tratamiento más largos y un control operativo estricto para garantizar una higienización uniforme del material.

5. EFECTO DE LA PASTEURIZACIÓN SOBRE LOS PATÓGENOS

La pasteurización se aplica con frecuencia como una etapa adicional de higienización, normalmente a 70 °C durante un mínimo de 60 minutos. Este tratamiento se considera un método de referencia en la normativa europea, incluyendo el Reglamento Delegado (UE) 2023/1605,

para garantizar la higienización y establecer el fin de la cadena de fabricación de abonos orgánicos y enmiendas certificadas. Los datos detallados sobre la reducción logarítmica bajo diferentes condiciones de pasteurización se resumen en el **Anexo III: Reducción logarítmica en pasteurización bajo diferentes condiciones**.

Para bacterias sensibles al calor, la pasteurización puede ser altamente efectiva. Varios estudios reportan reducciones de *Escherichia coli* y *Salmonella spp.* hasta niveles no detectables en un intervalo de 30 a 60 minutos a 70°C [9], [26]. Bacterias Gram positivas como *Enterococcus spp.* se reducen en 2,8 log a 70°C durante 1 hora [15]. Además, *Salmonella Senftenberg* y *Enterococcus faecalis* pueden eliminarse en aproximadamente 15 minutos [27].

En el caso de los organismos parasitarios, la pasteurización es altamente eficaz: los ooquistes de *Cryptosporidium parvum* se reducen hasta niveles no detectables a 71,7°C entre 5 y 15 segundos [28], y los huevos de *Ascaris suum* se inactivan completamente a 70°C en 5 minutos [29].

En el caso de los virus, se observa una inactivación sustancial durante el tratamiento térmico a 70°C durante 60 minutos, con reducciones reportadas de aproximadamente 3,2 log para el parvovirus porcino, más de 6 log para el virus de la enfermedad vesicular porcina y alrededor de 3,9 log para los bacteriófagos somáticos [9], [15], [26].

Sin embargo, la eficacia de la pasteurización no es uniforme entre todos los grupos microbianos. En este sentido, las bacterias formadoras de esporas como *Clostridium spp.* muestran reducciones inferiores a 1 log incluso a 70°C durante 1 hora [9], [26], [30].

6. COMPARACIÓN ENTRE TÉCNICAS DE TRATAMIENTO

La Tabla 2 presenta un análisis comparativo de las reducciones de patógenos logradas bajo condiciones de digestión anaerobia mesófila y termófila, pasteurización y compostaje. Al comparar estas técnicas de tratamiento, emergen varias diferencias importantes en términos de reducción de patógenos.

La digestión anaerobia termófila logra reducciones de hasta 4 log para bacterias Gram negativas y aproximadamente 2,7 log para bacterias Gram positivas [7]. Estas reducciones son comparables a las observadas durante la pasteurización, como la reducción de 2,8 log reportada para *Enterococcus spp.* a 70°C [15].

La pasteurización logra reducciones de patógenos en cuestión de minutos a horas frente a tiempos de retención de días a semanas requeridos en la digestión anaerobia o el compostaje. En este sentido, la pasteurización puede considerarse más eficaz en términos de velocidad de tratamiento, pero no supone una ventaja frente a una mayor cobertura con respecto a la eliminación de patógenos. Ninguno de los tres métodos consigue la inactivación completa de bacterias formadoras de esporas, y todos muestran una eficacia variable frente a los virus, lo cual no supone un incumplimiento frente a lo exigido por el Reglamento (UE) n.º 142/2011, Anexo V, Capítulo III, Sección 2, d), (i) y (ii).

Cuando la digestión anaerobia opera bajo condiciones termófilas controladas, puede alcanzar niveles de higienización iguales a los de la pasteurización, al tiempo que reduce patógenos y recupera energía en forma de biogás. La pasteurización, en cambio, es una etapa de procesamiento independiente que requiere un aporte energético externo.

Como se indicó en la introducción, el Reglamento (UE) n.º 142/2011 establece criterios específicos de reducción logarítmica para los métodos alternativos de higienización, incluyendo reducciones de 5 log para *Enterococcus faecalis* o *Salmonella Senftenberg*, 3 log para parvovirus termorresistentes y 3 log para huevos viables de *Ascaris spp.*

Se ha demostrado que la digestión anaerobia termófila cumple con los tres criterios. Para *Salmonella Senftenberg*, Seruga et al. 2020 muestran una eliminación completa (<LOD) en aproximadamente 6,1 horas en condiciones termófilas (50–56°C). Para *Enterococcus faecalis*, el mismo estudio presenta una eliminación completa en aproximadamente 5,5 horas en condiciones termófilas. Sin embargo, la digestión mesófila es insuficiente para los tiempos de retención publicados en la bibliografía, alcanzando solo alrededor de 1 log de reducción según Bonjoch et al. 2009.

En cuanto a los parvovirus, Monteith et al. 1986 informan de una inactivación completa en aproximadamente 2 días en condiciones termófilas, frente a aproximadamente 10 días en condiciones mesófilas. Finalmente, para los huevos de *Ascaris suum*, tanto Jiang et al. 2020 como Seruga et al. 2020, confirman una inactivación completa entre 0,5 y 10 horas en condiciones termófilas mientras que la digestión mesófila no garantiza una reducción suficiente en los tiempos de retención reportados.

En aplicaciones de compostaje, también se alcanzan reducciones equivalentes a la pasteurización si el tiempo de tratamiento es suficientemente largo (en torno a cuatro semanas).

Dadas estas diferencias, la inclusión de una etapa de pasteurización independiente generalmente no es necesaria para cumplir con los objetivos de higienización de la normativa vigente. A diferencia de la pasteurización, la digestión anaerobia termófila no requiere de un aporte de energía adicional externo. En este sentido, el cambio de temperatura de rango mesófilo a termófilo reduce los tiempos de permanencia requeridos para maximizar el aprovechamiento energético de los residuos (máximo potencial metanogénico).

Por tanto, el enfoque más eficiente y sostenible con respecto a la higienización en plantas de biogás consiste en optimizar los parámetros de la digestión anaerobia, principalmente la temperatura y el tiempo de retención, para garantizar un tratamiento seguro y eficaz sin necesidad de aportar energía externa al proceso.

7. CONCLUSIÓN

Esta revisión demuestra que la digestión anaerobia termófila, el compostaje y la pasteurización son métodos equivalentes e igualmente eficaces para reducir la carga de patógenos en el estiércol animal y, por tanto, cumplir con todos los criterios específicos de higienización previstos en el Reglamento (UE) n.º 142/2011, Anexo V, Capítulo III, Sección 2, d), (i) y (ii).

Su rendimiento únicamente varía en función de las condiciones del proceso. Así, la interacción entre temperatura y tiempo emergen como los factores clave que determinan la inactivación de patógenos en todos los métodos de tratamiento.

La digestión anaerobia termófila logra reducciones consistentemente elevadas, con niveles equivalentes a los de la pasteurización y compostaje. En particular, la inactivación rápida de parásitos bajo condiciones termófilas sugiere que no son necesarios tiempos de retención prolongados para lograr una higienización eficaz. En contraste, según los datos analizados en este estudio, tras periodos de operación inferiores a 20 días, la digestión mesófila no alcanza niveles de higienización requeridos por la normativa aplicable. Sin embargo, no se dispone de datos de eliminación tras tiempos de retención entre 60 y 90 días, habituales en régimen mesófilo.

La pasteurización puede considerarse más eficiente en términos de velocidad de tratamiento, pero no supone una ventaja frente a una mayor cobertura con respecto a la eliminación de patógenos. En aplicaciones de compostaje, también se alcanzan reducciones elevadas equivalentes a la pasteurización.

Además de la reducción de patógenos, la digestión anaerobia ofrece la ventaja significativa de la recuperación de energía en forma de biogás. En conjunto, los resultados indican que la digestión anaerobia termófila puede proporcionar una higienización robusta mientras genera simultáneamente energía, lo que la convierte en una alternativa altamente eficiente y sostenible frente a los tratamientos térmicos convencionales.

Reducción logarítmica	Digestión mesófila		Digestión termófila		Pasteurización (70°C - 1 h)		Compostaje (55–70°C)	
Gram negativas	Coliformes 30 días [14], [37]	1,6	Meta-análisis grupo gram negativas [7]	4,0	<i>E. Coli</i> [9], [15], [26], [30]	< LOD	Coliformes fecales 56 días [24], [37]	2,5
	<i>Salmonella</i> spp. 40 días [15], [37]	1,6	<i>Salmonella</i> spp.1 día [34]	< LOD			<i>E. coli</i> 1 día [15], [37]	2,5
	<i>E. coli</i> 30 días [14], [37]	2,0	<i>E. coli</i> 3 horas [10], [37]	< LOD			<i>E. coli</i> 3 días [35]	< LOD
	<i>E. coli</i> 41 días [16]	6						
Gram positivas	<i>Salmonella Senftenberg</i> 14 días [17]	2,23	<i>Salmonella Senftenberg</i> 6,06 h [8]	< LOD	<i>Salmonella Senftenberg</i> 15 min [27]	< LOD	<i>Salmonella Senftenberg</i> 28 días [25]	< LOD
	Meta – análisis grupo gram positivas [7]	1,4	Meta – análisis grupo gram positivas [7]	2,7	<i>Enterococcus faecalis</i> 1 día [30]	1,8	<i>Enterococcus faecalis</i> 6 meses [18]	3 - 4
					<i>Enterococcus faecalis</i> 15 min [27]	< LOD	<i>Listeria</i> spp. 4 días [37]	< LOD
	<i>Enterococcus</i> spp. 30 días [14], [37]	1,9	<i>Enterococcus</i> spp. 5,5 h [8]	< LOD	<i>Enterococcus</i> spp. [15]	2,8	<i>Mycobacterium Paratuberculosis</i> 3 días [19]	< LOD
	<i>Enterococcus</i> spp. 20 días [18]	1					<i>Enterococcus</i> spp. 7 días [24], [37]	< LOD
Gram positivas + esporas	Sin reducción [7], [15]		Meta – análisis grupo gram positivas + esporas [7]	< 1,0	<i>Clostridium perfringens</i> 1 día [30]	< 1,0	<i>Bacillus licheniformis</i> [24]	Sin reducción
							<i>Clostridium sporogenes</i> [24]	Sin reducción
Virus entéricos	Bacteriófagos somáticos 40 días [15]	1,4	Meta – análisis virus entéricos [7]	2,0	Bacteriófagos somáticos [15]	3,9	Norovirus murino 5 días [21]	> 4
	Parvovirus 10 días [11]	< LOD	Parvovirus 2 días [11]	< LOD	Virus de la parvovirus porcina [9]	3,2	Parvovirus 28 días [18]	< LOD
	Meta – análisis virus entéricos [7]	1,9			Virus de la enfermedad vesicular porcina [9]	> 6,0	Adenovirus humano 5 – 7 días [21]	2,1
Organismos parasitarios	Ooquistes de <i>Cryptosporidium parvum</i> 6 días [12]	0,9 – 1,5	Ooquistes de <i>Cryptosporidium parvum</i> 1 h – 4 h [12], [13]	> 2,0 - 5	Ooquistes de <i>Cryptosporidium</i> 5 – 15s [28]	< LOD	Ooquistes de <i>Cryptosporidium</i> 42 – 56 días [23]	< LOD
	Huevos de <i>Ascaris suum</i> 10 días [12]	1	Huevos de <i>Ascaris suum</i> 30 min – 24h [8], [12], [16], [31], [34], [38]	< LOD	Huevos de <i>Ascaris suum</i> 1 min [29]	< LOD	<i>Giardia</i> 42 – 56 días [23]	< LOD

Tabla 2: Reducción logarítmica de patógenos durante la digestión anaerobia, la pasteurización y el compostaje (elaboración propia).

El metaanálisis agrupa los patógenos según su clasificación microbiológica: las bacterias Gram negativas están representadas principalmente por *Escherichia coli*, las bacterias Gram positivas por *Enterococcus* spp., las bacterias formadoras de esporas por *Clostridium perfringens* y los virus por colifagos somáticos.

LOD: límite de detección (ausencia detectable).

Reducción logarítmica: 1 log = 90%, 2 log = 99%, 3 log = 99,9%, 4 log = 99,99%.

ANEXO

Leyenda (aplicable a todos los anexos):

(+) Bacterias Gram positivas

(-) Bacterias Gram negativas

(P) Condiciones psicrófilas (15–25 °C)

(M) Condiciones mesófilas (35–40 °C)

(T) Condiciones termófilas (50–56 °C)

LOD: Límite de detección

Anexo I: Reducción logarítmica en digestión anaerobia bajo diferentes condiciones

Fuente	Animal	Microorganismo	Temperatura (°C)	Tiempo de tratamiento	Reducción logarítmica
Kearney et al., 1993 [32]	Ganado	<i>Yersinia enterocolitica</i> (-)	28	18 días	1
		<i>Listeria monocytogenes</i> (+)		28 días	
		<i>Salmonella typhimurium</i> (-)		35 días	
		<i>Escherichia coli</i> (-)		77 días	
		<i>Campylobacter jejuni</i> (-)		439 días	
Côté et al., 2006 [33]	Cerdos	Coliformes totales (-)	20 (P)	20 días	< LOD
		<i>Escherichia coli</i> (-)			
		<i>Salmonella spp.</i> (-)			
		<i>Cryptosporidium spp.</i> (parásito)			
		<i>Giardia spp.</i> (parásito)			
Aitken et al., 2007 [10]	Ganado	<i>Escherichia coli</i> (-)	50 (T)	3 horas	< LOD
		<i>Escherichia coli</i> (-)	55 (T)	10 min	
Pandey & Soupir, 2011 [16]	Ganado	<i>Escherichia coli</i> (-)	25	> 60 días	< LOD
			37 (M)	> 41 días	6
			52,5 (T)	< 4 días	< LOD
McCarthy et al., 2015 [14]	Cerdos	Coliformes (-)	35 – 40 (M)	30 días	1,6
		<i>Escherichia coli</i> (-)			2,0
		<i>Enterococcus spp.</i> (+)			1,9
Hoeksma et al., 2015 [15]	Cerdos	<i>Escherichia coli</i> (-)	35 – 40 (M)	40 días	2,5
		<i>Salmonella spp.</i> (-)			1,6
		Colifagos somáticos (Virus)			1,4

Fuente	Animal	Microorganismo	Temperatura (°C)	Tiempo de tratamiento	Reducción logarítmica
		<i>Enterococcus spp.</i> (+)			No se observa una reducción significativa
		<i>Clostridium difficile</i> (+, esporas)			Sin reducción
Álvarez-Fraga et al., 2025 [7]	Metaanálisis	Bacterias gramnegativas	15 – 25 (P)	Metaanálisis	1,8
			35 – 39 (M)		2,0
			50 – 56 (T)		4,0
		Bacterias grampositivas	15 – 25 (P)		1,0
			35 – 39 (M)		1,4
			50 – 56 (T)		2,7
		Bacterias grampositivas formadoras de esporas	15 – 25 (P)		Sin reducción
			35 – 39 (M)		Sin reducción
			50 – 56 (T)		< 1,0
		Virus	15 – 25 (P)		1,0
			35 – 39 (M)		1,9
			50 – 56 (T)		2,0
Kato et al., 2003 [12]	Desconocido	Ooquistes de <i>Cryptosporidium</i> (parásito)	37 (M),	6 días	0,9 – 1,5
			47	2 días	> 2
			55 (T)	1 h	> 2
		Huevos de <i>Ascaris suum</i> (parásito)	37 (M)	10 días	1 log
			47	2 días	2 log
			55 (T)	2 h	2 log
Vermeulen et al., 2017 [13]	Desconocido	Ooquistes de <i>Cryptosporidium</i> (parásito)	35 – 39 (M)	4 h	2 log
			50 – 56 (T)		5 log
Pandey et al., 2011 [16]	Ganado	Huevos de <i>Ascaris suum</i> (parásito)	50 – 56 (T)	30 min – 2h	> 3
Seruga et al. 2020 [8]	Residuos municipales y alimentarios	Huevos de <i>Ascaris suum</i> (parásito)	50 – 56 (T)	10 h	< LOD
		<i>Enterococcus spp</i> (+)		5,5 h	< LOD
		<i>Salmonella</i> Senftenberg (-)		6,06 h	< LOD
Jiang et al., 2020 [31]	Desconocido	Huevos de <i>Ascaris suum</i> (parásito)	37 (M)	10 días	0,6
			40°C	12 días	< LOD
			51–55,5 (T)	0,5 – 4 h	< LOD
		Poliovirus	51 – 55,5 (T)	0,5 – 4h	< LOD
Plym-Forshell 1995 [34]	Ganado	<i>Salmonella</i> (-)	55 (T)	1 día	< LOD
		Huevos de <i>Ascaris suum</i> (parásito)			
Horan et al. 2004 [17]	Lodo	<i>Salmonella</i> Senftenberg (-)	35 – 39 (M)	14 días	2,23
Bonjoch et al. 2009 [18]	Lodo	<i>Enterococcus Faecalis</i> (+)	35 – 39 (M)	20 días	1 – 1,5 log
Monteith et al. 1986[11]	Ganado	Parvovirus	35 – 39 (M)	10 días	< LOD
			51 – 55,5 (T)	2 días	

Anexo II: Reducción logarítmica en compostaje bajo diferentes condiciones

Fuente	Animal	Microorganismo	Temperatura (°C)	Tiempo de tratamiento	Reducción logarítmica
Grewal et al., 2006 [19]	Ganado	<i>Escherichia coli</i> (-)	55	3 días	< LOD
		<i>Salmonella spp.</i> (-)			
		<i>Listeria spp.</i> (+)			
		<i>Mycobacterium paratuberculosis</i> (+)			
Fremaux et al., 2007 [20]	Ganado	<i>Escherichia coli</i> productora de toxina Shiga (STEC) (-)	35	90 días	< LOD
			65	9 días	
McCarthy et al., 2015 [14]	Cerdos	<i>Escherichia coli</i> (-)	65 (max.)	7 días	< LOD
		<i>Enterococcus spp.</i> (+)			< LOD
		Coliformes fecales (-)		56 días	2,5
		<i>Bacillus licheniformis</i> (+, esporas)			0
		<i>Clostridium sporogenes</i> (+, esporas)			0
Erickson et al., 2009 [35]	Ganado	<i>E. coli</i> O157:H7 (-)	59 (max.)	3 días	< LOD
		<i>Listeria monocytogenes</i> (+)		4 días	
Hoeksma et al., 2015 [15]	Ganado	<i>Escherichia coli</i> (-)	60–70	1 día	2,5
		<i>Enterococcus spp.</i> (+)			3,8
		Colifagos somáticos (-)			3,9
Elving et al., 2012 [22]	Aves de corral	Avian influenza virus	35 – 55	7 días	< LOD
Wei et al., 2010 [21]	Ganado	Norovirus murino	55 – 60	1 día	0,6
				5 días	> 4
		Virus Aichi	65 – 70	1 día	< LOD
			55 – 60	1 día	1,4
				2 días	> 3,1
			65 – 70	1 día	< LOD

Fuente	Animal	Microorganismo	Temperatura (°C)	Tiempo de tratamiento	Reducción logarítmica
		Adenovirus humano 41	65 – 70	1 día	Sin reducción
				5 – 7 días	2,1
Van Herk et al., 2004 [23]	Ganado	Giardia (parásito)	> 55	42 – 56 días	< LOD
		Ooquistes de <i>Cryptosporidium</i> (parásito)			
Kanarek et al. 2021 [25]	Residuos de cocina	Salmonella Senftenberg (-)	Max 65	28 días	< LOD
		Huevos de <i>Ascaris suum</i> (parásito)			
Bonjoch et al. 2009 [18]	Lodo	<i>Enterococcus faecalis</i> (-)	55°C	6 meses	3 – 4
Monteith et al. 1986 [11]	Ganado	Parvovirus	60°C	28 días	< LOD

Anexo III: Reducción logarítmica en pasteurización bajo diferentes condiciones

Fuente	Animal	Microorganismo	Temperatura (°C)	Tiempo de tratamiento	Reducción logarítmica
Turner, 2001 [36]	Cerdos	<i>Escherichia coli</i> (-)	55	2 h	< LOD
Sahlström et al., 2008 [9]	No especificado	<i>Escherichia coli</i> O157 (-)	55	30 min	Incompleto
			55	60 min	< LOD
			70	30 min	< LOD
			70	60 min	< LOD
		<i>Salmonella typhimurium</i> (-)	55	30 min	Incompleto
			55	60 min	< LOD
			70	30 min	< LOD
			70	60 min	< LOD
		<i>Enterococcus spp.</i> (+)	55	30 min	Incompleto
			55	60 min	Incompleto
			70	30 min	< LOD
			70	60 min	< LOD
		<i>Clostridium perfringens</i> (+, esporas)	55	30 min	0
			55	60 min	0
			70	30 min	0
			70	60 min	0
		Parvovirus porcino (virus)	55	30 min	1,1
			55	60 min	1,6
			70	30 min	2,7
			70	60 min	3,2
		Fago de <i>Salmonella</i> 28B (virus)	70	30 min	0
			70	60 min	0
			55	30 min	1,4
			55	60 min	1,8
			70	30 min	> 6,0

Fuente	Animal	Microorganismo	Temperatura (°C)	Tiempo de tratamiento	Reducción logarítmica
		Virus de la enfermedad vesicular porcina	70	60 min	> 6,0
Watcharasukarn et al., 2009 [30]	Ganado	<i>Escherichia coli</i> (-)	37	15 días	< LOD
			55	48 h	
			70	24 h	
		<i>Enterococcus faecalis</i> (+)	37	15 días	3,1
			55	48 h	1,7
			70	24 h	1,8
		<i>Clostridium perfringens</i> (+, esporas)	55	48 h	< 1
			70	24 h	< 1
Cunault et al., 2011 [26]	Cerdos	<i>Escherichia coli</i> (-)	60	1 h	< LOD
			70	10 min	
		<i>Enterococcus spp.</i> (+)	60	1 h	< LOD
			70	10 min	
		Colifagos somáticos (virus)	60	1 h	0
			70	10 min	0
			97	10 min	Incompleto
		<i>Clostridium spp.</i> (+, esporas)	60	1 h	0
			70	10 min	0
			97	10 min	Incompleto
Hoeksma et al. 2015 [15]	Ganado	<i>Escherichia coli</i> (-)	70	1 h	2,6
		<i>Salmonella spp.</i> (-)	70	1 h	0,2
		<i>Enterococcus spp.</i> (+)	70	1 h	2,8
		Colifagos somáticos (virus)	70	1 h	3,9
Harp et al., 1996 [28]	Aqua y leche	Ooquistes de <i>Cryptosporidium</i> (parásito)	71,7	5 – 15 s	< LOD
Naidoo & Foutch, 2018 [29]	lodo fecal	Huevos de <i>Ascaris suum</i> (parásito)	70°C	5 min	< LOD
Elving 2009 [27]	Ganado	<i>Salmonella Senftenberg</i> (-)	70°C	15 min	< LOD
		<i>Enterococcus Faecalis</i> (+)		15 min	
		Parvovirus		4 h	

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. E. Manyi-Loh, S. N. Mamphweli, E. L. Meyer, G. Makaka, M. Simon, and A. I. Okoh, "An overview of the control of bacterial pathogens in cattle manure," Sep. 01, 2016, *MDPI*. doi: 10.3390/ijerph13090843.
- [2] F. A. Nicholson, S. J. Groves, and B. J. Chambers, "Pathogen survival during livestock manure storage and following land application," in *Bioresource Technology*, Jan. 2005, pp. 135–143. doi: 10.1016/j.biortech.2004.02.030.
- [3] T. A. McAllister and E. Topp, "Role of livestock in microbiological contamination of water: Commonly the blame, but not always the source," *Animal Frontiers*, vol. 2, no. 2, pp. 17–27, Apr. 2012, doi: 10.2527/af.2012-0039.
- [4] O. O. Alegbeleye and A. S. Sant'Ana, "Manure-borne pathogens as an important source of water contamination: An update on the dynamics of pathogen survival/transport as well as practical risk mitigation strategies," Jun. 01, 2020, *Elsevier GmbH*. doi: 10.1016/j.ijheh.2020.113524.
- [5] N. Alija-Novo, P. Whyte, and D. Bolton, "Survival of Bacterial Pathogens During Storage of Animal Waste and Wastewater Treatment Sludge and Their Subsequent Application to Clay–Loam Soil," *Bacteria*, vol. 5, no. 1, p. 5, Jan. 2026, doi: 10.3390/bacteria5010005.
- [6] B. H. Rosen, "Waterborne Pathogens in Agricultural Watersheds," 2000.
- [7] L. Álvarez-Fraga *et al.*, "A meta-analysis of pathogen reduction data in anaerobic digestion," Jan. 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2024.114982.
- [8] P. Seruga *et al.*, "Pathogen reduction potential in anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste and food waste," *Molecules*, vol. 25, no. 2, 2020, doi: 10.3390/molecules25020275.
- [9] L. Sahlström, E. Bagge, E. Emmoth, A. Holmqvist, M. L. Danielsson-Tham, and A. Albiñ, "A laboratory study of survival of selected microorganisms after heat treatment of biowaste used in biogas plants," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 16, pp. 7859–7865, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.09.071.
- [10] M. D. Aitken *et al.*, "Inactivation of Escherichia coli O157:H7 during thermophilic anaerobic digestion of manure from dairy cattle," *Water Res.*, vol. 41, no. 8, pp. 1659–1666, 2007, doi: 10.1016/j.watres.2007.01.034.
- [11] H. D. Monteith, E. E. Shannon, and J. B. Derbyshire, "The inactivation of a bovine enterovirus and a bovine parvovirus in cattle manure by anaerobic digestion, heat treatment, gamma irradiation, ensilage and composting," 1986.
- [12] S. Kato, E. Fogarty, and D. D. Bowman, "Effect of aerobic and anaerobic digestion on the viability of Cryptosporidium parvum oocysts and Ascaris suum eggs," *Int. J. Environ. Health Res.*, vol. 13, no. 2, pp. 169–179, Jun. 2003, doi: 10.1080/0960312031000098071.
- [13] L. C. Vermeulen, J. Benders, G. Medema, and N. Hofstra, "Global Cryptosporidium Loads from Livestock Manure," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 51, no. 15, pp. 8663–8671, Aug. 2017, doi: 10.1021/acs.est.7b00452.
- [14] G. McCarthy, P. G. Lawlor, K. N. Carney, X. Zhan, M. Gutierrez, and G. E. Gardiner, "An investigation into the removal of Salmonella and enteric indicator bacteria from the separated liquid fraction of raw or anaerobically digested pig manure using novel on-farm

- woodchip biofilters," *Science of the Total Environment*, vol. 514, pp. 140–146, May 2015, doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.036.
- [15] P. Hoeksma, A. J. A. Aarnink, F. E. De Buissonjé, S. A. Rutjes, and H. Blaak, "Effect van processtappen op overleving van micro-organismen bij mestverwerking," 2015. [Online]. Available: www.wageningenUR.nl/livestockresearch
 - [16] P. K. Pandey and M. L. Soupir, "Escherichia coli inactivation kinetics in anaerobic digestion of dairy manure under moderate, mesophilic and thermophilic temperatures," *AMB Express*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, 2011, doi: 10.1186/2191-0855-1-18.
 - [17] N. J. Horan, L. Fletcher, S. M. Betmal, S. A. Wilks, and C. W. Keevil, "Die-off of enteric bacterial pathogens during mesophilic anaerobic digestion," *Water Res.*, vol. 38, no. 5, pp. 1113–1120, 2004, doi: 10.1016/j.watres.2003.12.004.
 - [18] X. Bonjoch and A. R. Blanch, "Resistance of faecal coliforms and enterococci populations in sludge and biosolids to different hygienisation treatments," *Microb. Ecol.*, vol. 57, no. 3, pp. 478–483, Apr. 2009, doi: 10.1007/s00248-008-9430-7.
 - [19] S. K. Grewal, S. Rajeev, S. Sreevatsan, and F. C. Michel, "Persistence of Mycobacterium avium subsp. paratuberculosis and other zoonotic pathogens during simulated composting, manure packing, and liquid storage of dairy manure," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 72, no. 1, pp. 565–574, Jan. 2006, doi: 10.1128/AEM.72.1.565-574.2006.
 - [20] B. Fremaux, M. L. Delignette-Muller, C. Prigent-Combaret, A. Gleizal, and C. Vernozy-Rozand, "Growth and survival of non-O157:H7 Shiga-toxin-producing Escherichia coli in cow manure," *J. Appl. Microbiol.*, vol. 102, no. 1, pp. 89–99, 2007, doi: 10.1111/j.1365-2672.2006.03059.x.
 - [21] J. Wei, Y. Jin, J. T. Sims, and K. E. Kniel, "Fate of Human Enteric Viruses during Dairy Manure-Based Composting," 2010.
 - [22] J. Elving, E. Emmoth, A. Albiñ, B. Vinnerås, and J. Ottosona, "Composting for avian influenza virus elimination," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 78, no. 9, pp. 3280–3285, May 2012, doi: 10.1128/AEM.07947-11.
 - [23] F. H. Van Herk *et al.*, "Inactivation of Giardia Cysts and Cryptosporidium Oocysts in Beef Feedlot Manure By Thermophilic Windrow Composting," 2004.
 - [24] G. Mc Carthy, P. G. Lawlor, L. Coffey, T. Nolan, M. Gutierrez, and G. E. Gardiner, "An assessment of pathogen removal during composting of the separated solid fraction of pig manure," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 19, pp. 9059–9067, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.07.021.
 - [25] P. Kanarek, B. Breza-Boruta, and J. Bauza-Kaszewska, "EVALUATION OF THE HYGIENISATION EFFECTIVENESS OF MUNICIPAL WASTE COMPOSTING PROCESS," *Acta Sci. Pol. Agricultura*, vol. 20, no. 2, pp. 51–60, 2021, doi: 10.37660/aspagr.2021.20.2.1.
 - [26] C. Cunault, A. M. Pourcher, and C. H. Burton, "Using temperature and time criteria to control the effectiveness of continuous thermal sanitation of piggery effluent in terms of set microbial indicators," *J. Appl. Microbiol.*, vol. 111, no. 6, pp. 1492–1504, 2011, doi: 10.1111/j.1365-2672.2011.05144.x.
 - [27] J. Elving, *Pathogen Inactivation and Regrowth in Organic Waste during Biological Treatment*. 2009.

- [28] J. A. Harp, R. Fayer, B. A. Pesch, and G. J. Jackson, "Effect of Pasteurization on Infectivity of *Cryptosporidium parvum* Oocysts in Water and Milk," 1996.
- [29] D. Naidoo and G. L. Foutch, "The time–temperature relationship for the inactivation of *Ascaris* eggs," *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development*, vol. 8, no. 1, pp. 123–126, Mar. 2018, doi: 10.2166/washdev.2017.102.
- [30] M. Watcharasukarn, P. Kaparaju, J. P. Steyer, K. A. Krogfelt, and I. Angelidaki, "Screening *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, and *Clostridium perfringens* as indicator organisms in evaluating pathogen-reducing capacity in biogas plants," *Microb. Ecol.*, vol. 58, no. 2, pp. 221–230, Jul. 2009, doi: 10.1007/s00248-009-9497-9.
- [31] Y. Jiang *et al.*, "Inactivation of pathogens in anaerobic digestion systems for converting biowastes to bioenergy: A review," Mar. 01, 2020, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2019.109654.
- [32] T. E. Kearney, M. J. Larkin, and J. P. Frost', "Survival of pathogenic bacteria during mesophilic anaerobic digestion of animal waste," 1993.
- [33] C. Côté, D. I. Massé, and S. Quessy, "Reduction of indicator and pathogenic microorganisms by psychrophilic anaerobic digestion in swine slurries," *Bioresour. Technol.*, vol. 97, no. 4, pp. 686–691, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.biortech.2005.03.024.
- [34] L. Plym-Forsell, "Survival of *Salmonellas* and *Ascaris Suum* Eggs in a Thermophilic Biogas Plant," 1995.
- [35] M. C. Erickson, J. Liao, L. Ma, M. P. Doyle, and X. Jiang, "Pathogen inactivation in cow manure compost," *Compost Sci. Util.*, vol. 17, no. 4, pp. 229–236, Sep. 2009, doi: 10.1080/1065657X.2009.10702428.
- [36] C. Turner, "The thermal inactivation of *E. coli* in straw and pig manure," 2001.
- [37] J. van Leuken, P. Hoeksma, D. Nijsten, J. Schijven, H. Schmitt, and A. de Roda Husman, "Verkenning van de microbiologische risico's van mest voor de gezondheid Op basis van een systematisch literatuuronderzoek RIVM Rapport 2017-0100," *Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM)*, 2017.
- [38] G. Habib Oluwasegun, G. Halima Nihinlolawa, A. Sunday Odey, Z. Wang, and G. Abdulmoseen Segun, "Anaerobic Digestion for Pathogen Reduction in Waste Treatment and Safe Agricultural Use of Digestates," *International Journal of Agricultural Science and Food Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 124–130, Aug. 2024, doi: 10.17352/2455-815x.000216.