

Inactivación de patógenos en residuos avícolas mediante el compostaje

Inactivation of pathogens in poultry residues through composting

Magdiel Torres V.¹, Norma A. Ochoa-Álvarez², Alejandra Nieto-Garibay^{2*},
Bernardo Murillo-Amador², Galia Lavastida P.³, Pastor Alfonso⁴

RESUMEN

El objetivo del estudio fue inactivar microorganismos patógenos mediante el proceso de compostaje durante 120 horas utilizando residuos de compuestos orgánicos en dos proporciones: C/N 25 compuesto por 25.31, 40.42 y 34.27% y C/N 35 por 44.61, 12.90 y 42.50% de paja de frijol, forraje fresco de sorgo y estiércol seco, respectivamente. Las variables analizadas fueron temperatura, carga microbiana (aeróbicos mesófilos, coliformes totales y fecales) y reducción de *Escherichia coli* y *Salmonella* Typhimurium inoculadas artificialmente en tres niveles de las pilas de compost. El tratamiento C/N 35 alcanzó la mayor temperatura e inactivación de los microorganismos patógenos evaluados durante la fase termofílica del compostaje. Las temperaturas alcanzadas no fueron homogé-

¹ Departamento de Prevención, Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Agraria de La Habana, Mayabeque, Cuba

² Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C., Baja California Sur, México

³ Departamento de Ciencias Sociales y Humanísticas, Centro de Mecanización Agropecuaria, Universidad Agraria de La Habana, Mayabeque, Cuba

⁴ Departamento de Salud Animal, Centro Nacional de Sanidad Agropecuaria (CENSA), Mayabeque, Cuba

* E-mail: anieto04@cibnor.mx

Fuente financiera: Proyecto CONACyT con clave CB-2014/236240.

Recibido: 10 de enero de 2023

Aceptado para publicación: 2 de julio de 2023

Publicado: 25 de agosto de 2023

©Los autores. Este artículo es publicado por la Rev Inv Vet Perú de la Facultad de Medicina Veterinaria, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original

neas entre los niveles de las pilas siendo inferior en el nivel superior ($p < 0.000$). Este estudio sugiere la implementación del compostaje como una alternativa eficiente para la disposición de residuos avícolas.

Palabras clave: compost, inocuos, residuos orgánicos

ABSTRACT

The aim of the study was to inactivate pathogenic microorganisms through the composting process for 120 hours using residues of organic compounds in two proportions: C/N 25 composed of 25.31, 40.42 and 34.27% and C/N 35 for 44.61, 12.90 and 42.50% of bean straw, fresh sorghum forage and dry chicken manure, respectively. The variables analysed were temperature, microbial load (mesophilic aerobics, total and faecal coliforms) and reduction of *Escherichia coli* and *Salmonella* Typhimurium, artificially inoculated in three levels of the compost piles. The C/N 35 treatment reached the highest temperature and inactivation of the pathogenic microorganisms evaluated during the thermophilic phase of composting. The temperatures reached were not homogeneous between the levels of the piles, being lower in the upper level ($p < 0.000$). This study suggests the implementation of composting as an efficient alternative for the disposal of poultry waste.

Key words: compost, innocuous, organic waste

INTRODUCCIÓN

El crecimiento esperado de la demanda mundial de alimentos de origen animal para el año 2050 (Keating *et al.*, 2014) y la necesidad de potenciar la producción animal para satisfacerla requieren métodos efectivos para la eliminación de sus residuos. La producción avícola es uno de los sectores productores de alimentos de rápido crecimiento, por lo que es necesario conocer el riesgo asociado a los residuos. La carga microbiana en el estiércol de las aves de corral, incluidos los coliformes totales y fecales, *Escherichia coli* y *Salmonella* spp, se encuentran entre los patógenos más preocupantes en relación con la producción avícola (Shepherd *et al.*, 2009), mientras que *E. coli*, aunque sea comensal, podría constituir otro problema importante desde un punto de vista ambiental y sanitario.

Entre las principales causas de enfermedades bacterianas se encuentran las causadas por *Salmonella* y *E. coli* (Puig *et al.*, 2013), que son dos de los cinco tipos de bacterias más frecuentes causantes de enfermedades transmitida por productos avícolas (Vásquez-Ampuero y Tasayco-Alcántara, 2020). Se estima que, en los países desarrollados, la salmonelosis afecta a unos 93.8 millones de personas y que el 85% de esos casos se transmiten por los alimentos (Majowicz *et al.*, 2010).

Las bacterias del género *Salmonella* producen infecciones asintomáticas en las aves de corral, facilitando la propagación del patógeno dentro de la parvada, aunque también producen manifestaciones clínicas que pueden traer altos niveles de mortalidad (Cardoso *et al.*, 2018). Existen más de 2500 serotipos, de los cuales *Salmonella* Enteritidis

y *Salmonella* Tiphymurium son los más importantes para la salud pública (Saleh *et al.*, 2019). Los residuos avícolas generados en las unidades de producción podrían considerarse contaminantes e incluyen la gallinaza, la yacija, los materiales de cama (Wilkinson *et al.*, 2011; Avidov *et al.*, 2021), y los derivados del procesamiento de los animales, como las plumas (Wang *et al.*, 2018). La yacija es uno de los principales residuos que deben ser tratados de forma eficiente, ya que contiene estiércol que constituye una fuente importante de patógenos (Mantha *et al.*, 2017; Moffo *et al.*, 2018). Por estas razones, es esencial disponer de métodos adecuados y eficaces para lograr la inactivación de estos patógenos.

El proceso de compostaje en pilas estáticas al aire libre para la inactivación de la carga microbiana patógena, incluyendo coliformes totales, coliformes fecales, *E. coli* y *Salmonella* spp ha sido propuesto como el método más económico y rápido que, además, produce un fertilizante natural (Singh *et al.*, 2012). Las altas temperaturas y la relación carbono/nitrógeno (C/N) son variables que han demostrado ser eficaces en la reducción y desaparición de patógenos durante el proceso de compostaje (Erickson *et al.*, 2015; Thomas *et al.*, 2020).

Salmonella y *E. coli* se inactivan a temperaturas superiores a 55 °C (Isobaev *et al.*, 2014) que podrían alcanzarse durante el proceso de compostaje. Sin embargo, existen pocos estudios que determinen los umbrales y tiempos de inactivación de estos microorganismos. Ejemplos de estos son los realizados por Barrena *et al.*, (2009) que encontraron *Salmonella* spp en compost, incluso cuando se registraron temperaturas entre 68 y 70 °C, así como *E. coli* a temperaturas superiores a 55 °C tras 84 días de compostaje (Patel *et al.*, 2015). Teniendo en cuenta estas observaciones, el objetivo de este estudio fue generar conocimientos sobre los umbrales de temperatura y los tiempos de inactivación de

coliformes, coliformes fecales, *E. coli* y *Salmonella* spp durante el proceso de transformación de los residuos de producción avícola a través del compostaje.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El experimento se realizó en condiciones de campo en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR), ubicado en las afueras de la ciudad de La Paz en Baja California Sur, al noroeste del Estado de México (Batista *et al.*, 2017). La temperatura media anual en la zona es de 22 °C y la precipitación media anual de 200 mm. El estudio se realizó bajo condiciones controladas de temperatura y humedad y sobre una superficie impermeable.

Diseño Experimental

Se evaluaron dos tratamientos a través de un diseño completamente aleatorizado con ajuste factorial, donde el factor de variación fue la relación Carbono / Nitrógeno (C/N), con dos niveles de C/N (C/N 25, C/N 35) a fin de lograr diferencias en las temperaturas máximas alcanzadas en las pilas de compost estáticas al aire libre y detectar la inactivación de patógenos en cada tratamiento.

El tratamiento C/N 25 estuvo compuesto por 25.31, 40.42 y 34.27% de paja de frijol, forraje de sorgo y estiércol seco, respectivamente, y el tratamiento C/N 35 por 44.61, 12.90 y 42.50% de paja de frijol, forraje fresco de sorgo y estiércol seco, respectivamente. Estos materiales fueron procedentes de la cría de pollos de engorde en una granja semirústica. Tras mezclar y homogeneizar manualmente todos los residuos orgánicos, se establecieron pilas estáticas de compost al aire libre de 170 x 50 cm y 170 x 80 cm y de 1 m³ cada una.

Se estudiaron tres pilas estáticas de compost al aire libre por tratamiento y tres réplicas durante la fase termofílica sin volteo. El contenido de humedad de la pila de compost fue de 60%, la que se alcanzó al principio y no fue necesario añadir agua a las pilas durante el experimento. La temperatura interna de las pilas se controló mediante un sistema automatizado a través de sensores (De Anda-Trasviña *et al.*, 2022). Los datos se registraron cada hora diariamente durante el experimento. El sistema de sensores se colocó en el interior de las pilas, uno en la parte inferior (cerca del suelo), otro en la parte media y otro en la superficie.

Experimento 1. Carga Microbiana

La carga microbiana se determinó para cada tratamiento al inicio y a los 12 días del proceso de compostaje, que es cuando finalizaba la etapa termófila. Se tomaron tres muestras (100 g) de la mezcla inicial del material a compostar por tratamiento y se remitiéron al laboratorio de microbiología del CIBNOR. El análisis se realizó mediante metodologías estandarizadas para la determinación de mesófilos (Ballesteros *et al.*, 2018), así como mediante procedimientos internos de laboratorio según las normas NOM-092-SSA1-1994 y NOM-114-SSA1-1994 para Coliformes y para *Salmonella* spp.

Experimento 2. Inactivación de Patógenos

Se utilizaron inóculos de *E. coli* y *S. enterica* Typhimurium de cepas existentes en el laboratorio de microbiología del CIBNOR, que se ajustaron a una densidad óptica de 1 y longitud de onda de 540 nm. Los microorganismos fueron inoculados en una solución de 10 ml de caldo de lactosa a una concentración de 1×10^6 y 1.270×10^9 unidades formadoras de colonias (UFC/ml) (Thomas *et al.*, 2020), respectivamente, a razón de tres tubos de vidrio con un diámetro interno de 15 mm y externo de 16 mm por pila. Estos tubos se ubicaron dentro de cada pila, en la parte interna baja, media y alta, a

una distancia de 30 cm de la superficie externa, para determinar el efecto de la temperatura en cada nivel. Los tubos fueron extraídos de las pilas de compost a las 72 h y el recuento de patógenos se realizó en placas con agar tripticasa de soja mediante el procedimiento descrito por Isobaev *et al.* (2014). Los resultados de la inactivación se expresaron en porcentajes, donde las UFC/ml inoculadas al inicio representaron el 100%.

Experimento 3. Inactivación de *S. enterica* Typhimurium

Este experimento se llevó a cabo utilizando la metodología descrita en el Experimento 2, pero solo para *S. Typhimurium*, donde la evaluación de inactivación se desarrolló a tres tiempos (72, 96 y 120 h). Además, se colocó una muestra de control fuera de la pila, a temperatura ambiente para evaluar la resistencia de la cepa y determinar si la inactivación observada en el experimento se debía a las temperaturas alcanzadas dentro de las pilas de compost y no a los efectos del medio de cultivo utilizado para las cepas.

Análisis Estadístico

El análisis de los datos se realizó con un análisis de varianza simple utilizando el software Statistica (Statsoft) v.10.0 (2011). Los principales efectos e interacciones se evaluaron mediante pruebas de homogeneidad de la varianza de Tukey con un nivel de significación de $p=0.05$.

RESULTADOS

En el Experimento 1 se obtuvo una disminución de la carga microbiana (*Salmonella* spp) por efecto del compost (Cuadro 1; $p<0.000$), pero sin diferencias significativas entre tratamientos.

El tratamiento C/N 35 fue el que mostró mayor inactivación de patógenos determinada durante la fase termofílica del proceso, donde se confirma la eficacia del trata-

Cuadro 1. Carga microbiana al inicio (día 0) y al final (día 12) del proceso de compostaje de materiales de paja de frijol, forraje de sorgo y estiércol seco de ave medidos en tres niveles de las pilas de compostaje durante el Experimento 1

Tratamientos	Tiempo	CT log(10) UFC/g ⁻¹	CF log(10) UFC/g ⁻¹	<i>E. coli.</i> log(10) UFC/g ⁻¹	CMA log(10) UFC/g ⁻¹	<i>Salmonella</i> spp (10g)
C/N 25	Inicio	3.38 ± 0 ^a	3.38 ± 0 ^a	2.15 ± 0.1 ^a	3.60 ± 0 ^a	(+) ^{ns}
	Final	0.60 ± 0 ^b	0.48 ± 0 ^b	0.48 ± 0 ^b	2.48 ± 0.2 ^b	(+)-2 ^{ns}
C/N 35	Inicio	3.38 ± 0 ^a	3.38 ± 0 ^a	2.69 ± 0.3 ^a	3.60 ± 0 ^a	(+) ^{ns}
	Final	1.19 ± 0.5 ^b	0.48 ± 0 ^b	0.48 ± 0 ^b	2.89 ± 0.1 ^b	(-) ^{ns}

Los resultados se expresan como media ± error estándar

^{a,b} Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas entre los tiempos de evaluación (prueba de Tukey, p<0.05)

CT: Coliformes totales; CF: Coliformes fecales; CMA: Recuento de bacterias mesófilas aerobias; (+) presente; (-) ausente

^{ns} No significativo (p>0.05)

Cuadro 2. Temperatura en tres niveles de las pilas de compostaje de materiales paja de frijol, forraje de sorgo y estiércol seco de ave con dos proporciones de C/N a los 12 días de iniciado el proceso, correspondientes al Experimento 1

Tratamiento	Nivel	Temperatura interna de la pila de compost (°C)	
		Temperaturas entre niveles Media ± error estándar	Promedio por pila Media ± error estándar
C/N 25	Bajo	56.19 ± 1.13 ^b	54.68 ± 1.09 ^b
	Medio	64.60 ± 1.50 ^a	
	Alto	43.27 ± 1.57 ^c	
C/N 35	Bajo	60.12 ± 1.22 ^b	58.75 ± 0.89 ^a
	Medio	65.90 ± 1.30 ^a	
	Alto	50.24 ± 1.17 ^c	

C/N 25 compuesto por 25.31, 40.42 y 34.27% de paja de frijol, forraje de sorgo y estiércol seco

C/N 35 compuesto por 44.61, 12.90 y 42.50% de paja de frijol, forraje fresco de sorgo y estiércol seco

^{a,b} Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos y niveles (prueba de Tukey, p<0.05)

miento en la inactivación de microorganismos al no detectar *Salmonella* spp. El tratamiento C/N 25 mostró la temperatura media más baja (54.68 ± 1.09 °C) en comparación con el tratamiento C/N 35 (58.75 ± 0.89 °C) (p<0.0002; Cuadro 2). Además, la temperatura entre los niveles de las pilas fue signifi-

cativamente diferente (p<0.000), lo que refleja que la temperatura dentro de la pila no era homogénea. Es importante indicar que si bien, el proceso de volteo genera incrementos de temperatura, no se estudió esta variable para evitar la dispersión de microorganismos durante la manipulación.

En el Experimento 2, no hubo diferencias significativas entre tratamientos en la temperatura interna de las pilas de compost durante las primeras 72 horas del proceso, pero se observaron diferencias significativas ($p < 0.002$) entre el nivel bajo y los niveles medio y alto (Cuadro 3).

En líneas generales, los porcentajes de inactivación obtenidos en los dos tratamientos y tres niveles fueron superiores al 79 y 99% para las cepas de *S. Typhimurium* y *E. coli*, respectivamente, a temperaturas entre 54 y 61 °C (Cuadro 4).

Las temperaturas promedio a los 120 h de iniciado el proceso de compostaje del Ex-

Cuadro 3. Temperatura a las 72 horas de iniciado el proceso de compostaje en pilas compuestas por dos proporciones de compost compuesto por paja de frijol, forraje de sorgo y estiércol seco de ave (Experimento 2)

Tratamiento	Nivel	Temperatura (°C) Media ± EE
C/N 25	Bajo	49.84 ± 3.0 ^b
	Medio	58.80 ± 3.5 ^a
	Alto	54.89 ± 2.67 ^{ab}
C/N 35	Bajo	47.82 ± 3.84 ^b
	Medio	61.46 ± 3.6 ^a
	Alto	55.38 ± 2.35 ^{ab}

^{a,b} Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas entre los niveles de las pilas de compostaje (prueba de Tukey, $p < 0.05$)

Cuadro 4. Porcentaje de inactivación de *S. Typhimurium* y *E. coli* entre tratamientos de proporciones carbono/nitrógeno (C/N) en tres niveles de profundidad de las pilas de compostaje de materiales de paja de frijol, forraje de sorgo y estiércol de ave a las 72 horas de iniciado el proceso (Experimento 2)

Tratamiento	Nivel	Inactivación de <i>S. Typhimurium</i> Media ± EE (%)	Inactivación de <i>E. coli</i> Media ± EE (%)
C/N 25	Bajo	84.24 ± 13.46	98.40 ± 1.60
	Medio	79.66 ± 12.05	99.93 ± 0.07
	Alto	88.82 ± 2.50	99.97 ± 0.03
C/N 35	Bajo	84.96 ± 4.32	100 ± 0
	Medio	89.50 ± 3.11	99.87 ± 0.09
	Alto	93.44 ± 1.59	100 ± 0

Sin diferencias significativas entre tratamientos ni entre niveles ($p > 0.05$)

C/N 25 compuesto por 25.31, 40.42 y 34.27% de paja de frijol, forraje de sorgo y estiércol seco

C/N 35 compuesto por 44.61, 12.90 y 42.50% de paja de frijol, forraje fresco de sorgo y estiércol seco

perimento 3 mostraron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.02$) y entre niveles, donde el tratamiento C/N 35 presentó los valores más altos en el promedio total y entre niveles (Cuadro 5; $p < 0.000$).

En cuanto a las temperaturas medias registradas en los tres niveles de las pilas de compostaje, los valores más altos se regis-

traron en el nivel medio en ambos tratamientos (Cuadro 6), indicando que la temperatura dentro de las pilas no fue homogénea.

Solo se observó *Salmonella* en una de las tres muestras en el tratamiento C/N 25 a las 72 horas de iniciado el proceso de compostaje del Experimento 3. Los porcentajes de inactivación de la cepa de *S. Typhi-*

Cuadro 5. Temperatura en pilas de compostaje de materiales de paja de frijol, forraje de sorgo y estiércol de ave, a tres niveles de profundidad a las 120 horas de iniciado el proceso en cada tratamiento de proporción carbono/nitrógeno (C/N) (Experimento 3)

Tratamiento	Temperatura interna de la pila de compost (°C)		
	Nivel	Temperaturas entre niveles Media ± error estándar	Promedio por pila Media ± error estándar
C/N 25	Bajo	56.11 ± 0.98 ^b	52.55 ± 2.07 ^b
	Medio	66.25 ± 1.96 ^a	
	Alto	35.31 ± 0.06 ^c	
C/N 35	Bajo	59.80 ± 0.94 ^b	54.44 ± 2.35 ^a
	Medio	70.04 ± 0.15 ^a	
	Alto	33.48 ± 0.69 ^c	

C/N 25 compuesto por 25.31, 40.42 y 34.27% de paja de frijol, forraje de sorgo y estiércol seco

C/N 35 compuesto por 44.61, 12.90 y 42.50% de paja de frijol, forraje fresco de sorgo y estiércol seco

^{a,b,c} Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos y niveles (prueba de Tukey, p<0.05)

Cuadro 6. Porcentajes de inactivación de la cepa *S. enterica* Typhimurium en tres niveles de profundidad de pilas de compostaje de paja de frijol, forraje de sorgo y estiércol seco de ave en tres tiempos de iniciado el proceso, de dos proporciones de carbono/nitrógeno (C/N) (Experimento 3)

Tratamiento	Tiempo (horas)	Nivel	Porcentaje de inactivación Media ± EE
C/N 25	72	Bajo	99.90 ± 0.10 ^b
		Medio	100 ± 0 ^a
		Alto	100 ± 0 ^a
	96	Bajo	99.99 ± 0 ^b
		Medio	99.96 ± 0.03 ^a
		Alto	100 ± 0 ^a
	120	Bajo	99.97 ± 0 ^a
		Medio	99.99 ± 0.01 ^b
		Alto	99.99 ± 0.01 ^a
C/N 35	72	Bajo	100 ± 0 ^a
		Medio	100 ± 0 ^a
		Alto	100 ± 0 ^a
	96	Bajo	99.94 ± 0.03 ^b
		Medio	99.98 ± 0.01 ^a
		Alto	99.99 ± 0.01 ^a
	120	Bajo	99.91 ± 0.01 ^b
		Medio	100 ± 0 ^a
		Alto	99.99 ± 0.01 ^a

C/N 25 compuesto por 25.31, 40.42 y 34.27% de paja de frijol, forraje de sorgo y estiércol seco

C/N 35 compuesto por 44.61, 12.90 y 42.50% de paja de frijol, forraje fresco de sorgo y estiércol seco

^{a,b} Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas entre los niveles de la pilas de compostaje (prueba de Tukey, p<0.05)

muriun obtenidos en el Experimento 3 fueron superiores al 99% en un rango de temperatura de 50 a 70 °C durante las 120 horas del proceso de compostaje, mientras en el tubo control (fuera de la pila) la carga fue de 3.61×10^6 UFC/ml a las 120 h, equivalente al 0.28 % de la carga del inóculo inicial.

DISCUSIÓN

El comportamiento de la carga microbiana observado en el Cuadro 1 coincide con lo referido por Shepherd *et al.* (2009) y Esperón *et al.* (2020), quienes reportan que las bacterias mesófilas aumentan cuantitativamente en comparación con las termófilas al inicio del proceso de compostaje y que, posteriormente disminuyen durante la etapa de maduración. Las relaciones C/N utilizadas en este estudio se corresponden a las propuestas por Erickson *et al.* (2015), quienes afirman que una relación C/N inicial de 25 a 35 es óptima para el desarrollo de los microorganismos y permite alcanzar la mejor calidad del compost. Por otro lado, las cargas microbianas observadas en las etapas inicial y final (Cuadro 1) se encuentran por debajo del rango permitido por las normas internacionales de la Unión Europea (Cesaro *et al.*, 2015) y por la norma mexicana (NMX-AA-180-SCFI, 2018).

La inactivación en la fase termófila del tratamiento C/N 35 presentó mejores resultados, coincidiendo con lo referido por Biswas *et al.* (2019) y Esperón *et al.* (2020), quienes demuestran que la supervivencia en compostaje es muy baja para patógenos sensibles al calor, y entre estas se encuentra *Salmonella* spp.

Las temperaturas dentro de los niveles de las pilas de compost fueron significativamente diferentes (Cuadro 2). En este sentido, Isobaev *et al.* (2014) afirman que la temperatura dentro de la pila es mayor que en la parte externa. Por otro lado, Ajmal *et al.* (2020) afirman que, en un compost bien gestionado, el rango de temperatura es de 55 a

65 °C, temperatura que fue obtenida en el presente estudio en la fase termófila (Cuadro 3). Los resultados del estudio también coinciden con las normas mexicanas que establecen 65 °C como valor máximo de temperatura para mantener una mejor cantidad y calidad de nutrientes para las plantas (NMX-AA-180-SCFI, 2018). Los valores de temperaturas presentados en el Cuadro 4 se encuentran dentro del rango de temperaturas deseables (55-60 °C) durante la primera etapa del proceso (Barrena *et al.*, 2009; Isobaev *et al.*, 2014; Patel *et al.*, 2015; Avidov *et al.*, 2022). No obstante, Young *et al.* (2016) obtienen colonias de *E. coli* por encima de los límites recomendados por las guías internacionales como la de México que establece <1000 UFC/g.

Los resultados de inactivación coinciden con los obtenidos por Wilkinson *et al.* (2011) y Palmer *et al.* (2013), quienes reportan inactivación de *E. coli* en compost a 55 °C a las 72 horas de tratamiento. Peng *et al.* (2013), asimismo, informan que la mayoría de las cepas de *E. coli* se reducen en al menos $5 \log^{10}$ tras temperaturas de 65 °C durante 25 minutos. En este sentido, Biswas *et al.* (2019) afirman que el mantenimiento de temperaturas entre 50 y 60 °C durante 2 a 3 semanas en el compostaje de residuos animales es efectivo contra *E. coli* y *Salmonellas* spp.

Aunque los valores de temperatura mostrados en el Cuadro 5 favorecen la inactivación de los patógenos, se requiere de valores superiores a 60 °C para conseguir de forma consistente este objetivo (Biswas *et al.*, 2019; Viancelli *et al.*, 2022). Del mismo modo, se coincide con Singh *et al.* (2012), Vinodkumar *et al.* (2014) y Vaddella *et al.* (2016), quienes validan la efectividad de la tecnología de compost para inactivar a *Salmonella* spp. Las diferencias obtenidas en el nivel superior de las pilas corroboran que la altura de la pila es una variable por considerar para lograr altas temperaturas en la fase termófila del compostaje (Shepherd *et al.*, 2009; Malwana *et al.*, 2013).

Los porcentajes presentados en el Cuadro 6 corresponden a los obtenidos por Wilkinson *et al.* (2011) quienes redujeron cerca del 90% de cepas de *Salmonella* spp. y *E. coli* a temperaturas de 55 a 65 °C en residuos avícolas en condiciones de laboratorio; temperaturas que coinciden con las sugeridas por diversos autores (Isobaev *et al.*, 2014; Biswas *et al.*, 2019; Hwang *et al.*, 2020). La efectividad del compostaje como método de inactivación tuvo, en consecuencia, dos importantes contribuciones: la inactivación total del patógeno y la reducción del tiempo en que permanece viable en el ambiente. Ambos efectos reducirían el riesgo de exposición para animales susceptibles, lo cual es otro elemento que permite sugerir la aplicación de este método de tratamiento de desechos orgánicos.

CONCLUSIONES

- Los niveles de *Salmonella* Typhimurium y *E. coli* disminuyeron a los 12 días del proceso de compostaje, independientemente de los tratamientos de las relaciones de Carbono / Nitrógeno (C/N) del compost.
- La inactivación de *E. coli* ocurrió a las 72 horas y de *Salmonella* Typhimurium a las 120 horas de iniciado el compostaje a temperaturas sostenidas entre 50 y 70 °C.
- Las temperaturas alcanzadas durante la fase termofílica del compostaje no fueron homogéneas entre los niveles de las pilas del compost ($p < 0.000$).
- El proceso de compostaje constituye una tecnología alternativa eficiente para la eliminación de los residuos avícolas.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento de CONACyT a través del proyecto CB-2014/236240, y al apoyo de la SRE/ANUIES-SEGIB. Asimismo, a los técnicos del campo experimental del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, y Sres. Saúl E. Briseño Ruiz, José Raymundo Ceseña Núñez, Adrián Jordán Castro y Pedro Luna García.

LITERATURA CITADA

1. **Ajmal M, Aiping S, Awais M, Saif M, Saeed R, Uddin S, Ahmad I, et al. 2020.** Optimization of pilot-scale in-vessel composting process for various agricultural wastes on elevated temperature by using Taguchi technique and compost quality assessment. *Process Saf Environ* 140: 34-45. doi: 10.1016/j.psep.2020.05.001
2. **Avidov R, Varma VS, Saadi I, Hanan A, Lublin A, Saldinger SS, Chen Y, Laor Y. 2021.** Factors influencing the persistence of *Salmonella infantis* in broiler litter during composting and stabilization processes and following soil incorporation. *Front Sustain Food Syst* 5: 106. doi: 10.3389/fsufs.2021.645721
3. **Avidov R, Varma VS, Saadi I, Khoury O, Chen Y, Laor Y. 2022.** A combined field-lab approach for assessing *Salmonella infantis* persistence in broiler litter in a stockpile and composting sleeve. *Front Sustain Food Syst* 6: 33. doi: 10.3389/fsufs.2022.811530.
4. **Ballesteros M, Hernández MC, de la Rosa I, Mañón MC, Carreño MC. 2018.** Crecimiento microbiano en pilas de compostaje de residuos orgánicos y biosólidos después de la aireación. *Centro Azúcar* 45: 1-10.
5. **Barrena R, Artola A, Vázquez F, Sánchez A. 2009.** The use of composting for the treatment of animal by-products: experiments at lab scale. *J Hazard Mater* 161: 380-386. doi: 10.1016/j.jhazmat.-2008.03.109
6. **Batista D, Murillo-Amador B, Nieto-Garibay A, Alcaraz L, Troyo-Diéguez E, Hernández L, Ojeda C. 2017.** Mitigación de NaCl por efecto de un bioestimulante en la germinación de *Ocimum basilicum* L. *Terra Latinoam* 35: 310. doi: 10.28940/terra.v35i4.317
7. **Biswas S, Nazmi A, Pitesky M, Gallardo R, Pandey P. 2019.** Thermal inactivation of *Escherichia coli* and *Salmonella Typhimurium* in poultry

- carcass and litter at thermophilic temperatures. *J Appl Poultry Res* 28: 307-317. doi: 10.3382/japr/pfy072
8. **Cardoso DM, Russi D, Sembariski E, Souza E, Clini R, Jayme V, Auxiliadora M. 2018.** Phenotypic evaluation for disposal in laying hens and asymptomatic infections by *Salmonella* spp. In the final production cycle. *J Appl Poultry Res* 28: 194-199. doi: 10.3382/japr/pfy019
 9. **Cesaro A, Belgiorno V, Guida M. 2015.** Compost from organic solid waste: quality assessment and European regulations for its sustainable use. *Resour Conserv Recy* 94: 72-79. doi: 10.1016/j.resconrec.2014.11.003
 10. **De Anda-Trasviña AM, Nieto-Garibay A, Gutiérrez J. 2022.** Natural language report of the composting process status using linguistic perception. *Applied Soft Computing* 127: 109357. doi: 10.1016/j.asoc.2022.109357
 11. **Erickson MC, Smith C, Jiang X, Flitcroft ID, Doyle MP. 2015.** Survival of *Salmonella* or *Escherichia coli* 0157:H7 during holding of manure-based compost mixtures at sublethal temperatures as influenced by the carbon amendment. *J Food Protect* 78: 248-255. doi: 10.4315/0362-028X.JFP-14-289
 12. **Esperón F, Albero B, Ugarte-Ruiz M, Domínguez L, Carballo M, Tadeo JL, Delgado MM, et al. 2020.** Assessing the benefits of composting poultry manure in reducing antimicrobial residues, pathogenic bacteria, and antimicrobial resistance genes: a field-scale study. *Environ Sci Pollut R* 27: 27738-27749. doi: 10.1007/s11356-020-09097-1
 13. **Hwang HY, Kim SH, Kim MS, Park SJ, Lee CH. 2020.** Co-composting of chicken manure with organic wastes: characterization of gases emissions and compost quality. *Appl Biol Chem* 63: 3. doi: 10.1186/s13765-019-0483-8
 14. **Isobaev P, McCartney D, Wichuk KM, Scott C, Neumann NF. 2014.** An enhanced direct process temperature validation framework in composting: case study of a full-scale covered aerated static pile. *Compost Sci Util* 22: 164-178. doi: 10.1080/1065657X.2014.918865
 15. **Keating BA, Herrero M, Carberry PS, Gardner J, Cole MB. 2014.** Food wedges: framing the global food demand and supply challenge towards 2050. *Glob Food Secur-Agr* 3: 125-132. doi: 10.1016/j.gfs.2014.08.004
 16. **Majowicz SE, Musto J, Scallan E, Angulo FJ, Kirk M, Obrien SJ, Jones TF, et al. 2010.** International collaboration on enteric disease burden of illness studies. 2010. the global burden of nontyphoidal *Salmonella gastroenteritis*. *Clin Infect Dis* 50: 882-889. doi: 10.1086/650733
 17. **Malwana C, Weerasinghe TK, Pilapitiya S. 2013.** Determination of optimal pile dimensions during thermophilic windrow composting of municipal solid waste (Msw) in Sri Lanka. *Int J Biosci Biochem Bioinforma* 3: 552-556. doi: 10.7763/IJBBB.2013.-V3.274
 18. **Mantha S, Anderson A, Acharya SP, Harwood VJ, Weidhaas. 2017.** Transport and attenuation of *Salmonella enterica*, fecal indicator bacteria and a poultry litter marker gene are correlated in soil columns. *Sci Total Environ* 598: 204-212. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.-04.020
 19. **Moffo F, Mouiche MMM, Djomgang HK, Tombe P, Wade A, Kochivi FL, Dongmo JB, et al. 2018.** Poultry litter contamination by *Escherichia coli* resistant to critically important antimicrobials for human and animal use and risk for public health in Cameroon. *Antibiotics* 10: 402. doi: 10.3390/antibiotics-10040402.
 20. **Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018. 2018.** Establishing methods and procedures for the aerobic treatment of the organic fraction of solid urban waste and special handling, as well as the commercial information and its parameters of quality of the final products. Secretaría de Economía, Gobierno de México. [Internet]. Disponi-

- ble en: <https://biblio-teca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/NMX-AA-180-SCFI-2018.pdf>
21. **Norma Oficial Mexicana NOM-092-SSA1-1994.** Bienes y servicios. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa. Secretaría de Salud. Gobierno de México. [Internet]. Disponible en: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2010/06/092SSA14.pdf>
 22. **Norma Oficial Mexicana NOM-114-SSA1-1994.** Bienes y servicios. Método para la determinación de salmonella en alimentos. Secretaría de Salud. Gobierno de México. [Internet]. Disponible en: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69538.pdf>
 23. **Palmer A, Brown J, Ross T, Metcalf DA, Evans KJ. 2013.** Potential for growth of *E. coli* in aerobic compost extract. *Compost Sci Util* 18: 152-161. doi: 10.1080/1065-657X.2010.10736951
 24. **Patel JR, Yossa I, Macarisin D, Millner P. 2015.** Physical covering for control of *Escherichia coli* 0157:H7 and *Salmonella* ssp in static and windrow composting processes. *Appl Environ Microb* 81: 2063-2074. <http://dx.doi.org/10.1128/AEM.04002-14>
 25. **Peng S, Hummerjohann J, Stephan R, Hammer P. 2013.** Heat resistance of *Escherichia coli* strains in raw milk at different subpasteurization conditions. *J Dairy Sci* 96:3543-3546. doi: 10.3168/jds.2012-6174
 26. **Puig Y, Leyva V, Robert B, Pérez Y. 2013.** Bacterial agents associated with outbreaks of food-borne diseases in Havana, 2006-2010. *Rev Cubana Hig Epidemiol* 51: 74-83.
 27. **Saleh S, Van Puyvelde S, Staes A, Timmerman E, Barbé B, Jacobs J, Gevaert K, et al. 2019.** *Salmonella* Typhi, Paratyphi A, Enteritidis and Typhimurium core proteomes reveal differentially expressed proteins linked to the cell surface and pathogenicity. *PLoS Neglect Trop D* 13: e0007416. doi: 10.1371/journal.pntd.0007416
 28. **Shepherd JrMW, Liang P, Jiang X, Doyle MP, Erickson MC. 2009.** Microbiological analysis of composts produced on South Carolina poultry farms. *J Appl Microbiol* 108: 2067-2076. doi: 10.1111/j.1365-2672.2009.04610.x
 29. **Singh R, Kim J, Jiang X. 2012.** Heat inactivation of *Salmonella* spp in fresh poultry compost by simulating early phase of composting process. *J Appl Microbiol* 112: 927. doi: 10.1111/j.1365-2672.2012.05268.x
 30. **StatSoft Inc. 2011.** Statistica. System reference. StatSoft, Inc. Tulsa, OK, USA.
 31. **Thomas C, Idler C, Ammon C, Amon T. 2020.** Effects of the C/N ratio and moisture content on the survival of ESBL-producing *Escherichia coli* during chicken manure composting. *Waste Manage* 105: 110-118. doi: 10.1016/j.wasman.2020.01.031
 32. **Vaddella V, Pitesky M, Cao W, Govinthasamy V, Shi J, Pandey P. 2016.** Assessing *Salmonella* Typhimurium persistence in poultry carcasses under multiple thermal conditions consistent with composting and wet rendering. *Poultry Sci* 95: 705-714. doi: 10.3382/ps/pev373
 33. **Vásquez-Ampuero JM, Tasayco-Alcántara WR. 2020.** Presence of pathogens in raw chicken meat in retail centers, Huánuco-Peru: a health problem. *J Selva Andina Res Soc* 11: 130-141. doi: 10.36610/j.jsars.2020.-110200130
 34. **Viancelli A, Avila VS, Duarte SC, Krabbe EL, Kuchiishi SS, Michelon W. 2022.** Behavior of microbial pathogens during composting process of swine carcasses. *Res Soc Dev* 11: e210111-24774. doi: 10.33448/rsd-v11i1.24774
 35. **Vinodkumar G, Saravanakumar VR, Ramakrishnan S, Elango A, Edwin SC. 2014.** Windrow composting as an option for disposal and utilization of dead birds. *Vet World* 7: 377-379. doi: 10.14202/vetworld.2014.377-379

36. **Wang H, Chen Z, Li M, Greene AK, Jiang X, Wang J. 2018.** Testing a nonpathogenic surrogate microorganism for validating desiccation-adapted *Salmonella* inactivation in physically heat-treated broiler litter. *J Food Protect* 81: 1418-1424. doi: 10.4315/0362-028X.JFP-18-141
37. **Wilkinson KG, Tee E, Tomkins RB, Hepworth G, Premier R. 2011.** Effect of heating and aging of poultry litter on the persistence of enteric bacteria. *Poultry Sci* 90: 10-18. doi: 10.3382/ps.2010-01023
38. **Young B, Rizzo P, Riera N, Torre V, López V, Molina C, Fernández F, et al. 2016.** Development of phytotoxicity indexes and their correlation with ecotoxicological, stability and physicochemical parameters during passive composting of poultry manure. *Waste Manage* 54: 101-109. doi: 10.1016/j.wasman.2016.05.001