



**UNCUYO**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD DE  
**CIENCIAS  
AGRARIAS**

# Evaluación de alternativas de compostaje de residuos agropecuarios y agroindustriales.

Universidad Nacional de Cuyo- Facultad de Ciencias Agrarias

Ingeniería en Recursos Naturales Renovables

TESIS DE GRADO

De la Vega Marzari, Felicitas María

Mendoza, Argentina  
2025



Título:

Evaluación de alternativas de compostaje de residuos agropecuarios y agroindustriales.

Tesista:

DE LA VEGA MARZARI, Felicitas María  
[fdelavega@est.fca.uncu.edu.ar](mailto:fdelavega@est.fca.uncu.edu.ar)

Director:

RIZZO, Pedro Federico  
[rizzo.pedro@inta.gob.ar](mailto:rizzo.pedro@inta.gob.ar)

Codirector:

ULIARTE, Ernesto Martín  
[uliarte.ernesto@inta.gob.ar](mailto:uliarte.ernesto@inta.gob.ar)

Comisión Evaluadora:

MARTINEZ, Laura Elizabeth  
[martinez.laura@inta.gob.ar](mailto:martinez.laura@inta.gob.ar)

PISI, Gabriel

[pisi.gabriel@inta.gob.ar](mailto:pisi.gabriel@inta.gob.ar)

MANDUCA, Ana

[manduca.ana@inta.gob.ar](mailto:manduca.ana@inta.gob.ar)

## RESUMEN

Los residuos orgánicos de sistemas agropecuarios y agroindustriales aún son considerados como elementos ajenos al sistema de producción. Estos no solo generan problemas en la logística de su disposición final sino también generan impactos ambientales negativos en caso de ser mal manejados. No obstante, son una potencial fuente de productos de calidad agronómica al ser revalorizados a través del compostaje. Esta tecnología permite convertir un residuo con impacto ambiental en un producto agrícola con valor comercial. Expertos en la materia y empresas del sector buscan generar innovaciones que permitan una optimización del proceso, ya sea acelerando los tiempos del compostaje o mejorando las características finales del producto. La empresa SOILA+Bio ha desarrollado un inóculo de bacterias ácido-lácticas con este último fin, buscando el potenciar la calidad agronómica final del compost.

La experimentación se llevó a cabo en el municipio de Luján, en la provincia de Buenos Aires. Se evaluaron 6 tratamientos distintos combinando compostaje tradicional o con inoculación, tamaño de pila, e inoculación en la etapa mesófila inicial o en la etapa de maduración final. Se estudió el impacto de estos manejos diferenciales sobre la dinámica general del proceso de compostaje y sobre la calidad final del compost. Se realizaron 4 tiempos de muestreo en los que se analizó la dinámica del proceso a través de la variación de temperatura, humedad, relación C:N, pH y CE; utilizando para el análisis estadístico el software InfoStat con ANOVA y análisis no paramétricos. El efecto del inóculo, tamaño de pila y tiempo de inoculación sobre la calidad final del compost se midió a través de parámetros indicadores de estabilidad y madurez, presencia de patógenos, elementos potencialmente tóxicos y calidad agronómica, utilizando metodología estandarizada.

Los resultados demuestran que los tamaños de pila impactaron en la dinámica del proceso, especialmente en el comportamiento de la temperatura, y que el inóculo y su tiempo de aplicación tuvieron un efecto activo sobre la calidad del producto final. Se determinó que en ese lugar geográfico y bajo esas condiciones ambientales, el compostaje en pilas grandes con la aplicación del inóculo desarrollado en la etapa de maduración logró una mejora significativa sobre la calidad del compost final. Se consiguió así la revalorización de residuos orgánicos locales en un producto de valor agrícola y el aporte de una tecnología innovadora al sector.

**Palabras claves:** inóculo, tamaño de pila, manejo diferencial, residuos orgánicos.

## ABSTRACT

Organic waste from agricultural and agro-industrial systems is still considered to be foreign to the production system. Not only does this waste cause problems in terms of final disposal logistics, but it also has a negative environmental impact if poorly managed. However, it is a potential source of high-quality agricultural products when revalued through composting. This technology makes it possible to convert waste with an environmental impact into an agricultural product with commercial value. Experts in the field and companies in the sector are seeking to generate innovations that will optimize the process, either by speeding up composting times or by improving the final characteristics of the product. The company SOILA+BIO has developed a lactic acid bacteria inoculum for the latter purpose, seeking to enhance the final agronomic quality of the compost.

The experiment was carried out in the Municipality of Luján, in the Buenos Aires province. Six different treatments were evaluated, combining traditional composting or inoculation, pile size, and inoculation in the initial mesophilic stage or in the final maturation stage. The impact of these differential managements on the general dynamics of the composting process and on the final quality of the compost was studied. Four sampling times were carried out in which the progress of the process was studied through the variation of temperature, pH, C:N ratio, EC, and humidity; using InfoStat software with ANOVA and non-parametric analysis for statistical analysis. The effect of inoculum, pile size, and inoculation time on the final quality of the compost was measured using standardized methodology through parameters indicating stability and maturity, the presence of pathogens, potentially toxic elements, and agronomic quality.

The results show that the pile sizes affected the dynamics of the process, especially the temperature behavior, and that the inoculum and its application time had an active effect on the quality of the final product. It was concluded that in that geographical location and under those environmental conditions, composting in large piles with the application of the inoculum in the maturation stage, a significant improvement on the quality of the final compost was achieved. Thus, the revalorization of local organic wastes into a product of agricultural value and the contribution of an innovative technology to the sector was accomplished.

**Keywords:** inoculum, pile size, differential treatment, organic waste.

## AGRADECIMIENTOS

*Después de tanto esfuerzo dedicado a mi carrera, no me queda más que agradecerles a todas aquellas personas que me acompañaron durante todo el proceso y que hicieron que esto fuera posible:*

*A mis papás, Gonza y Meme, por enseñarme con el ejemplo lo que es el esfuerzo, la perseverancia y el amor en el acompañar.*

*A mis hermanos, Peque, Lu, Peter y Tomi, y a toda mi familia por ser siempre mi puerto seguro en momentos de tormenta.*

*A mis amigas Sofi, Yesi, Rocu, Maika, Lu, Dorti, Eli, Salo, y Mariam, que fueron mi apoyo y compañía en el estudio y en la vida. Compartir un mate y risas con ustedes fue y es mi motor.*

*A mis amigos de la facultad, por todas las horas compartidas en la biblioteca y en las aulas. Por acompañarnos en el aprender.*

*A la FCA, por brindarme tantos espacios de aprendizaje y profesionales ejemplares. Por darme la oportunidad de conocer el mundo.*

*A la estación experimental del INTA Mendoza y a la empresa SOILA+BIO por brindarme el espacio y los medios de trabajo para llevar a cabo esta tesis.*

*A Pedro, Iván y Martín por guiarme durante este proceso con paciencia y comprensión.*

*A todos los que no nombré, gracias también.*

*Sin todos ustedes no hubiera sido posible.*



## Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 Problemática de residuos agropecuarios y agroindustriales .....	8
1.2 Proceso de compostaje como alternativa de manejo de residuos agropecuarios y agroindustriales.....	9
1.2.1 Etapas del proceso de compostaje .....	10
1.2.2 Indicadores del proceso de Compostaje .....	12
1.2.3 Indicadores de estabilidad y madurez del proceso de Compostaje .....	14
1.2.4 Parámetros de calidad del compost .....	16
1.3 Optimización del proceso de compostaje.....	19
2. OBJETIVO E HIPÓTESIS .....	21
2.1 Objetivo general y específicos .....	21
2.2 Hipótesis.....	21
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	22
3.1 Procedencia de los residuos orgánicos empleados y diseño de la mezcla de residuos a compostar.....	22
3.2 Diseño experimental.....	23
3.3 Muestreo y variables de análisis .....	25
3.3.1 Toma de muestras .....	25
3.3.2 Monitoreo del proceso de compostaje.....	25
3.3.3 Parámetros analizados para el proceso y producto final .....	27
Parámetros de calidad del compost obtenido.....	27
Parámetros de Estabilidad y Madurez.....	28
Parámetros de Higienización .....	29
Elementos Potencialmente tóxicos .....	30
3.4 Análisis de datos .....	30
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
4.1 Características iniciales de la mezcla.....	31
4.2 Dinámica del proceso de compostaje de distintas alternativas.....	32
Temperatura.....	32
Humedad.....	35
Relación C:N .....	37
pH .....	38
Conductividad eléctrica (CE) .....	41
4.3 Calidad de los composts obtenidos.....	42
4.3.1 Estabilidad y Madurez.....	42
4.3.2 Elementos Potencialmente Tóxicos y Microorganismos patógenos .....	45



4.3.3	Calidad Agronómica .....	47
5.	CONCLUSIONES .....	50
	BIBLIOGRAFÍA .....	52

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Problemática de residuos agropecuarios y agroindustriales

La industria argentina se caracteriza por ser muy amplia y variada. Esta abarca desde la industria alimenticia (de tipo agrícola, avícola, pesquera, láctea, vitivinícola, procesadora de alimentos, entre otras), la forestal, las de origen mineral (minería, siderurgia, refinerías, petróleo y gas), y electrónica, entre muchas otras (INDEC, 2023). Esta variedad productiva se debe a la gran diversidad de ecosistemas presentes a lo largo del territorio nacional, lo que permite desarrollar una amplia gama de actividades en distintas regiones.

Uno de los sectores fuertes de la economía argentina es el agropecuario-agroindustrial. Según la Fundación Agropecuaria para el Desarrollo de Argentina (FADA), las cadenas agroindustriales representaron el 23,1% del Producto Bruto Interno (PBI) argentino en el año 2023, equivalente a aproximadamente USD 124.276 millones, consolidándose como la principal actividad económica del país.

Acompañando al desarrollo de estas actividades está la generación de importantes volúmenes de residuos, descartes y subproductos (RDS), los cuales representan un desafío ambiental relevante debido a su impacto ecológico, las dificultades logísticas de su disposición y los altos costos asociados (Negri Rodríguez et al., 2019, 2022). También De Bustos et al., (2016) señalan que estas actividades productivas generan grandes cantidades de efluentes y residuos que pueden causar daños ambientales significativos si no son gestionados adecuadamente. A pesar de numerosos avances e innovaciones tecnológicas, los residuos orgánicos agroindustriales aún son considerados como elementos ajenos al sistema de producción.

En este contexto, el sector científico y empresarial ha desarrollado en los últimos años tecnologías de tratamientos físicos, químicos o bioquímicos para promover el agregado de valor de los subproductos agroindustriales (Almaraz-Sánchez et al., 2022). Una manera de lograr esta revalorización es a través del compostaje de estos residuos y su conversión en insumos agrícolas de calidad. A este concepto se le suma también el desarrollo de distintas tecnologías que ayudan a optimizar el proceso, como los son la aplicación de lombrices (vermicompost), inóculos, sensores, diversificación en el manejo, entre otras.

El presente trabajo de tesis se desarrolló en el marco de un convenio entre la empresa NF Developers S.A (Soila+Bio) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) a través de la Estación Experimental Agropecuaria Mendoza (EEA de Mendoza, Grupo de trabajo Agrotecnología Sostenible, Luján de Cuyo). Soila+Bio se encuentra ubicada en el municipio de Luján (Provincia de Buenos Aires) y se dedica al tratamiento de residuos orgánicos agropecuarios, buscando así valorizarlos mediante compostaje y transformarlos en insumos para la agricultura.

La empresa ha desarrollado y presentado el patentamiento de un inóculo de bacterias ácido-lácticas con el fin de lograr una mejor calidad final en el compost resultante y una optimización de la dinámica del proceso. Para esto, se pretende adecuar el manejo de las pilas de compostaje (tamaño, aireación y humedad) para generar el ambiente adecuado para dicho inóculo, y evaluar el momento óptimo de aplicación del mismo.

Debido a que el inóculo pertenece grupo de microorganismos mesófilos (rango óptimo de temperatura de 20-40 °C) y, por lo tanto, no soporta las altas temperaturas de la etapa termófila, se evaluó la eficiencia del inóculo aplicándolo en la primera etapa mesófila y en la etapa de maduración final, evitando la etapa termófila secundaria. De esta manera se evaluaron distintas alternativas de tratamiento, variando en el tiempo de inoculación y en la altura de las pilas para evitar altas temperaturas que afectaran el desarrollo del producto.

El municipio de Luján (Prov. de Buenos Aires), si bien cuenta con una economía diversificada fuertemente apoyada en el turismo, se destaca principalmente por los sectores agropecuario e industrial (Municipio de Luján, 2022). En un panorama marcado por la generación de desechos agroindustriales, la falta de estrategias para el tratamiento de residuos, la proyección de un crecimiento de la actividad industrial y la creciente demanda social por prácticas sostenibles, la propuesta de la empresa Soila+Bio (NF-Developers) no es solo revalorizar estos residuos y generar un producto comercializable, sino también la transformación de un pasivo ambiental en un insumo útil sin impacto ambiental, beneficiando así al municipio y su comunidad.

Es importante contribuir a la sostenibilidad del sector agroindustrial mediante soluciones técnicas aplicadas a la gestión de residuos orgánicos. La valorización de estos residuos a través del compostaje representa una oportunidad concreta para integrar principios de economía circular y reducir el impacto ambiental de la producción. Desde una perspectiva científico-tecnológica, abordar esta problemática permite no solo mitigar impactos ambientales, sino también generar productos con valor agregado, contribuyendo a una mejora integral de los sistemas de producción.

## 1.2 Proceso de compostaje como alternativa de manejo de residuos agropecuarios y agroindustriales.

El compostaje consiste en la transformación aerobia de la materia orgánica por parte de diferentes tipos de agentes microbianos como bacterias y hongos (Santana, 2019). Es un proceso controlado de transformación biológica de la materia orgánica bajo condiciones aeróbicas y termófilas en el que, por acción microbiana, hay una sucesión de distintas etapas (SCyMA y SENASA, 2019). Permite aprovechar los residuos orgánicos y obtener productos que pueden ser fácilmente manejados y almacenados, en la que su materia orgánica es más estable, humificada y con menor contenido de sustancias tóxicas, patógenos y semillas de malezas viables (Hannibal

et al., 2016). Este proceso ayuda a reducir los impactos ambientales y mejorar las propiedades de los suelos.

### 1.2.1 Etapas del proceso de compostaje

El proceso de compostaje se suele dividir en 4 etapas o fases: etapa mesófila inicial, etapa termófila, segunda etapa mesófila y etapa de maduración (Figura 1). Primero debe conformarse la pila y, posteriormente, se incrementa la temperatura del material por encima de la temperatura ambiente como resultado de la actividad biológica.

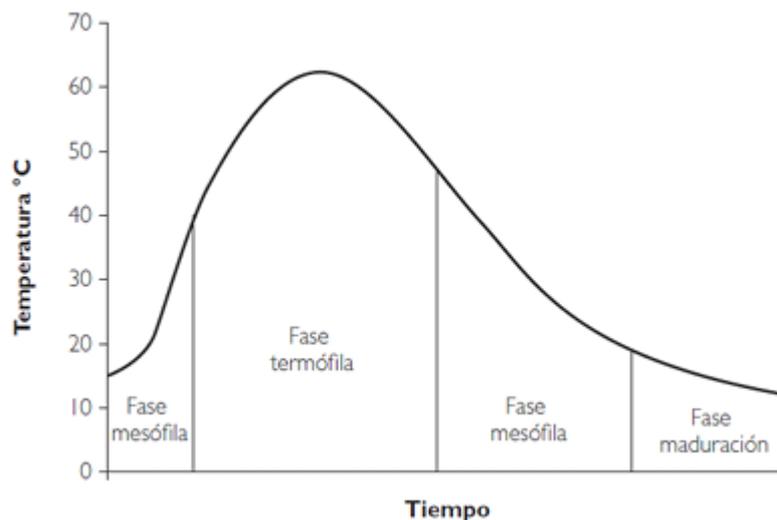


Figura 1. Fases de la producción de compost con énfasis en los cambios de temperatura. Fuente: Mazzarino y Satti, 2012.

**Etapa mesófila inicial:** Se caracteriza por presentar temperatura entre 10-45°C. Al principio de esta fase, se desarrollan las familias de microorganismos mesófilos que crecen entre los 15 °C a 35 °C y que consumen inicialmente los carbohidratos presentes en la materia orgánica (Sánchez et al., 2017). Esta comunidad bacteriana combina oxígeno (O<sub>2</sub>) con carbono (C) para producir dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y energía, utilizando una parte de esta última para los procesos de crecimiento y reproducción, y liberando el resto en forma de calor (Hettiarachchi et al., 2020). Ese calor se traduce luego en un incremento de temperatura, dando lugar a la etapa termófila posterior (>45 °C).

**Etapa termófila:** Esta etapa se caracteriza por presentar un rango de temperatura de 45-75°C. Implica la mineralización de moléculas lentamente degradables, junto con un proceso complejo como la humificación de compuestos lignocelulósicos (Hettiarachchi et al., 2020). A medida que se agotan los compuestos biodegradables y aumenta la liberación de CO<sub>2</sub> se produce la disminución de la flora termófila interviniente (Moreno Casco et al., 2008). Esta etapa es crítica para la higienización del material y se caracteriza por un elevado consumo de O<sub>2</sub> y generación de calor.

En el caso de que el flujo de O<sub>2</sub> sea insuficiente (porque la densidad aparente es demasiado alta, porque los poros están llenos de agua, o porque la pila es demasiado grande) la descomposición continúa anaeróbicamente y genera compuestos olorosos no deseados, presentando una caída en la temperatura y una menor actividad microbiana (Rynk et al., 2021).

La higienización debe prevenir y destruir microorganismos patógenos, parásitos, artrópodos presentes y semillas u órganos vegetales de malezas. Por último, comienza a disminuir la temperatura debido a la reducción de energía en el compost y reactivación de los microorganismos mesófilos que descomponen los azúcares restantes (Zeng et al., 2010). La duración de esta etapa a escala industrial puede durar de varias semanas a meses, en función de las condiciones y del sistema de compostaje aplicado (Barrena Gómez et al., 2006).

**Segunda etapa mesófila:** A medida que desciende la temperatura (< 40°C) comienza la segunda etapa mesófila. Los microorganismos mesófilos que fueron expulsados durante la fase termófila toman el control del sistema y comienzan a digerir los constituyentes orgánicos más resistentes del sustrato. Los hongos y otros macroorganismos como las lombrices también vuelven a entrar en el sistema (Hettiarachchi et al., 2020).

**Etapa de maduración:** Se reduce la actividad metabólica. Los compuestos menos degradables se descomponen y surgen los precursores de sustancias húmicas (Vélez-Sánchez-Verín et al., 2008). La temperatura desciende y alcanza valores cercanos a la ambiental. La tasa de consumo de O<sub>2</sub> disminuye hasta el punto en que la convección y la difusión naturales generalmente satisfacen la demanda de O<sub>2</sub> sin aireación forzada (Rynk et al., 2021). Su duración depende de diversos factores y al final, el material se presenta biológicamente estable y maduro (Moreno Casco et al., 2008). La calidad del compost debe ser analizada al final de esta etapa.

Este proceso tiene una duración variable, dado por la calidad de los residuos, el tamaño de partícula, disposición de la pila, aireación, humedad y población biológica activa. El período de transformación es cercano a 170 días, e implica la acumulación de gran cantidad de material en las plantas de compostaje (Lara et al., 2018). Se han investigado diversos métodos para optimizar el proceso degradativo y de esta manera, agilizar las etapas a una escala industrial. Una posible alternativa es la aplicación de inóculos para optimizar el proceso de compostaje y mejorar la calidad final (Cedeño et al., 2020).

### 1.2.2 Indicadores del proceso de Compostaje

Los indicadores para evaluar el proceso de compostaje, detallados por Martínez et al., (2021) en el Compendio de Métodos Analíticos para la Caracterización de Residuos de Compost y Efluentes de Origen Agropecuario y Agroindustrial, son:

**Temperatura:** El incremento de la actividad biológica genera calor, elevando la temperatura en la masa de los residuos en degradación. Ese aumento en las primeras fases del compostaje indica la presencia de materiales muy degradables y un correcto desarrollo del proceso. La temperatura máxima es un parámetro crítico que influye en la velocidad de descomposición y la eficacia del proceso de compostaje para eliminar patógenos (Sánchez et. al, 2025), pero se pueden presentar problemas de inhibición de la actividad de la mayoría de los microorganismos si ésta es muy elevada. Por lo tanto, es necesario conseguir un equilibrio entre la máxima higienización y la biodegradación. Se considera que la mayor diversidad microbiana se consigue entre 35 y 40 °C, la máxima biodegradación entre 45 y 55 °C y la higienización cuando se superan los 55 °C (Barrena Gómez, 2006).

A su vez, la temperatura que se alcanza en cada etapa depende de la energía desprendida, de las pérdidas (convección, radiación, conducción) y de la capacidad de almacenar calor. La temperatura de las pilas de compost se mide con termómetros que presentan distinta longitud, si bien se recomiendan termómetros de longitudes mayores a 60 cm. La temperatura deberá medirse en distintos puntos de la pila, tratando de introducir el termómetro hasta una profundidad cercana al centro de la pila de compost. Esta variable permite determinar el estado del proceso y establecer la fase del proceso de compostaje donde se encuentra, siendo la fase mesófila inicial (temperatura de 10 a 45 °C), fase termófila (temperatura de 45 a 75 °C), segunda fase mesófila (temperatura < 40 °C) y finalmente una fase de maduración con temperaturas cercanas a la del ambiente.

**Humedad:** El contenido de agua retenida en residuos orgánicos a compostar es muy importante debido a que es el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células, y de los productos de desecho de las reacciones que tienen lugar durante el proceso (Chávez & Vázquez, 2010). Si la humedad es baja, la actividad biológica comienza a disminuir; el contenido de humedad crítico, por debajo del cual la actividad biológica se reduce es 40%. Para contenidos por debajo del 20% no hay actividad biológica (Haug, 1993).

Según Chávez & Vázquez (2010), la humedad de la masa de compostaje debe ser tal que el agua no llegue a ocupar totalmente los poros de dicha masa, para que permita la circulación tanto del O<sub>2</sub> como la de otros gases. La humedad debería estar entre 30%-70%.

Por otro lado, si el contenido de humedad es elevado y la porosidad es baja, se podría provocar la generación de malos olores, lixiviación y pérdida de nutrientes en condiciones anaeróbicas.

**Porosidad:** La porosidad de un material sólido es la fracción ocupada por aire y agua, es decir, aquel espacio que no está ocupado por la fracción sólida del residuo. Si el residuo carece de porosidad debe ser acondicionado con material estructurante para facilitar la existencia de poros de distintos tamaños que estén ocupados equilibradamente con aire y agua. Un término muy utilizado para describir esta propiedad es el FAS (*Free Air Space*), el cual se define como el volumen disponible con aire respecto del total, que no se encuentra ocupado por agua y la fracción sólida. Haug (1993) define como valor óptimo para el compostaje de residuos, un valor de FAS equivalente al 30%, mientras otros autores amplían este valor a un rango óptimo de 30-60 % (Annan et al., 1998).

**Relación carbono: nitrógeno (C:N):** Los microorganismos descomponedores que intervienen en el proceso de compostaje requieren de nutrientes. Generalmente, los residuos presentan un elevado contenido de nutrientes, aunque muchas veces se encuentran inmovilizados. Los elementos que se requieren en mayor cantidad son el C y el nitrógeno (N) y ambos elementos deben encontrarse en una proporción adecuada en la mezcla de residuos a compostar (Sánchez et. al, 2025). Se considera que una relación C:N óptima para iniciar un proceso de compostaje es de 25-35, ya que se estima que por cada unidad de N los microorganismos utilizan de 15 a 30 unidades de C para llevar a cabo reacciones metabólicas. Relaciones C:N mayores a ese rango retardan el proceso mientras que relaciones muy bajas generan pérdidas de N (Sánchez et. al, 2025).

En el caso de no cumplir con la C:N óptima se realiza una mezcla de los diferentes residuos disponibles hasta alcanzar esa relación. Este indicador se determina de la siguiente manera:

$$Relacion\ C:N = \frac{COT(\%)}{NT(\%)}$$

**pH:** Es un parámetro que condiciona la abundancia de ciertos microorganismos, ya que valores extremos generan una reducción en la diversidad. Valores de pH cercanos a la neutralidad (pH = 7) al inicio del proceso de compostaje, permiten desarrollar una población microbiana más variada entre bacterias y hongos (Aguilar Paredes et al., 2023). El rango de valores óptimo, según diversos autores, es de 5,5-8 (Zhang & Sun, 2016; Németh et al., 2021), aunque un rango de pH de 6,7-9 permite el desarrollo de una adecuada actividad microbiana durante el compostaje (Bernal et al., 2017). Según este mismo autor, por lo general, residuos pecuarios presentan

valores adecuados de pH, sin embargo, residuos agroindustriales pueden presentar valores ácidos, principalmente residuos de olivicultura y la industria vitivinícola.

Durante las primeras etapas del compostaje, el pH aumenta debido a la degradación de ácidos orgánicos y la formación de amoníaco a partir de la mineralización de aminoácidos y proteínas. Posteriormente, durante las fases de enfriamiento y maduración, el pH disminuye debido al proceso de nitrificación que se inhibe a temperaturas termófilas (Bernal et al., 2017).

Una reducción brusca del pH durante algún momento del proceso puede indicar condiciones anaeróbicas. Los microorganismos en ausencia de O<sub>2</sub> producen ácidos de cadena corta como producto metabólico, acidificando el medio.

### 1.2.3 Indicadores de estabilidad y madurez del proceso de Compostaje

La estabilidad se refiere al nivel de actividad microbiana del compost, mientras que la madurez se refiere al nivel de toxicidad que este presenta para las plantas. El primer concepto se refiere al manejo y la gestión del proceso, mientras que el segundo es un paso más allá de la estabilidad (Sánchez et. al, 2025). Se pueden utilizar numerosos parámetros para evaluarlos.

#### **Indicadores de estabilidad**

La estabilidad indica el grado de descomposición biológica que los residuos orgánicos han alcanzado durante el compostaje y está relacionada con la actividad microbiana. Por lo tanto, la estabilidad es una propiedad clave que debe poseer un compost maduro (Barrena Gómez, 2006; CCQC, 2001). Los indicadores utilizados más comunes para el seguimiento de la estabilidad son el Índice Respirométrico y la Relación C:N.

- **Índice Respirométrico:** La respiración se considera una medida de la actividad biológica. Este parámetro puede proporcionar una medida fiable y repetitiva de la actividad microbiana de un material. Las técnicas respirométricas consisten en la medida del O<sub>2</sub> consumido y el CO<sub>2</sub> producido por microorganismos heterótrofos aerobios presentes en el proceso de compostaje, y en consecuencia son indicadoras de la actividad biológica de un material. Los microorganismos utilizan O<sub>2</sub> y generan CO<sub>2</sub>, vapor de agua y calor durante la descomposición aeróbica de la materia orgánica. La población microbiana respira a tasas muy elevadas en compost biológicamente inestables, es decir que consumen más O<sub>2</sub> y producen más CO<sub>2</sub> y vapor de agua que un compost más estable. El consumo de O<sub>2</sub> durante el compostaje está determinado por la tasa de actividad biológica aerobia. La actividad biológica aerobia y las tasas de respiración están directamente relacionadas con la estabilidad del compost (a mayor estabilidad, menor consumo de O<sub>2</sub>) (Barrena et al., 2006).
- **Relación C:N:** Este parámetro no sólo permite el monitoreo del proceso de compostaje, sino que indica la estabilización de la materia orgánica. Valores

cercanos a 30 indican inestabilidad, mientras que valores cercanos a 15, un compost estabilizado. Sin embargo, algunos residuos pecuarios presentan valores de relación C:N inferiores a 15, sin ser estables biológicamente. Por lo tanto, es recomendable evaluar dos parámetros de estabilidad y dos de madurez (Rizzo, 2020).

### **Indicadores de madurez**

La madurez es el grado o nivel de finalización efectiva del compostaje. Las características del compost como el color y el olor dan una idea general de la etapa de descomposición alcanzada, pero dan poca información con respecto al grado de maduración. Un compost maduro no debe generar efectos negativos en la germinación de semillas o el crecimiento de plantas, lo que implica un contenido de materia orgánica estable y la ausencia de compuestos fitotóxicos y patógenos de plantas o animales (Bernal et al., 1998).

Los indicadores de madurez se basan en estudios de fitotoxicidad directos (ensayos con plantas terrestres) o indirectos (determinación de productos potencialmente tóxicos como fenoles, amonio y ácidos grasos volátiles) (Sánchez et al., 2016). Sin embargo, los límites de los indicadores de madurez pueden estar determinados por el destino o uso del compost producido (Tabla 1). Generalmente, la fitotoxicidad de los compost se asocia al alto contenido de sales presentes en estiércoles y residuos orgánicos. Se han descrito numerosos y diversos métodos para determinar la madurez de un compost. Sin embargo, no existe un método directo estandarizado, ya que se utilizan varias especies (lechuga, rabanito, cebada, ryegrass, tomate, etc.), diferentes diluciones y procedimientos para generar los extractos de compost y diversos cálculos para obtener los índices de fitotoxicidad. Esta falta de consenso dificulta la interpretación y extrapolación de resultados, como así también el establecimiento de valores límites. En la Tabla 1 se detallan algunos indicadores de estabilidad y madurez con los valores recomendados según los autores Mazzarino y Satti, (2012).

Tabla 1. Indicadores de estabilidad, madurez y valores límites recomendados por diversos autores.  
Fuente: Mazzarino y Satti, 2012.

Parámetro	Valores recomendados
Producción de CO <sub>2</sub>	≤120 mg C-CO <sub>2</sub> /kg/h <200 mg C-CO <sub>2</sub> /kg/h
CO <sub>2</sub> /C orgánico	<5 mg C-CO <sub>2</sub> /g C org
Amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	<400 mg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /kg <500 mg N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /kg
Carbono soluble en agua (CSA)	<17 g/kg ≤10 g/kg <5 g/kg <4 g/kg
CSA/N total	≤0,7 <0,3
CSA/N soluble en agua	<2
Amonio/nitrato	<0,16 <0,3
Nitrato/CO <sub>2</sub>	>8 mg N-NO <sub>3</sub> /mg C-CO <sub>2</sub> /d
C <sub>AH</sub> /C <sub>AF</sub> <sup>a</sup>	>1,9
Índice de germinación	>50% >60% >80%
Crecimiento de plantas	>90% (ensayos con cebada a 25 y 50% de compost) >60% (ensayos con rabanitos y 100% de compost lavado)

Referencia a: C<sub>AH</sub>= Concentración de ácidos húmicos. C<sub>AF</sub>= Concentración de ácidos fúlvicos.

#### 1.2.4 Parámetros de calidad del compost

El compost debe estar libre de contaminantes como metales pesados, patógenos y contaminantes orgánicos persistentes (Sánchez et. al, 2025). La calidad de compost se evalúa principalmente a partir de la aptitud agronómica, es decir que se contempla su valor como enmienda, abonos orgánicos y sustratos de plantas en maceta. Hay lineamientos generales sobre los límites de distintos parámetros para la medición de calidad. En Argentina, los valores son establecidos en la Norma Conjunta 01/2019.

Por otro lado, al referirse al término calidad es necesario considerar los conceptos de estabilidad, madurez, como así también la presencia de patógenos, concentración de elementos potencialmente tóxicos y semillas de malezas (Bernal et al., 2017).

**Presencia de microorganismos patógenos:** Debido a las condiciones termófilas durante el compostaje, no se debe observar presencia de patógenos en el compost final (Sánchez et. al, 2025). Los residuos pecuarios contienen microorganismos patógenos que presentan un riesgo para la salud humana y animal, los cuales deben ser eliminados. En la Tabla 2 se detallan diversos tratamientos desinfectantes y recomendaciones para una gestión segura del estiércol según la Unión Europea y

otros reglamentos. Por otro lado, la Tabla 3 muestra los límites superiores de concentración de patógenos para el uso de compost en diversos reglamentos internacionales.

Tabla 2. Tratamientos higienizantes y recomendaciones para la gestión segura del estiércol, según la Unión Europea y otros reglamentos. Fuente: Bernal et al., (2017).

<b>Manejo</b>	<b>Tratamiento</b>
Compostaje de residuos sólidos	Más de 2 semanas por encima de 55°C acumulado en pilas de compostaje, mezclando 5 veces durante ese periodo
Compostaje de lodos cloacales	Mas de 1 semana por encima de 55°C acumulado en pilas de compostaje
Compostaje en reactores	4 horas por encima de 55°C
Compostaje	Dos volteos durante la primera semana, y alcanzando temperaturas > 55°C, duración del proceso de compostaje > 3 meses
Tratamiento con cal	Adición de cal para alcanzar pH =12 durante >2h
Tratamiento con urea	Adición de urea al 2% durante 1 semana

Tabla 3. Límites superiores de concentración de patógenos para el uso de compost en agricultura, jardines y recuperación de suelo (Fuente: Bernal et al., 2017).

Dinamarca	Reino Unido <sup>a</sup>	España <sup>a</sup>	EEUU <sup>b</sup>		Argentina <sup>d</sup>
<sup>a</sup>					
			Clase A	Clase B	
<i>E. coli</i> <100 UFC/g (pf)	<i>E. coli</i> <1000 UFC/g (pf)	<i>E. coli</i> <1000 NMP/g (pf)	Coliformes fecales <1000 NMP/g (ps)	Coliformes fecales <2x10 <sup>6</sup> NMP/g (ps) o < 2x10 <sup>6</sup> UFC/g (ps)	Coliformes fecales <1000 NMP/g (ps)
<i>Enterococcc ae</i> <100 UFC/g (pf)	Sin especificacion es	<i>Enterococcae</i> 10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup> NMP/g	Sin especificacion es	Sin especificacion es	Sin especificacion es
		<i>Clostridium perfringens</i> 10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup> NMP/g			
		<i>Lysteria monocytogen</i> es ausencia en 1g			
<i>Salmonella</i> , ausencia	<i>Salmonella</i> , ausencia	<i>Salmonella</i> , no detectada en 25g (pf)	<3 NMP/4 g (pf)	-	1 NMP/4 g (ps)

Referencias. Pf: peso fresco; ps: peso seco; a: Bernal *et al.*, 2017; b: Mazzarino y Satti, (2012); c: los compost clase B tienen restricciones de uso; d: ScyMA y SENASA (2019).

**Contenido de elementos potencialmente tóxicos:** Otro aspecto que define la calidad de un compost, es el contenido de metales pesados o también denominados elementos potencialmente tóxicos (EPT). Los residuos orgánicos pueden ser una fuente de contaminación puntual de metales pesados y otros elementos, que a bajas concentraciones generan toxicidad en organismos vivos.

La Tabla 4 detalla los valores límites de EPT presentes en compost para definir su calidad en diversos países (Martínez et al., 2021).

Tabla 4. Concentraciones máximas de elementos potencialmente tóxicos (EPT) establecidos para calidad de compost en diferentes países (mg/Kg peso seco). Fuente: Rizzo, (2020).

EPT	RU <sup>a</sup>	España <sup>b</sup>			Alemania <sup>c</sup>	Dinamarca <sup>d</sup>	ECN-QAS <sup>e</sup>	UE <sup>f</sup>	Canadá <sup>g</sup>	EEUU <sup>h</sup>	Argentina <sup>i</sup>			
		Clase <sup>1</sup>									Clase <sup>1</sup>		Clase <sup>1</sup>	
		A	B	C <sup>3</sup>							Ps	En PT	A	B
<b>As</b>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	13	75	n.d	15	30
<b>Cd</b>	1.5	0.7	2	3	1.5	0.8	100	1.3	1.5	3	20	10-100	1.5	3
<b>Co</b>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	34	150	n.d	n.d	n.d
<b>Cu</b>	200	70	300	400	100	1000	n.d	300	100	400	n.d	450-3000	150	450
<b>Cr</b>	100	70	250	300	100	100	n.d	60	200	210	n.d	1000-2000	100	270
<b>Hg</b>	1	0.4	1.5	2.5	1	0.8	n.d	0.45	1	0.8	5	5-15	0.7	5
<b>Mo</b>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	5	20	n.d	n.d	n.d
<b>Ni</b>	50	25	90	100	50	30	2500	40	50	62	180	50-500	30	120
<b>Pb</b>	200	45	150	200	150	120 <sup>2</sup>	10000 <sup>2</sup>	130	120	150	500	250-1500	100	150
<b>Se</b>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	2	14	n.d	n.d	n.d
<b>Zn</b>	400	200	500	1000	400	4000	n.d	600	600	700	1850	900-10000	300	1100

Referencias: Ps: peso seco; PT: Fósforo total; RU: Reino Unido; UE: Unión Europea. 1: Las letras A, B y C indican clase en función a la calidad, siendo A aquellos que no presentan restricciones de uso (mejor calidad) y B o C presentando mayores restricciones (menor calidad); 2: Para uso en jardines y parquización, la concentración de Pb en compost debería ser menor a 60 mg/Kg ps y 5000 mg/Kg P total, debido al riesgo para niños; 3: Compost de clase C pueden ser aplicados en suelos agrícolas hasta 5Mg/ha.año. Para EEUU, los valores representan rangos valores estándares establecidos en distintos estados; a: BSI (2011); b: Ministerio de la Presidencia (2013); c: RAL-GZ 251, d: Danish Ministry of Environment (2006); e: European Compost Network (2014); f: Saveyn and Eder (2014); g: CCME (2005); h: US EPA (1993); i: ScyMA y SENASA (2019).

Para terminar, es necesario para un estudio y análisis correcto de este proceso tener en cuenta todos estos parámetros. En primer lugar, los conceptos de estabilidad y madurez son importantes para entender las características finales del producto obtenido. En segundo lugar, se necesita una caracterización físico-química del producto final para entender la calidad final del mismo. En tercer lugar, es importante asegurarnos de que la higienización del proceso ha sucedido, por lo que se debe tener en cuenta el contenido de patógenos finales. Por último, deben considerarse también los elementos que no fueron procesados y eliminados durante el proceso que pueden tener un efecto negativo al ser finalmente aplicados. Esto se logra a partir del análisis de los Elementos potencialmente tóxicos (ETP).

### 1.3 Optimización del proceso de compostaje

El uso de preparados microbianos (inóculos) como aceleradores y optimizadores de la degradación de materia orgánica en procesos de compostaje es una práctica que ha sido utilizada tanto en sistemas agropecuarios como en el tratamiento de residuos orgánicos urbanos.

Diversos estudios han demostrado que la inoculación puede mejorar significativamente el proceso. Raut et. al, (2007) estableció que el compostaje puede optimizarse mediante la incorporación de microorganismos específicos, siempre que estos sean adecuados para el tipo de residuo tratado. García-Ramos et al., (2019), por su parte, evidenciaron que el uso de distintos portadores microbianos en pilas de residuos agropecuarios incrementa la población microbiana activa y acelera tanto

la degradación como la maduración del compost. De manera similar, Vargas-Sánchez et al., (2020) y Cedeño et al., (2020) observaron efectos positivos en pilas compostadas con residuos de origen diverso (porcinos, domiciliarios, entre otros), mejorando la estabilidad y madurez del producto final. En esta línea, Castro Hernández et. al, (2021) demostraron que la adición de inóculos durante el compostaje de residuos como broza de café, pipa verde y lodos de plantas de tratamiento favorece significativamente la calidad del compost obtenido.

Sin embargo, no todos los resultados han sido concluyentes. Rengifo Barboza et. al, (2022) observaron que, si bien la aplicación de inóculos mejoró el proceso de compostaje de residuos sólidos en Contamana (Perú), los efectos no fueron significativos cuando las condiciones clave del proceso no estaban correctamente manejadas, como en casos con desbalances en la relación C:N o ausencia de cosustratos adecuados.

Por otra parte, Zeng et. al, (2009) determinó a través de su investigación sobre inóculos para el compostaje de residuos agrícolas, que un factor determinante para un mayor efecto del inóculo es la etapa del compostaje en la que se realiza la inoculación. Concluyó que la inoculación durante la fase mesofílica inicial tuvo un efecto insignificante sobre el compost final, mientras que la inoculación en fase termófila mejoró diversos indicadores como la temperatura, entre otros. Además, Xi et al., (2015) evaluó el efecto de la inoculación en múltiples etapas, comparándola con una única inoculación. Obtuvo como resultado que la inoculación en múltiples etapas mantuvo una diversidad microbiana más alta, acelerando la degradación de la MO y mejorando la eficiencia del compostaje y la madurez final.

A su vez, factores físicos como las dimensiones de las pilas también inciden en la eficacia del compostaje. Según Sánchez et al. (2025), el tamaño influye directamente en la duración y temperatura máxima (Tmax) de la fase termofílica, afectando así la higienización del material y la calidad del compost final. La zona más caliente, y por ende más activa microbiológicamente, se localiza en el centro de la pila, y su posición y estabilidad dependen del ancho y la altura de la misma. La efectividad de los inóculos está sujeta a variables como la temperatura, el tamaño de pila, el momento de aplicación y las características microbiológicas del inóculo.

En este contexto se introduce el inóculo mesófilo de bacterias ácido-lácticas, desarrollado por la empresa SOILA+ BIO. Se busca no sólo evaluar la efectividad del mismo, sino también lograr la mejor combinación de factores fisicoquímicos (indicadores del compostaje) para que este inóculo sea más eficiente y resulte en una mayor calidad final. Si bien la empresa ha realizado diversas experiencias previas con el uso del inóculo en varios residuos orgánicos, las mismas carecen de un enfoque científico y, por ende, los resultados no permiten generar conclusiones robustas. Por lo tanto, se busca lograr con este trabajo la determinación de las

condiciones físicas más adecuadas para este inóculo y observar los efectos de este inóculo sobre el compost final.

La presente investigación se motiva en la posibilidad de aportar soluciones técnicas aplicables que promuevan la valorización de residuos mediante el compostaje, integrando principios de economía circular y eficiencia en el uso de los recursos. El abordaje de esta problemática desde una perspectiva científico-tecnológica permite no solo mitigar impactos ambientales, sino también generar productos con valor agregado, contribuyendo a una mejora integral de los sistemas de producción. A través de este trabajo, se busca aportar al desarrollo de prácticas más responsables, eficientes y ambientalmente sostenibles dentro del sector agroindustrial.

## 2. OBJETIVO E HIPÓTESIS

### 2.1 Objetivo general y específicos

#### Objetivo general

Evaluar distintas alternativas de manejo de compostaje de residuos agropecuarios y agroindustriales sobre la dinámica de los indicadores del proceso de compostaje (temperatura, humedad, pH, relación C:N) y sobre la calidad físico-química, contenido de patógenos, EPT, estabilidad y madurez de los compost finales.

#### Objetivos específicos

- Evaluar el efecto combinado de la aplicación del inóculo y momento de inoculación sobre la dinámica de los del proceso de compostaje indicadores (temperatura, humedad, pH, relación C:N) de los residuos orgánicos seleccionados.
- Evaluar el efecto combinado del tamaño de pilas y la inoculación sobre la dinámica de los indicadores del proceso de compostaje indicadores (temperatura, humedad, pH, relación C:N).
- Determinar el efecto de las distintas alternativas de compostaje sobre la calidad final del compost, identificando la opción que genera las mejores características físico-químicas, de EPT, presencia de patógenos y de estabilidad y madurez.

### 2.2 Hipótesis

La aplicación del inóculo y un manejo diferencial de las pilas en cuanto a tamaño de pilas, humedad y aireación afecta la dinámica de los indicadores del proceso de compostaje (temperatura, humedad, pH, relación C:N) y mejora la calidad físico-química, disminuye el contenido de EPT y patógenos, y aumenta la estabilidad y madurez del producto final obtenido.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Procedencia de los residuos orgánicos empleados y diseño de la mezcla de residuos a compostar

Los residuos sólidos orgánicos que se utilizaron en el proceso de compostaje fueron seleccionados de acuerdo con la composición de los residuos, la disponibilidad estacional, la cercanía al establecimiento (parque industrial Villa Flandria; Jauregui, Municipio de Luján, Prov. de Buenos Aires), y los costos asociados al transporte.

La caracterización inicial físico-química de los residuos orgánicos se realizó en el laboratorio Labcon S.A. (Tabla 5), incluyendo los siguientes parámetros: densidad, humedad, carbono orgánico total (COT), nitrógeno total (NT), pH y conductividad eléctrica (CE), de acuerdo con métodos estandarizados (USDA and USCC, 2001; Martínez et al., 2021).

Tabla 5. Valores de los parámetros analizados para cada residuo orgánico disponible de acuerdo con métodos estandarizados por USDA and USCC.

<b>Residuos</b>	<b>C:N</b>	<b>Densidad (Tn/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>C (%)</b>	<b>N (%) BS</b>
Guano de ponedoras	7,3	0,9	70	34,9	4,9
Viruta	94,7	0,1	11	49,6	0,5
Aserrín	117,4	0,2	11,5	49,5	0,4
Contenido ruminal	43,3	0,3	77	52	1,2
Cama de caballo	73,3	0,2	43	35,2	0,4
Cáscara de papa	10,5				

A partir de los resultados de la Tabla 5 se calculó la proporción más adecuada de cada residuo para lograr una mezcla con una Relación C:N teórica de 37,5 (Tabla 6) y teniendo en cuenta otros parámetros finales como contenido de humedad, pH, conductividad eléctrica (CE), entre otros. Como se mencionó anteriormente, se considera que una relación C:N óptima para iniciar un proceso de compostaje es de 25-35. Teniendo en cuenta esto, nuestra mezcla sobrepasa el límite superior recomendado para valores teóricos, pero al depender exclusivamente de los residuos disponibles en la zona y en la temporada, se considera un rango aceptable para el inicio del proceso.

La composición de la mezcla a compostar (v/v) se detalla en la Tabla 6 y es de guano de gallinas ponedoras, aserrín, contenido ruminal, cáscara de papa (Figura 2).



Figura 2. Representación de la mezcla a compostar. Proporción 30% guano de ponedoras, 20% aserrín, 20% contenido ruminal y 30% cáscara de papa. Chip de poda en relación 1:3.

Además, se agregó chip de poda como agente estructurante, en una relación 1:3 (chip de poda: mezcla, v/v), para mejorar la porosidad de la mezcla y favorecer la aireación.

Tabla 6. composición de la mezcla a compostar (v/v)

<b>Mezcla (C:N= 37,5)</b>					
<b>Ensayo piloto</b>					
<b>Residuos</b>	<b>m<sup>3</sup> residuo/ m<sup>3</sup> mezcla (sin chip)</b>	<b>m<sup>3</sup> para 18 pilas de 4 m<sup>3</sup></b>	<b>Volumen total de pilas (18 pilas * 4 m<sup>3</sup>C/U)</b>	<b>Cantidad de palas totales (2 m<sup>3</sup>/pala)</b>	<b>Cantidad de palas por ciclo de mezclado</b>
Guano de ponedoras	0,3	21.6		11	5
Aserrín	0,2	14.4		7	4
Contenido ruminal	0,2	14.4	54	7	4
Cáscara de papa	0,3	21.6		11	5
<b>TOTAL</b>	<b>1</b>	<b>90</b>	<b>72</b>	<b>45</b>	<b>23</b>

### 3.2 Diseño experimental

Para evaluar el efecto combinado de la inoculación y el tamaño de pila sobre la velocidad y la calidad del compost final, se utilizaron dos tamaños de pilas: pilas altas con dimensiones de Base mayor x Altura x Largo de 2 m x 1,5 m x 1,8 m, y pilas bajas con dimensiones de 2 m x 0,5 m x 4,5 m. Las pilas bajas fueron evaluadas para evitar el incremento de temperatura por encima de 45 °C, condición necesaria para el adecuado uso del inóculo mesófilo. Las pilas fueron aireadas a través de volteo mecánico con una pala frontal Caterpillar® 918F (capacidad de pala aproximada: 2 m<sup>3</sup>).

Los tratamientos evaluados fueron los siguientes, siendo éstos realizados por triplicado en un diseño completamente aleatorizado, tal como se detallan a continuación (Fig. 3):

- T1: Compostaje tradicional en pilas altas.
- T2: Compostaje en pilas altas con incorporación de inóculo en fase de maduración.
- T3: Inoculación inicial en pilas bajas con apilado posterior en pilas altas.
- T4: Inoculación inicial en pilas bajas, con apilado posterior en pilas altas e inoculación en maduración.
- T5: Inoculación inicial en pilas bajas durante todo el proceso.
- T6: Compostaje sin inocular en pilas bajas durante todo el proceso.

### TRATAMIENTOS

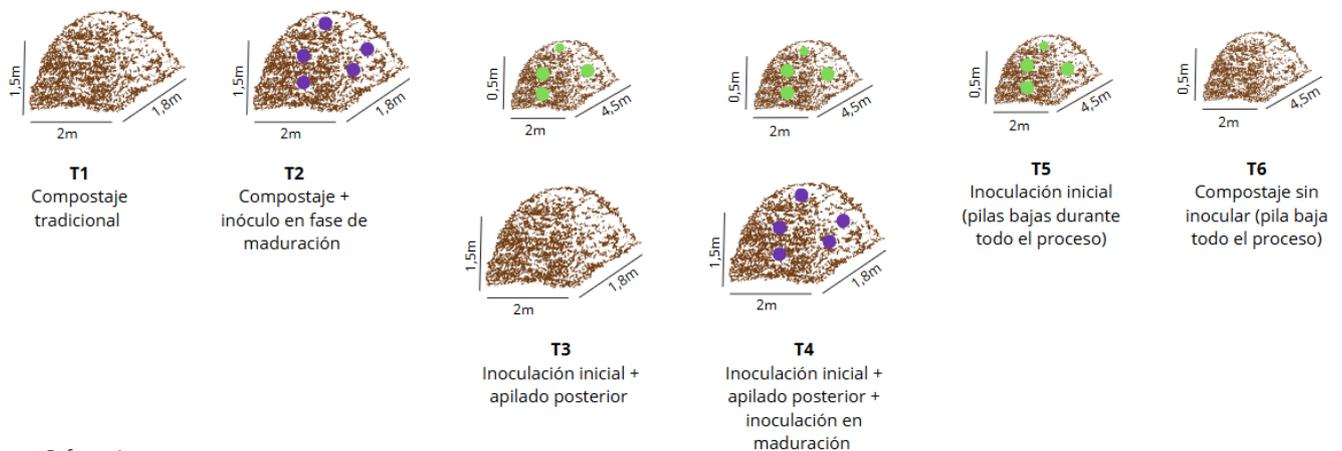


Figura 3. Descripción de los tratamientos a evaluar.

Se dispuso cada pila de compostaje de acuerdo con las medidas detalladas en los tratamientos. Cada réplica (pila) se conformó por dos paladas de la pala mecánica, siendo un total de 4 m<sup>3</sup> de material.

La distancia entre las pilas fue de al menos 1m, de manera tal que la longitud del ensayo fuera de aproximadamente 90 m y un ancho de 2 m, permitiendo el acceso parcial de la maquinaria por los laterales.

Una vez realizada la distribución de las pilas, se procedió a tomar las muestras iniciales e inocular los tratamientos correspondientes.

### 3.3 Muestreo y variables de análisis

#### 3.3.1 Toma de muestras

Una vez dispuestas cada pila de compostaje de acuerdo con las medidas detalladas en los tratamientos, se procedió a tomar las muestras iniciales e inocular los tratamientos correspondientes.

Se consideraron 4 tiempos de muestreo distintos a lo largo del proceso: Inicio (el día del inicio del proyecto), tiempo 1 (a los 15 días de iniciado el proceso), tiempo 2 (entre 45-60 días después de iniciado el proceso), y tiempo 3 (a los 120 días, en la etapa de maduración final)(Fig. 4).

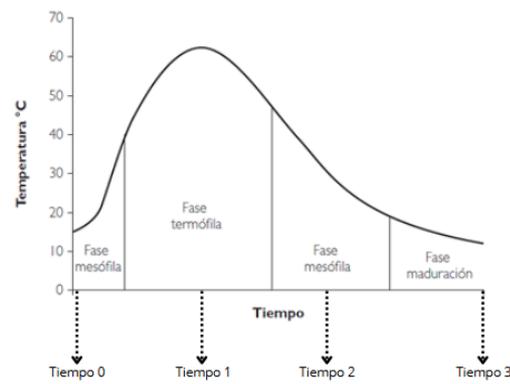


Figura 4. Fases de la producción de compost con énfasis en los cambios de temperatura (Fuente: Mazzarino y Satti, 2012) indicando los tiempos de muestreo en las etapas del proceso.

Por un lado, se midieron en los 4 tiempos de muestreo indicadores para el control del proceso de compostaje.

#### 3.3.2 Monitoreo del proceso de compostaje

Se realizó el monitoreo y manejo del proceso (volteo de pilas y riego cuando corresponda) hasta la obtención del compost. Como se mencionó en el inciso 1.2.2, el monitoreo del proceso de compostaje se realiza mediante del seguimiento de los parámetros de temperatura, humedad, porosidad, relación C:N y pH. En los 4 tiempos de muestreo se analizaron los parámetros detallados en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros a registrar para el control del proceso en cada tratamiento para cada tiempo establecido.

Tiempos	Parámetros
Tiempo 0 (Inicio)	Temperatura
Tiempo 1 (15 días)	Humedad
Tiempo 2 (45-60 días)	pH
Tiempo 3 (120 días)	Conductividad eléctrica (CE)
	Relación C:N

Se hizo un monitoreo de temperatura y humedad todos los días mediante un termómetro digital portátil en al menos 3 puntos por pila; y humedad, mediante técnicas organolépticas (prueba del puño). Las pilas fueron regadas manualmente de acuerdo con la demanda, para mantener una humedad aproximada del 50. De esta manera se pudo hacer un seguimiento y saber en qué etapa se encontraba el proceso en tiempo real.

El COT y el NT se necesitan para el cálculo de relación C:N que, si bien también es un indicador utilizado para el proceso de compostaje, se utiliza también para determinar el grado de estabilidad y madurez en el que se encuentra el proceso en el momento muestreado. La CE se utiliza para ver el desarrollo de la calidad del compost a lo largo del procedimiento.

En la Tabla 8 se detallan los métodos analíticos utilizados para la determinación del resto de los parámetros.

Tabla 8. Métodos analíticos empleados para la determinación de parámetros para el monitoreo del proceso.

<b>Parámetro</b>	<b>Detalle</b>	<b>Método</b>	<b>Referencia</b>
Humedad	Pesado de la muestra, posterior secado en estufa a T controlada, y control del peso final. Relación muestra húmeda: H <sub>2</sub> O = 1:5.	(TMECC 03.09-A)	USDA y USCC (2001)
pH	Relación muestra húmeda: H <sub>2</sub> O = 1:5.	Método potenciométrico (TMECC 04.11)	USDA y USCC (2001)
Conductividad eléctrica (CE)	Relación muestra húmeda: H <sub>2</sub> O = 1:5.	Método electrométrico (TMECC 04.10-A)	USDA y USCC (2001)
Carbono Orgánico Total (COT)	Oxidación de la muestra, conversión del carbono orgánico en CO <sub>2</sub> , y la medición del CO <sub>2</sub> producido.	(TMECC 04.01)	USDA y USCC (2001)
Nitrógeno Total (NT)	Digestión de la muestra húmeda y posterior determinación.	(TMECC 04.02-A)	USDA y USCC (2001)
Relación C:N	Relación calculada a partir del contenido de C y N.	Relación Carbono: Nitrógeno (TMECC 05.02-A)	USDA y USCC (2001)

Fuente: Adaptado de Rizzo, 2020.

Finalmente, se midieron para los muestreos inicial y final parámetros de calidad, estabilidad y madurez, patógenos y ETP.

### 3.3.3 Parámetros analizados para el producto final

En la Tabla 9 se puede observar un resumen de los parámetros analizados tanto para el análisis físico-químico de calidad, como para patógenos, ETP, estabilidad y madurez. En los siguientes incisos se hará una breve descripción para cada uno.

Tabla 9. Parámetros a analizar en el tiempo 3 para la determinación de calidad final según métodos estandarizados (USDA and USCC, 2001; Martínez et al., 2021).

<b>Calidad físico-química</b>		<b>EPT</b>
Nitrógeno Total (NT)		Cadmio (mg/Kg MS 70°C)
Carbono Orgánico Total (COT)		Cobre (mg/Kg MS 70°C)
Porcentaje de Nitrógeno total (%Ntotal)		Cromo total (mg/kg MS 70°C)
NTK		Mercurio (mg/kg MS 70°C)
N-Nitratos		Níquel (mg/Kg MS 70°C)
Nitrógeno orgánico (NO)		Plomo (mg/Kg MS 70°C)
Porcentaje de materia orgánica (%MO)		Cinc (mg/Kg MS 70°C)
Porcentaje de Carbono Orgánico Total (%COT)		Arsénico (mg/kg MS 70°C)
Fósforo total (FT)		
Potasio (g/kg MS 70°C)		
<b>Patógenos</b>		<b>Estabilidad</b>
Coliformes fecales (NMP/gr MS)		CSA (g/Kg MS70°C)
Salmonella sp. (NMP/4 grs MS)		Rel. CSA/Ntotal
Ascaris lumbricoides sp. (huevos/4 gr MS)		IRE (MO) mgO <sub>2</sub> .gMO.h <sup>-1</sup>
<b>Madurez</b>		
	N-NH <sub>4</sub> (mg/kg) MS 70°C	
	ICR	
	Rel. N-NH <sub>4</sub> / N-NO <sub>3</sub>	

#### *Parámetros de calidad del compost obtenido*

La calidad final del compost obtenido fue evaluada principalmente por su calidad agronómica (valor como enmienda, abono orgánico o sustrato).

Se realizó la determinación de parámetros físicos y químicos, de los cuales algunos también fueron medidos como indicador del proceso. Estos fueron: conductividad eléctrica (CE) por el método electrométrico (relación muestra-H<sub>2</sub>O 1:5), pH por el método potenciométrico (relación muestra-H<sub>2</sub>O 1:5), materia orgánica (MO) y carbono orgánico total (COT) mediante el método gravimétrico por pérdida de masa mediante calcinación, relación carbono: nitrógeno (C/N), nitrógeno total, nitrógeno Kjeldhal total (NKT) por el método de digestión Kjeldahl, destilación de amoníaco y titulación, nitratos (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) con el método de extracción con una solución de KCl, destilación con Aleación Devarda y titulación, nitrógeno orgánico (N-orgánico), fósforo total (P-Total) y potasio. Asimismo, dentro de los parámetros físicos, se determinó el porcentaje de humedad por el método gravimétrico por pérdida de masa mediante secado a 70 ± 5 °C (USDA y USCC, 2001; Martínez et al., 2021)(Tabla 10).

Tabla 10. Métodos analíticos empleados para la determinación de parámetros de calidad físico-química.

<b>Parámetro</b>	<b>Detalle</b>	<b>Método</b>	<b>Referencia</b>
NTK	Digestión de la muestra húmeda y posterior determinación.	Método de digestión Kjeldahl, destilación de amoníaco y titulación	USDA y USCC (2001)
N-Nitratos	Generación de un extracto de la muestra húmeda con una solución de KCl (2 M L <sup>-1</sup> ) y posterior determinación.	Método de extracción con una solución de KCl, destilación con Aleación Devarda y titulación (Método de destilación de Bremner). Electrodo ión selectivo.	Bremner (1965)
Materia orgánica (%MO)	Calcinación de la muestra seca hasta peso constante a 550± 50 °C	Método gravimétrico por pérdida de masa mediante Calcinación (TMECC 05.07)	USDA y USCC (2001)
Carbono Orgánico Total (%COT)	Calcinación de la muestra seca hasta peso constante a 550 ± 50 °C (calculado a partir del contenido de MO).	Método gravimétrico por pérdida de masa mediante calcinación (TMECC 05.07)	USDA y USCC (2001)
Fósforo total (FT) y Potasio total (KT)	Digestión ácida mediante digestor de microondas de muestra seca y molida.	Espectrofotometría de absorción atómica (TMECC 04.06).	USDA y USCC (2001)

Fuente: Adaptado de Rizzo, 2020.

### *Parámetros de Estabilidad y Madurez*

Dentro de la determinación de parámetros de estabilidad, se analizó: carbono soluble en agua (CSA), relación CSA/N total, e Índice Respirométrico Estático (IRE). Por su parte, para la determinación de los parámetros de madurez, se tuvieron en cuenta los parámetros de amonio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) mediante el método de extracción con una solución de KCl (2 M L<sup>-1</sup>), destilación con MgO y titulación, relación amonio: nitrato (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (Tabla 11).

Tabla 11. Métodos analíticos empleados para la determinación de parámetros de estabilidad y madurez.

Parámetro	Detalle	Método	Referencia
<b>Estabilidad</b>			
CSA (g/Kg MS70°C)	Con espectrofotómetro	(SM 5220 D modificado)	USDA y USCC, (2001)
Rel. CSA/Ntotal	-	TMECC 05.02-A	USDA y USCC, (2001)
IRE (MO) mgO <sub>2</sub> .gMO.h <sup>-1</sup>	Incubar una muestra de compost a temperatura constante y condiciones aeróbicas. Luego se mide el consumo de O <sub>2</sub> de la población microbiana aclimatada, mediante un electrodo de O <sub>2</sub> .	Iannotti et al., 1993	USDA y USCC, (2001)
<b>Madurez</b>			
N-NH <sub>4</sub> (mg/kg) MS 70°C	Generación de un extracto de la muestra húmeda con una solución de KCl (2 M L-1) y posterior determinación.	Método de extracción con una solución de KCl, destilación con MgO y titulación (Método de destilación de Bremner). TMECC 04.02-C	USDA y USCC, (2001)
Rel. N-NH <sub>4</sub> / N-NO <sub>3</sub>	-	TMECC 05.02-C	USDA y USCC, (2001)

Fuente: Adaptado de Rizzo, 2020.

### *Parámetros de Higienización*

Se determinó la presencia de microorganismos patógenos con Coliformes fecales, *Salmonella sp.* y huevos viables de *Ascaris lumbricoides* mediante método selectivos comerciales (Tabla 12).

Tabla 12. Métodos analíticos empleados para la determinación de parámetros de higienización.

Parámetro	Detalle	Método	Referencia
Coliformes fecales (NMP/gr MS)	Preparación de un extracto de muestras húmedas mezclando una porción con agua desionizada (1:10 p/v). Preparación de diluciones e incubación en medios selectivos para su posterior cuantificación.	Medios selectivos comerciales (Rida Count). TMECC 07.01-B	USDA y USCC (2001)
<i>Salmonella</i> sp. (NMP/4 grs MS)	Preparación de un extracto de muestras húmedas mezclando una porción con agua desionizada (1:10 p/v). Preparación de diluciones e incubación en medios selectivos para su posterior cuantificación.	Medios selectivos comerciales	USDA y USCC (2001)
<i>Ascaris lumbricoides</i> sp. (huevos/4 grs MS)	Preparación de un extracto de muestras húmedas mezclando una porción con agua desionizada (1:10 p/v). Preparación de diluciones e incubación en medios selectivos para su posterior cuantificación.	Medios selectivos comerciales (R-Biopharm AG). TMECC 07.04-A	USDA y USCC (2001)

Fuente: Adaptado de Rizzo, 2020.

#### *Elementos Potencialmente tóxicos*

Se determinó el contenido total ( $\text{mg kg}^{-1}$  MS) de Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Cinc (Zn) y Arsénico (As). Todas las determinaciones se realizaron en muestra seca en estufa a 70 °C. Se realizó una digestión ácida mediante digestor de microondas de muestra seca y molida, y se realizó la determinación mediante espectrofotometría de absorción atómica (USDA y USCC, 2001).

### 3.4 Análisis de datos

Para el análisis de la variación temporal de los parámetros a lo largo del proceso se utilizó el ANOVA, después de comprobar los supuestos de normalidad (prueba Shapiro-Wilks Modificado) y de homocedasticidad (análisis de varianza de los errores). Cuando estos supuestos no se cumplían, se utilizó una prueba no paramétrica (Kruskal-Wallis). Se consideraron diferencias significativas cuando el valor p fue menor a 0,05. Todo el análisis estadístico se realizó con el software InfoStat.

En base a los resultados obtenidos para cada Tratamiento en cada tiempo de muestreo, se analizaron los distintos parámetros y se los comparó con los límites establecidos en la Norma Conjunta de Compost (SCyMA y SENASA, 2019) y metodología específica (USDA y USCC, 2001; Martínez et al., 2021).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Características iniciales de la mezcla

Para determinar los efectos que tuvo el manejo diferencial de las pilas y la inoculación sobre el proceso de compostaje, fue necesario hacer una caracterización inicial de la mezcla con el fin de comparar los parámetros con los resultados finales.

En las Tablas 13, 14 y 15 se pueden observar los parámetros de calidad, estabilidad y madurez e higienización para la mezcla en al inicio del experimento.

Tabla 13. Valores obtenidos de los parámetros de calidad medidos en la mezcla inicial, en el tiempo 0.

Indicador	Parámetro	Unidades	Características iniciales	Valores de Referencia <sup>1</sup>
			Tiempo 0	
<i>Calidad</i>	pH		6,80 ± 0,17	7
	Humedad	%	51,5 ± 0,7	50 – 60 %
	CE	dS/m	6,68 ± 0,54	
	Relación C/N		15,8 ± 1,2	25-30
	Ntotal	g/Kg MS (70°C)	25,3 ± 1,15	
	Ntotal	%	2,53 ± 0,15	0,8 - 2 %
	COT	%	40,2 ± 0,9	> 15 %

<sup>1</sup> Martínez et al., (2021); Stentiford(1996); Chiumenti et al., (2005); Haug (1993); Rynk et al. (1994).

Tabla 14. Valores obtenidos de los parámetros de estabilidad y madurez medidos en la mezcla inicial, en el tiempo 0.

Indicador	Parámetro	Unidades	Características iniciales
			Tiempo 0
<i>Estabilidad - Madurez</i>	CSA	g/Kg MS	40,3 ± 7,2
	Rel. CSA/Ntotal		1,58 ± 0,19
	IRE (MO)	mgO <sub>2</sub> .gMO.h <sup>-1</sup>	2,7 ± 0,7

Tabla 15. Valores obtenidos de los parámetros de higienización medidos en la mezcla inicial, en el tiempo 0.

Indicador	Parámetro	Unidades	Características iniciales
			Tiempo 0
	Coliformes fecales	NMP/gr MS	82567 ± 1206
Higienización	<i>Salmonella sp.</i>	NMP/4g MS	<1
	<i>Ascaris lumbricoides</i>	<1 HUEVO/4g	<1

A partir de estos resultados podemos decir que esta mezcla inicial cumplía con las condiciones recomendadas para el inicio del proceso, excepto por la relación C:N que, como se mencionó anteriormente, puede presentar valores menores para residuos pecuarios. Para los parámetros de estabilidad, madurez e higienización no cumplía con las características para ser considerado apto para un uso posterior, como corresponde para los residuos aún no compostados.

## 4.2 Dinámica del proceso de compostaje de distintas alternativas

### *Temperatura*

El calor del compost se produce como subproducto de la descomposición microbiana de la materia orgánica. La producción de calor depende del tamaño de la pila, su contenido de humedad, la aireación y la relación C/N (Sánchez et al., 2025). Además, la temperatura ambiente (interior o exterior) también afecta la temperatura del compost.

El proceso se inició en el mes de septiembre y finalizó en enero, con temperaturas primaverales (15-20°C) y luego estivales (25-30°C). Se midió la temperatura en 3 puntos por pilas con un termómetro digital portátil, a partir de los cuales se realizó un promedio de temperatura para cada día y cada tratamiento.

A partir de los tratamientos planteados se pudo observar una diferencia en el comportamiento de la temperatura, destacando 3 dinámicas distintas: pilas grandes (tratamientos 1 y 2), pilas chicas y luego pilas grandes (tratamientos 3 y 4), y pilas chicas (tratamientos 5 y 6).

En el Gráficos 1 se pueden observar las curvas obtenidas para los tratamientos 1 y 2. En general se observa un comportamiento típico de temperatura del proceso de compostaje, con fases secuenciales mesofílica (<45°C), termofílica (>45°C), enfriamiento (o segunda etapa mesofílica) y maduración (a temperatura ambiente) (Chiumenti et al. 2005).

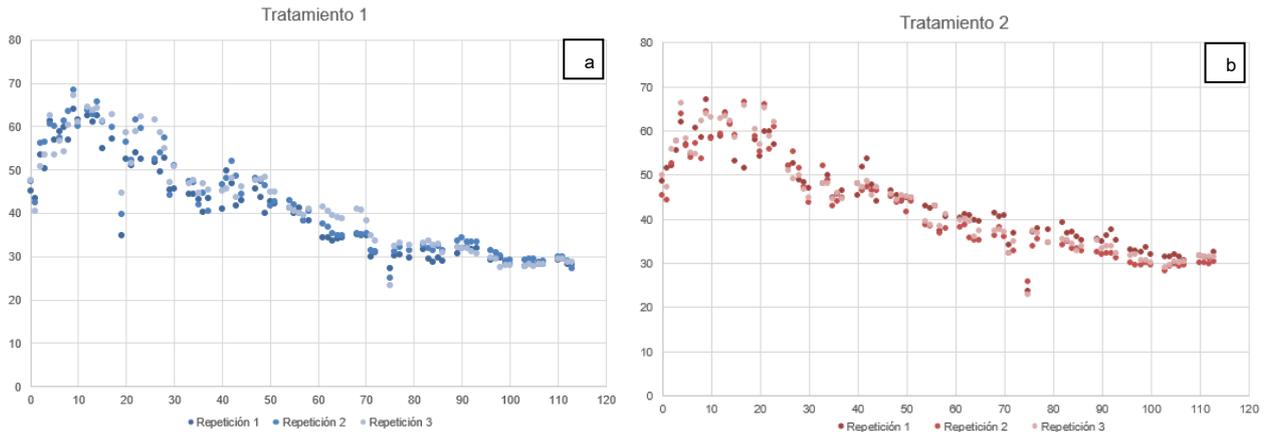


Gráfico 1. Curvas de temperatura promedio desde el inicio hasta el final del proyecto. a) gráfico para el T1: Compostaje tradicional, pilas altas y; b) gráfico para el T2: Compostaje en pilas altas, con incorporación de inóculo en fase de maduración.

En estos tratamientos se pudo observar un aumento rápido de temperatura, llegando a los valores de la etapa termofílica antes del día 10 de iniciado el proyecto.

Se observan valores anormales en los días 19 y 75 debido a bajas inusuales de la temperatura ambiente, las cuales se pueden observar también en el resto de los tratamientos. En general, no hubo diferencias significativas en el comportamiento de este indicador en los dos tratamientos hasta la etapa mesófila secundaria en la que se inoculó el T2.

A partir de la inoculación en esta tercera etapa (día 57) se observa un leve aumento en la temperatura promedio del T2 en comparación con el T1, siendo los promedios de temperatura a partir de la aplicación del inóculo de 31,9°C para T1 y 33,9°C para T2. Esto puede deberse a una mayor actividad microbiológica por la presencia del inóculo. Autores han ligado las variaciones en temperatura con la actividad microbiana, siendo el calor uno de los productos de la metabolización de los residuos (Awasthi et al. 2020).

Por otro lado, en los T3 y T4 la temperatura tuvo un comportamiento distinto ya que el inicio del proceso fue en pilas chicas con el fin de mantener las temperaturas de la etapa mesófila inicial, y que así sobreviviera el inóculo mesófilo. Las temperaturas se mantuvieron hasta el día 55 en el que se aumentó el tamaño de pila, produciendo un pico de temperatura (Gráfico 2).

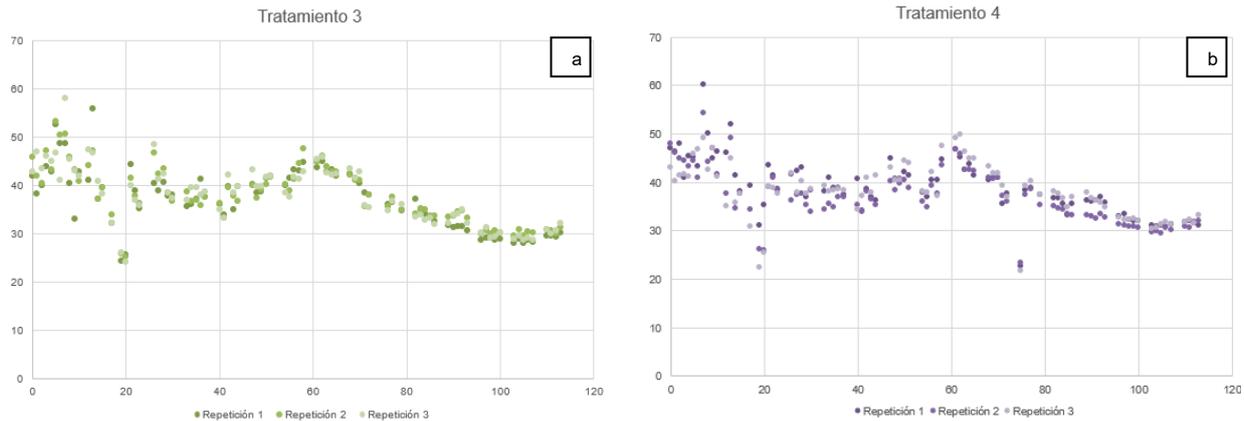


Gráfico 2. Curvas de temperatura promedio desde el inicio hasta el final del proyecto. a) gráfico para T3: Inoculación inicial en pilas bajas, apilado posterior en pilas altas; y b) gráfico para T4: Inoculación inicial en pilas bajas, apilado posterior en pilas altas con inoculación en maduración.

Por un lado, las pilas de compost más pequeñas tienen una mayor relación superficie-volumen, lo que conduce a una mayor pérdida de calor por convección y radiación. Por otro lado, las pilas más grandes alcanzan temperaturas más altas gracias a su mejor capacidad de retención de calor, en comparación con las pilas pequeñas que se enfrían más rápidamente (Richard, 1996; Malwana et al., 2013). Por esto mismo es que se considera que ese aumento de temperatura está directamente relacionado con el apilado posterior en pilas grandes.

Se observa también que tanto en el T2 y T4 (ambos con inoculación en maduración), el promedio de temperatura a partir de la inoculación es levemente mayor para éstos en comparación con los tratamientos T1 y T3 respectivamente, para el mismo periodo de tiempo. Se considera que esa diferencia se debe a la aplicación de estos microorganismos ácido lácticos que, por una mayor actividad metabólica, liberan más calor.

Por último, los tratamientos 5 y 6 corresponden al proceso de compostaje llevado a cabo en pilas pequeñas durante todo el proceso (Gráfico 3). En el caso del tratamiento 5, se realizó la inoculación en la etapa mesófila temprana. A pesar de esa inoculación inicial, el promedio de temperatura es igual para ambos tratamientos indicando que el inóculo no tuvo un efecto significativo sobre la temperatura al ser agregado en esa etapa (36,0 °C para T5 y 36,1 para T6).

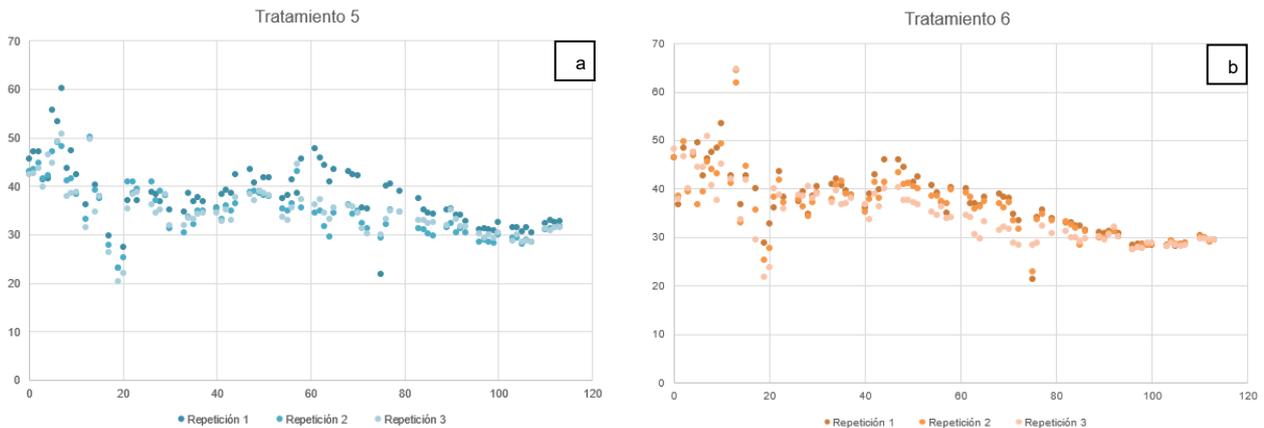


Gráfico 3. Curvas de temperatura promedio desde el inicio hasta el final del proyecto. a) gráfico para T5: Inoculación inicial, pilas bajas durante todo el proceso; y b) gráfico para T6: Compostaje sin inocular, pilas bajas durante todo el proceso.

Finalmente, deben considerarse también las temperaturas para la higienización del material. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), utilizando métodos de compostaje dentro de un recipiente, pila aireada estática o en hileras, la temperatura de los lodos debe elevarse a 40 °C o más y mantenerse a 40 °C o más durante cinco días para su correcta higienización. Durante cuatro horas de los cinco días, la temperatura en la pila de compost debe superar los 55 °C. Teniendo en cuenta esto, en todos los casos se alcanzaron las temperaturas necesarias para la higienización (45-75°C) en algún momento del proceso. A continuación, se observa un gráfico comparativo resumiendo la dinámica de temperatura para todos los tratamientos (Gráfico 4).

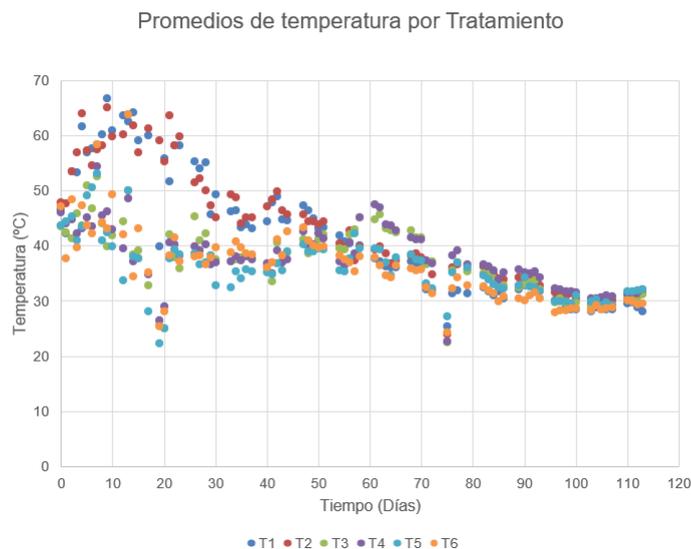


Gráfico 4. Curvas de temperatura promedio para todos los tratamientos desde el inicio hasta el final del proyecto.

### Humedad

Según Chávez & Vázquez (2010), el contenido de humedad debe estar entre los 30%-70% para el correcto funcionamiento del proceso. Otros autores establecen el contenido de humedad óptimo entre 40%-60% (Stentiford, 1996; Meseguer, 2016). Si se observan los valores dados durante el proceso en la Tabla 16, se establece

que los contenidos de humedad han sido entre buenas y levemente deficientes a lo largo del proceso.

Tabla 16. Valores medios de Conductividad Eléctrica  $\pm$ EE (unidades) para los 6 tratamientos de compostaje en tres tiempos de medición. Letras distintas indican diferencias significativas para Kruskal -Wallis ( $p < 0.05$ ) y Tiempo 1 y 2 LSD Fischer ( $p < 0.05$ ).

Tratamiento*	Humedad						
	Inicio	Tiempo 1 (15 días)	Tiempo 2 (55 días)	Tiempo 3 (120 días)			
1	51,5 $\pm$ 0,7*	38,0 $\pm$ 3,4	AB	54,4 $\pm$ 0,8	A	39,2 $\pm$ 2,5	A
2		41,5 $\pm$ 4,4	B	55,8 $\pm$ 2,4	A	34,6 $\pm$ 3,8	A
3		36,2 $\pm$ 4,2	AB	57,3 $\pm$ 3,5	A	35,0 $\pm$ 7,7	A
4		35,6 $\pm$ 1,3	A	55,2 $\pm$ 3,9	A	29,1 $\pm$ 1,5	A
5		34,7 $\pm$ 2,0	A	50,6 $\pm$ 6,6	A	29,5 $\pm$ 4,7	A
6		37,5 $\pm$ 1,0	AB	53,7 $\pm$ 3,2	A	33,5 $\pm$ 1,0	A
SE <sub>ANOVA</sub>	0,41	1,75		2,21			

T1: Compostaje tradicional, pilas altas; T2: Compostaje en pilas altas, incorporación de inóculo en fase de maduración; T3: Inoculación inicial en pilas bajas, apilado posterior en pilas altas; T4: Inoculación inicial en pilas bajas, apilado posterior en pilas altas con inoculación en maduración; T5: Inoculación inicial, pilas bajas durante todo el proceso; T6: Compostaje sin inocular, pilas bajas durante todo el proceso.

\*Valor correspondiente a la mezcla inicial.

Al inicio todos los tratamientos comienzan con la misma humedad. Estos valores se encuentran un poco por debajo de los indicados para el inicio del compostaje de acuerdo a algunos autores que la establecen entre 55%-65% (Stentiford 1996; Chiumenti *et al.*, 2005). Sin embargo, esto no fue un impedimento para el correcto inicio del proceso ya que igualmente se observó una degradación de los residuos.

Se puede observar una disminución gradual de la humedad a lo largo del proceso consecuente con la descomposición de la materia orgánica (Miller *et. al.*, 1990). Otros autores han observado también esta reducción general en la humedad a lo largo del proceso producto del proceso de descomposición, la pérdida de agua por evaporación y la absorción de agua por los agentes estructurantes (en este caso, el chip de poda). Esto ha sucedido tanto para el tratamiento de estiércol de ganado (Chen *et al.*, 2024), como para residuos sólidos orgánicos municipales (Awasthi *et al.*, 2020) y caña de azúcar (Duan *et al.*, 2019).

En este caso, la tendencia fue interrumpida en el tiempo 2 con el fin de prevenir que los valores de humedad no descendieran por debajo del valor crítico de 20% establecido por Haug, (1993), punto en el que la actividad microbiológica disminuye hasta desaparecer. Por esto mismo se mantuvo el contenido de humedad mediante riego, siendo la acción favorecida por lluvias ocasionales.

Si bien el contenido de humedad se encontró en todos los tiempos dentro de los valores óptimos, se considera que los valores podrían ser más altos. No se

alcanzaron los límites críticos por debajo del 20% en ningún momento, pero sí hubo una disminución entre el tiempo 1 y 3 muy alto, lo que puede haber afectado la velocidad y la eficiencia de la etapa de maduración en términos microbiológicos.

Exceptuando casos puntuales en el tiempo 1, ningún Tratamiento presentó una diferencia significativa en el contenido de humedad respecto al resto. Si bien puede observarse que los tratamientos 1 y 2 la retención de humedad es levemente mayor, relacionado con el tamaño de pila mayor (menor evaporación superficial). No obstante, al no haber una diferencia estadística significativa, se considera que no hubo diferencia en la dinámica del proceso en función de los tratamientos en términos de humedad, sino más bien por factores externos de manejo del proceso (riego y lluvias).

#### *Relación C:N*

Este parámetro permite el monitoreo del proceso de compostaje e indica la estabilización de la materia orgánica. Se considera que una relación C:N óptima, al inicio del proceso de compostaje, es de 25-35 ya que se estima que por cada unidad de N los microorganismos utilizan de 15 a 30 unidades de C para llevar a cabo reacciones metabólicas (Haug, 1993). La mezcla inicial de residuos tuvo una relación C:N teórica de 37,5 y una relación C:N medida en laboratorio de  $15,77 \pm 1,21$ . Con estos valores iniciales hubo un correcto desarrollo del proceso.

Se puede ver un aumento de la relación C:N en el tiempo 1 y luego su reducción gradual en los tiempos de muestreo restantes (Tabla 17). Por un lado, Bustamante et al., (2008) establecieron una relación entre el aumento del pH con la alta concentración de amoníaco liberado como producto de la descomposición de proteínas y aminoácidos. Por otro lado, Pagans et al., (2006) relacionaron la formación y liberación de amoníaco durante la primera etapa del proceso con el aumento de la temperatura en la etapa termófila y en la etapa de maduración. Estos resultados son consecuentes con los obtenidos en este caso, habiéndose obtenido un pH inicial alcalino y altas temperaturas en estas etapas, infiriendo así una pérdida de nitrógeno en forma de amoníaco, reduciendo el valor total de NT y, por ende, aumentando el valor relativo de relación C:N.

Tabla 17. Valores medios de Conductividad Eléctrica  $\pm$ EE (unidades) para los 6 tratamientos de compostaje en tres tiempos de medición. Letras distintas indican diferencias significativas para Kruskal -Wallis ( $p < 0.05$ ) y Tiempo 1 y 2 LSD Fischer ( $p < 0.05$ ).

Tratamiento*	Relación C:N			
	Inicio	Tiempo 1 (15 días)	Tiempo 2 (55 días)	Tiempo 3 (120 días)
1		20,13 $\pm$ 0,72 AB	19,53 $\pm$ 2,04 A	14,80 $\pm$ 0,92 A
2		20,00 $\pm$ 2,09 AB	19,53 $\pm$ 2,08 A	15,86 $\pm$ 0,06 A
3		19,13 $\pm$ 4,20 A	17,63 $\pm$ 0,80 A	15,03 $\pm$ 1,12 A
4	15,77 $\pm$ 1,21*	23,93 $\pm$ 0,21 B	18,47 $\pm$ 0,72 A	14,90 $\pm$ 0,53 A
5		21,40 $\pm$ 2,54 AB	17,83 $\pm$ 0,93 A	15,33 $\pm$ 2,12 A
6		22,17 $\pm$ 2,32 AB	19,93 $\pm$ 0,96 A	15,20 $\pm$ 0,44 A
SE <sub>ANOVA</sub>	0,70	1,38	0,80	

T1: Compostaje tradicional, pilas altas; T2: Compostaje en pilas altas, incorporación de inóculo en fase de maduración; T3: Inoculación inicial en pilas bajas, apilado posterior en pilas altas; T4: Inoculación inicial en pilas bajas, apilado posterior en pilas altas con inoculación en maduración; T5: Inoculación inicial, pilas bajas durante todo el proceso; T6: Compostaje sin inocular, pilas bajas durante todo el proceso.

\*Valor correspondiente a la mezcla inicial.

Finalmente, se puede observar que, excepto en el tiempo 1 (relacionado con pH y temperaturas), no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. Esto significa que los distintos manejos aplicados no causaron un efecto significativo sobre el comportamiento de la relación C:N a lo largo del proceso.

### pH

En la Tabla 18 pueden observarse los valores de pH para los distintos tratamientos en los distintos tiempos. Se inició con valores de pH adecuados, dentro del rango 6-8 establecido por Rynk et al. (1994) para la correcta degradación aeróbica de residuos orgánicos.

Tabla 18. Valores medios de Conductividad Eléctrica  $\pm$ EE (unidades) para los 6 tratamientos de compostaje en tres tiempos de medición. Letras distintas indican diferencias significativas para Kruskal -Wallis ( $p < 0.05$ ) y Tiempo 2 y 3 LSD Fischer ( $p < 0.05$ ).

Tratamiento*	pH			
	Inicio	Tiempo 1 (15 días)	Tiempo 2 (55 días)	Tiempo 3 (120 días)
1		8,93 $\pm$ 0,15	A 8,23 $\pm$ 0,06	A 8,79 $\pm$ 0,17
2		8,93 $\pm$ 0,15	A 8,33 $\pm$ 0,06	AB 8,99 $\pm$ 0,30
3		9,07 $\pm$ 0,06	A 8,60 $\pm$ 0,30	BC 8,80 $\pm$ 0,10
4	6,80 $\pm$ 0,17*	8,73 $\pm$ 0,46	A 8,70 $\pm$ 0,10	C 9,13 $\pm$ 0,15
5		8,83 $\pm$ 0,06	A 8,73 $\pm$ 0,21	C 9,04 $\pm$ 0,29
6		8,87 $\pm$ 0,06	A 8,50 $\pm$ 0,26	ABC 9,36 $\pm$ 0,05
SE <sub>ANOVA</sub>	0,09		0,11	0,12

T1: Compostaje tradicional, pilas altas; T2: Compostaje en pilas altas, incorporación de inóculo en fase de maduración; T3: Inoculación inicial en pilas bajas, apilado posterior en pilas altas; T4: Inoculación inicial en pilas bajas, apilado posterior en pilas altas con inoculación en maduración; T5: Inoculación inicial, pilas bajas durante todo el proceso; T6: Compostaje sin inocular, pilas bajas durante todo el proceso. \*Valor correspondiente a la mezcla inicial.

Según Sánchez et al., (2025) se produce una acidificación inicial del medio ligada a los ácidos orgánicos presentes en los residuos iniciales, que desciende aún más al continuar la actividad metabólica de los microorganismos. Luego, a partir de la fase termofílica, se observa un aumento en el pH al ser los ácidos presentes degradados a subproductos alcalinos. Por último, en la segunda etapa mesófila, el pH se estabiliza y aumenta gradualmente, tendiendo finalmente a la neutralidad en la etapa final de maduración.

Por ende, a partir del tiempo 1 (15 días) hubo un aumento del pH que podría atribuirse a la mineralización de proteínas, aminoácidos y péptidos, produciendo una liberación de amoníaco, como se mencionó anteriormente como la posible causa de aumento de la relación C:N en este tiempo (Castrillón et al., 2006; Bernal et al., 2017). Luego hubo una disminución de este parámetro, seguido nuevamente de una posterior alcalinización en el tiempo 3 (120 días). Como se expuso previamente, tanto Bernal et al., (2017) como Sánchez et al., (2025) reportaron que, durante las fases de enfriamiento y maduración, el pH aumenta ligeramente al inicio para luego tender a la neutralidad. Como se puede observar en el Gráfico 5, este comportamiento en la etapa final no ocurrió en este ensayo para ninguno de los tratamientos. Corrales Sillo et al., (2024) reportaron en su investigación que, al analizar tratamientos con distintos porcentajes de residuos vegetales y pecuarios, el pH era progresivamente más alcalino a medida que aumentaba la proporción de residuos pecuarios en la mezcla. Por esto mismo, el comportamiento del pH en este caso puede deberse a la composición de la mezcla compostada, ya que el compost de residuos ganaderos suele ser ligeramente alcalinos en comparación a otros materiales de origen.

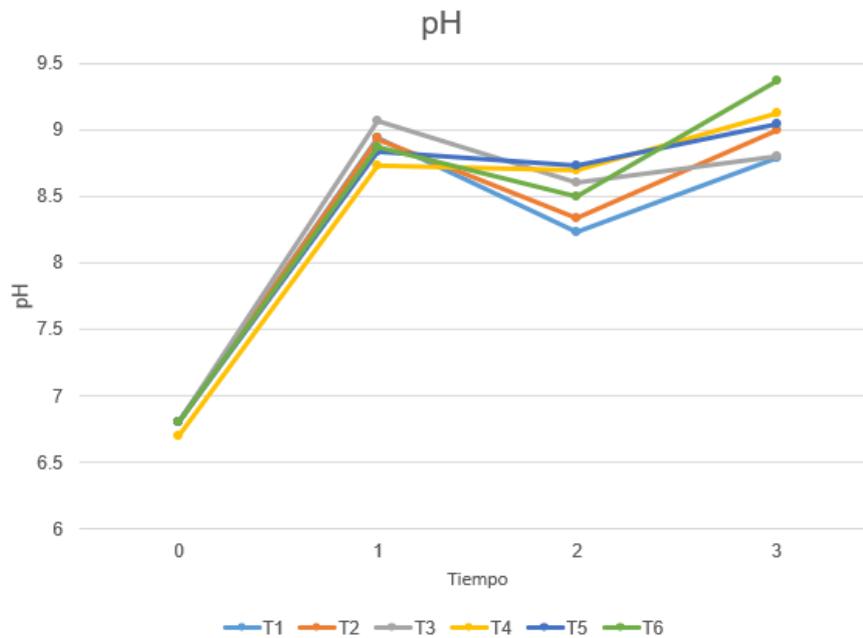


Gráfico 5. Valores de pH medidos para el proceso de compostaje de todos los tratamientos realizados.

Todos los tratamientos presentaron la misma tendencia en este parámetro, observando el mismo comportamiento del pH descrito por Sánchez et al., (2025) a lo largo del tiempo.

Sin embargo, sí puede observarse que hubo diferencias significativas en los tiempos 2 y 3 en tanto a los rangos de variación que tuvo este parámetro en los distintos tratamientos. En este caso, al ser nuestros tratamientos una combinación de tamaño de pila e inoculación, no se identifica ningún patrón que indique que esa diferencia se corresponda a alguna de estas variables. Por un lado, Tirado (2008) evaluó el efecto de distintos tamaños de pilas de compostaje sobre distintos parámetros, entre ellos el pH, y para este los resultados finales no mostraron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ). Por otro lado, en investigaciones recientes como la de Wan et al., (2020) se ha observado que el agregado de inóculos afecta a la volatilización del amoníaco y la acción de la nitrificación, entre otras cosas, indicando que diversos inóculos tienen un efecto sobre el nivel de ácidos y otros compuestos químicos en la mezcla final. También Xi et al., (2012) y Xi et al., (2015) informaron que la inoculación con consorcio de microorganismos aumentaba el contenido de compuestos húmicos y fúlvicos, así como el grado de humificación de los productos de compostaje en inoculaciones de múltiples etapas. Esto podría indicar que el inóculo ácido-láctico aplicado pudo haber generado esa diferencia en los rangos de pH obtenidos a través de la producción de productos químicos fruto de su metabolismo, pero que el tamaño de pila no tiene efecto sobre este mismo parámetro. Sin embargo, al tener tratamientos con variables combinadas no se puede afirmar de forma concluyente la causa específica de esta variación.

Finalmente, todos los tratamientos presentaron valores alcalinos comparándolos con los rangos sugeridos por todos los autores, por lo que podría necesitarse de una corrección para su aplicación final. Los tratamientos 1 y 3 fueron los que tuvieron un valor final más cercano a los límites recomendados, siendo ambos tratamientos sin inoculación en etapa de maduración y pila grande en las etapas finales.

### Conductividad eléctrica (CE)

La CE indica el nivel de salinidad de un compost. Se inició este ensayo con valores iguales en todos los tratamientos (Tabla 19).

En el tiempo 1 (15 días) se puede observar un aumento de CE en el T1, T2 y T3 para luego disminuir gradualmente en el tiempo 2 y 3. Distintos autores han determinado que este indicador tiende a aumentar debido a la mineralización de la MO y la concentración de iones, para luego disminuir gradualmente hacia la etapa de madurez (Wong et al., 1995; Meseguer, 2016). En esta investigación el comportamiento siguió esta dinámica, excepto en el T4, T5 y T6 en los que no hubo un aumento en el tiempo 1, sino más bien una reducción gradual de la CE (letra A). Esta posible disminución puede atribuirse a fenómenos de dilución provocados por los riegos del material (Bueno et al., 2008).

Tabla 19. Valores medios de Conductividad Eléctrica  $\pm$ EE (unidades) para los 6 tratamientos de compostaje en tres tiempos de medición. Letras distintas indican diferencias significativas para Kruskal -Wallis ( $p < 0.05$ ) y Tiempo 2 y 3 LSD Fischer ( $p < 0.05$ ).

Tratamiento*	CE						
	Inicio	Tiempo 1 (15 días)	Tiempo 2 (55 días)	Tiempo 3 (120 días)			
1		7,89 $\pm$ 0,60	C	4,10 $\pm$ 0,77	A	2,68 $\pm$ 0,49	A
2		7,49 $\pm$ 0,17	BC	4,66 $\pm$ 0,24	A	3,23 $\pm$ 0,26	AB
3		7,53 $\pm$ 0,60	BC	5,93 $\pm$ 0,43	B	3,83 $\pm$ 0,36	BC
4	6,68 $\pm$ 0,54*	6,42 $\pm$ 1,30	ABC	6,16 $\pm$ 0,58	B	3,94 $\pm$ 0,27	C
5		5,25 $\pm$ 0,70	A	4,94 $\pm$ 0,01	A	2,91 $\pm$ 0,51	A
6		6,57 $\pm$ 0,30	AB	5,70 $\pm$ 0,16	B	3,03 $\pm$ 0,33	A
SE <sub>ANOVA</sub>	0,31			0,32		0,22	

T1: Compostaje tradicional, pilas altas; T2: Compostaje en pilas altas, incorporación de inóculo en fase de maduración; T3: Inoculación inicial en pilas bajas, apilado posterior en pilas altas; T4: Inoculación inicial en pilas bajas, apilado posterior en pilas altas con inoculación en maduración; T5: Inoculación inicial, pilas bajas durante todo el proceso; T6: Compostaje sin inocular, pilas bajas durante todo el proceso.

\*Valor correspondiente a la mezcla inicial.

Como puede observarse, todos los tratamientos presentan el mismo comportamiento del indicador. Si bien existen diferencias significativas entre los tratamientos en los distintos tiempos, se cree que surgen a partir de otros factores ajenos a los manejos, como puede ser la dilución causada por el riego del material en este tiempo.

## 4.3 Calidad de los compost obtenidos

### 4.3.1 Estabilidad y Madurez

Los valores de los parámetros analizados para este ensayo fueron comparados con el Marco Normativo para la Producción, Registro y Aplicación de Compost de la Resolución Conjunta 1/2019 (SCyMA, SENASA, 2019).

Dentro de los parámetros de estabilidad (Tabla 20) tanto el CSA como la CSA/Ntotal presentaron valores levemente por encima del límite establecido. Estos parámetros se utilizan para conocer la fracción activa e inestable del C orgánico, es decir, el C fácilmente degradable para los microorganismos. Los tratamientos 5 y 6 que corresponden a pila chica con y sin inoculación respectivamente, fueron los que presentaron valores más cercanos a los indicados. Por otro lado, el IRE proporciona información del grado de actividad biológica de un compost. Se considera que un compost es muy estable biológicamente cuando el IRE  $< 0,5 \text{ mg O}_2 \text{ g MO. h}^{-1}$ . Sin embargo, valores aceptables de estabilidad biológica son aquellos con IRE  $< 1$  (Barrena Gómez et al., 2006; Rizzo, 2020). Teniendo en cuenta esto último, los tratamientos 2, 4 y 6 fueron aquellos que cumplieron con el límite indicado. Rizzo (2020) obtuvo valores de IRE de 0,25 y 0,45  $\text{mg O}_2 \text{ g MO. h}^{-1}$  con ensayos de compost de 40% y 60% de guano de ponedoras, considerando al material final estable biológicamente. En este caso se utilizó un 30% de guano de ponedoras y se obtuvo valores mayores de IRE para todos los tratamientos. Sin embargo, esto puede deberse a una falta de tiempo en todos los tratamientos para lograr una mayor estabilidad y madurez.

Sánchez-Monedero (2008) y otros autores consideran al nitrógeno amoniacal  $\text{N-NH}_4^+$  como un indicador de inmadurez si está presente en valores altos (por encima de 400 mg/kg) ya que se genera durante la mineralización de compuestos nitrogenados en las primeras fases del compostaje. Por otro lado, la Relación  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  es un parámetro más fiable que el amonio por sí solo, ya que una relación baja indica que el nitrógeno amoniacal ha sido oxidado a nitrato por la acción microbiana (nitrificación), traduciéndose en madurez. Al ver la Tabla I se destaca que todos los tratamientos cumplieron con los valores límite de nitrógeno amoniacal  $\text{N-NH}_4^+$ , pero solo el T5 cumplió con el límite establecido para la Relación  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$ , estando todos los tratamientos restantes con valores levemente por encima del establecido. Kumar et al. (2005) analizaron la evolución de contenidos de  $\text{N-NH}_4^+$  y  $\text{N-NO}_3^-$  durante el compostaje de sedimentos contaminados, observando que el contenido de  $\text{N-NH}_4^+$  disminuyó de 725 mg/kg a 144 mg/kg hacia el final del proceso y la relación  $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$  se redujo a 0,03, indicando una madurez adecuada del compost. En este caso, el compostaje tuvo el mismo efecto, tendiendo a la madurez. Sin embargo, este parámetro también indica que aún no se ha logrado totalmente al haber aún actividad microbiana trabajando con el nitrógeno amoniacal restante.

El ICR (índice de crecimiento relativo) mostró valores adecuados para todos los tratamientos, siendo los valores menores correspondientes al T5. El T1 y T2 fueron

los que obtuvieron mejores resultados indicando un compost maduro y seguro para uso agrícola. Gao et al. (2009) señalaron en sus estudios que valores bajos pueden señalar toxicidad o inmadurez. Los valores de ICR entre 0,8 y 1,2 se los clasifica como efecto no significativo (NS) (Young et al., 2012). Teniendo esto en cuenta, solo el T5 presentó un efecto significativo al obtener un valor de 0,77.

Si bien ningún tratamiento cumplió con todos los criterios de estabilidad y madurez, la mayoría presentó condiciones aceptables para su uso agrícola si consideramos los valores de fitotoxicidad dados por el ICR. Los tratamientos 2, 4 y 6 son los que presentaron valores más cercanos a un compost listo para su uso, especialmente si se les otorga más tiempo para su maduración. En general se considera que se requiere de más tiempo de compostaje para estabilizar la materia orgánica.

Tabla 20. Valores de los parámetros de Estabilidad y Madurez para todos los tratamientos en el Tiempo 3, junto con los valores límites establecidos por la Norma Conjunta del 01/2019.

Indicador	Parámetro	Unidades	Tratamientos						Norma Conjunta 01/2019
			1	2	3	4	5	6	
<i>Estabilidad - Madurez</i>	CSA	g/Kg MS	13 ± 2 abc	14 ± 1 bc	15 ± 1 bc	15 ± 2 c	11 ± 4 ab	10 ± 2 a	< 10
	Rel. CSA/Ntotal		0,9 ± 0,1 abc	1,0 ± 0,0 abc	1,0 ± 0,0 bc	1,0 ± 0,1 c	0,8 ± 0,1 ab	0,8 ± 0,1 a	≤0,7
	IRE (MO)	mgO <sub>2</sub> .gMO.h <sup>-1</sup>	1,5 ± 0,0 c	0,8 ± 0,1 a	1,3 ± 0,2 b	0,9 ± 0,2 a	1,1 ± 0,0 b	0,7 ± 0,1 a	≤1*
	N-NH <sub>4</sub>	mg N-NH <sub>4</sub> /Kg MS 70°C	61,68 ± 7,80 a	134,09 ± 34,77 c	127,11 ± 13,27 c	124,29 ± 6,55 bc	64,95 ± 33,89 a	82,70 ± 25,29 ab	≤400
	Rel. N- NH <sub>4</sub> / N- NO <sub>3</sub>		0,4 ± 0,1 a	0,5 ± 0,0 a	0,5 ± 0,0 a	0,5 ± 0,1 a	0,3 ± 0,2 a	0,5 ± 0,2 a	< 0,3
	ICR		1,00 ± 0,00	0,99 ± 0,00	0,91 ± 0,00	0,84 ± 0,00	0,77 ± 0,00	0,94 ± 0,00	

\* Barrena Gómez, R. (2006).

#### 4.3.2 Elementos Potencialmente Tóxicos y Microorganismos patógenos

Los residuos orgánicos pueden ser una fuente de contaminación puntual de metales pesados y otros elementos, que a bajas concentraciones generan toxicidad en organismos vivos. Como se mencionó anteriormente, esto determina también la calidad final del producto obtenido.

En la Tabla 21 se observan los valores de ETP obtenidos para todos los tratamientos. Según la Norma Conjunta, las letras A y B indican clase en función a la calidad, siendo A aquellos que no presentan restricciones de uso (mejor calidad) y B presentando mayores restricciones (menor calidad). Todos los Tratamientos cumplieron con los límites establecidos para ambas clases para uso seguro en agricultura. Gómez et al., (2024) obtuvieron resultados similares al compostar residuos urbanos y agroindustriales como hojas arboles urbanos, estiércol de pollo, bagazo de cervecería y rumen, dando concentraciones de metales pesados por dentro de la normativa al compostarlos. En este caso, sólo el hecho de compostar los residuos produjo el efecto deseado independientemente de los tratamientos y su manejo diferencial, al estar todos los valores muy por debajo de los límites fijados.

Por otro lado, se puede ver en la Tabla 22 los límites establecidos por la normativa para microorganismos patógenos y parásitos. Tanto para Coliformes fecales, como para *Salmonella sp.* y *Ascaris lumbricoides*, todos los tratamientos presentaron valores mucho menores a los esperados. Rizzo (2020) obtuvo los mismos resultados comparando compost y digeridos anaeróbicos con muestras de guanos de aves de corral, los cuales presentaron mejores condiciones higiénicas.

Es interesante destacar en T5 y T6 que, si bien presentaron todos los valores dentro de los límites, fueron los que presentan los valores más altos de coliformes fecales. Esto podría indicar una menor eficiencia del proceso higienizante, siendo esto consecuente con el manejo en pila chica durante todo el proceso que se realizó en ambos tratamientos, alcanzando temperaturas menores que el resto de los manejos y a las establecidas por la resolución de la Norma Conjunta 01/2019. Esto tiene una relación directa con el proceso de higienización, estudiado por Millner et al., (2015) que logrando temperaturas mayores en pilas estáticas y en hileras se mejoraba la inactivación de patógenos.

Tabla 21. Valores de las concentraciones de distintos elementos químicos.

Indicador	Parámetro	Unidades	Tratamientos						Norma Conjunta 01/2019
			1	2	3	4	5	6	
EPT	Cadmio	mg/Kg MS (70°C)	1,15 ± 0,13 c	0,80 ± 0,10 ab	0,65 ± 0,08 a	0,74 ± 0,10 a	0,98 ± 0,16 bc	0,63 ± 0,14 a	≤ 1,5 (A) / ≤ 3 (B)
	Cobre	mg/Kg MS (70°C)	39,1 ± 7,7 ab	57,7 ± 12,5 b	35,7 ± 11,6 a	35,0 ± 7,6 a	34,0 ± 16,4 a	37,3 ± 9,7 a	≤ 150 (A) / ≤ 450 (B)
	Cromo total	mg/Kg MS (70°C)	14,5 ± 3,8 c	12,7 ± 0,9 bc	10,6 ± 2,0 ab	9,1 ± 1,4 a	10,0 ± 0,6 ab	12,6 ± 0,7 bc	≤ 100 (A) / ≤ 270 (B)
	Mercurio	mg/Kg MS (70°C)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	≤ 0,7 (A) / ≤ 5 (B)
	Niquel	mg/Kg MS (70°C)	6,5 ± 3,0 a	5,5 ± 1,3 a	5,2 ± 0,7 a	4,5 ± 0,3 a	7,2 ± 3,5 a	6,5 ± 1,8 a	≤ 30 (A) / ≤ 120 (B)
	Plomo	mg/Kg MS (70°C)	17,8 ± 2,1 a	18,7 ± 5,0 a	20,1 ± 4,9 a	18,7 ± 3,7 a	27,8 ± 13,7 a	24,8 ± 9,1 a	≤ 100 (A) / ≤ 150 (B)
	Cinc	mg/Kg MS (70°C)	247,84 ± 25,78 a	226,27 ± 29,89 a	268,75 ± 14,70 a	231,07 ± 24,58 a	261,84 ± 84,69 a	277,84 ± 22,46 a	≤ 300 (A) / ≤ 1100 (B)
	Arsénico	mg/Kg MS (70°C)	3,7 ± 0,1 c	3,0 ± 0,4 ab	3,0 ± 0,1 a	2,9 ± 0,2 a	3,5 ± 0,4 bc	3,3 ± 0,2 abc	≤ 15 (A) / ≤ 30 (B)

Tabla 22. Valores de los parámetros de microorganismos patógenos en el Tiempo 3 para todos los Tratamientos realizados.

Indicador	Parámetro	Unidades	Tratamientos						Norma Conjunta 01/2019
			1	2	3	4	5	6	
Higienización	Coliformes fecales	NMP/gr MS	131 ± 6 bc	105 ± 33 abc	89 ± 20 ab	51 ± 65 a	226 ± 16 d	172 ± 58 cd	<1000 NMP/g MS70°C
	<i>Salmonella</i> sp.	NMP/4g MS	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1NMP/4g MS70°C
	<i>Ascaris lumbricoides</i>	<1 HUEVO/4g	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1 HUEVO/4g MS70°C

#### 4.3.3 Calidad Agronómica

En la Tabla 23 se pueden observar los resultados de todos los parámetros de calidad para todos los tratamientos.

Si tenemos en cuenta el pH que analizamos anteriormente, podemos observar que todos los tratamientos tuvieron valores de pH por encima del valor máximo, siendo los tratamientos 1, 2 y 3 los más cercanos al rango establecido. Diversos autores han obtenido resultados similares debido a la mineralización de la materia orgánica y de la degradación de compuestos ácidos, aminoácidos y proteínas ligado a la etapa de madurez, dando como resultado un pH final más alcalino (Cayuela et al., 2006; Bustamante et al., 2008). Por otro lado, Bárbaro et al. (2019) encontraron que los valores de pH fueron superiores en los tratamientos donde se utilizó estiércoles de aves de corral, maíz triturado y aserrín pino como componentes de sustratos. Esto sugiere que, dejando de lado los tratamientos diferenciales, el pH dependerá más de la mezcla inicial que del tipo de manejo que se realice para su tratamiento. En caso de ser aplicado en suelos o plantas sensibles, este parámetro deberá ser corregido en todos los casos.

En tanto a la humedad y CE, los valores se encontraron por debajo de lo recomendado para el primero, mientras que para el segundo se encontraron dentro de los valores permitidos. El nivel mínimo de humedad recomendado para enmiendas de suelo utilizado en la producción de diferentes cultivos en los EE.UU es de 35% (US Composting Council, 2001), por lo que se considera que los contenidos de humedad en nuestro estudio fueron deficientes, no solo incumpliendo el contenido de humedad recomendado por la normativa, sino que también incumpliendo el mínimo recomendado en mucho de los tratamientos. En cuanto a la CE, Barbaro et al. (2019) obtuvieron valores de CE de 2,66 en compost generados a partir de un 40% de guano de ponedoras en su composición inicial. En nuestro caso, se utilizó un 30% de guano de ponedoras en la mezcla inicial, pero se obtuvieron valores de CE un poco más altos que en este estudio. Esto puede deberse a que aún el material no se encontraba completamente estabilizado y maduro.

Los valores de materia orgánica fueron buenos para todos los tratamientos teniendo valores entre un 30% - 40%. En tanto al contenido de Ntotal, todos los compost obtuvieron valores por encima del mínimo establecido por las directrices del US Composting Council (2001) para la aplicación agrícola de los compost (Ntotal  $\geq$  10 g/kg). Si comparamos el contenido de Nitrógeno a lo largo de nuestro ensayo, podemos observar cómo hay una pérdida constante de este elemento al avanzar el proceso. Moore et al. (1997) encontraron que la volatilización del nitrógeno de residuos avícolas aumenta cuando los valores de pH superan a 7, lo que condice con nuestro ensayo al tener pH alcalinos. Por otro lado, los valores de fósforo total se

encontraron un poco por debajo de los valores recomendados por esta misma directriz (Fósforo total  $\geq 10$  g/kg) en todos los tratamientos.

Las concentraciones de K reportados en compost varían entre 0,7 a más de 12 g/kg, con una media de 5,4 g/kg (Kahn et al., 2005). En nuestro caso, los valores de este macronutriente variaron entre 9 - 17 g/kg siendo los valores más altos para los tratamientos 3 y 4. Todos los tratamientos presentaron buen contenido de todos los macronutrientes.

Teniendo en cuenta los valores de Relación C:N, Humedad, MO, CE y contenidos de N, P, K podemos decir que todos los tratamientos presentan una buena calidad agronómica, exceptuando los valores de pH básicos, que necesitaran ser corregidos en caso de ser aplicado en suelos o plantas sensibles.

Una vez establecido que todos los tratamientos cumplieron con las condiciones establecidas para su uso agrícola, podemos determinar cuáles presentaron una mejora en la calidad final respecto del compostaje tradicional tanto en pilas grandes como en chicas (T1 y T6). Podemos observar que ambos tratamientos con manejo en pila chica, tanto con (T5) y sin inoculación (T6), presentaron los menores valores en términos de contenido de macronutrientes y características físico-químicas frente al resto de los tratamientos.

Comparando los tratamientos 3 y 4, correspondientes ambos a compostaje en pila chica y luego grande, podemos observar que el T4 obtuvo valores menores que el T3 en todos los parámetros, excepto para los contenidos de K y P finales (sin diferencias significativas). Esto podría sugerir que el agregado del inóculo tanto en etapas iniciales como en madurez en este tipo de manejo (pila chica y luego grande) mejora el contenido final de estos macronutrientes. Los resultados de estos dos tratamientos fueron mejores en términos de calidad final que los obtenidos en el T5 y T6 (pila chica con inoculación en etapa mesófila inicial y sin inoculación).

Finalmente, el T2 fue el que presentó mejores valores en todos los parámetros en comparación con el resto de los manejos analizados. El T2 presentó una mejora generalizada frente al resto de los manejos, excepto en el contenido final de K que, si bien posee un valor final aceptable, es uno de los menores valores para este parámetro. Por otro lado, el T1 obtuvo no sólo menores valores que el T2 para algunos parámetros, sino que también presentó menores valores en comparación con otros manejos (como con los T5 y T6). Esto sugiere que, independientemente del manejo en pilas, la aplicación del inóculo en cualquiera de las etapas produce una mejora en la calidad final del compost.

Tabla 23. Valores de los parámetros de calidad en el Tiempo 3 para todos los Tratamientos realizados.

Indicador	Parámetro	Unidades	Tratamientos						Norma Conjunta 01/2019
			1	2	3	4	5	6	
	pH		8,8 ± 0,2 a	8,9 ± 0,3 a	8,8 ± 0,1 a	9,1 ± 0,1 ab	9,0 ± 0,3 ab	9,4 ± 0,1 b	5,0-8,5
	Humedad	%	39,17 ± 2,54 b	34,64 ± 3,79 ab	35,04 ± 7,73 ab	29,10 ± 1,46 a	29,54 ± 4,70 a	33,48 ± 1,00 ab	< 60
	CE	dS/m	2,68 ± 0,49 a	3,23 ± 0,26 ab	3,83 ± 0,36 bc	3,94 ± 0,27 c	2,91 ± 0,51 a	3,03 ± 0,33 a	<4 (A) / <6 (B)
	Relación C/N		14,80 ± 0,94 a	15,87 ± 0,08 a	15,04 ± 1,15 a	14,93 ± 0,53 a	15,30 ± 2,15 a	15,21 ± 0,42 a	<20 (A) / <30 (B)
<i>Calidad</i>	Ntotal	g/Kg MS (70°C)	14,42 ± 0,22 a	14,48 ± 0,52 a	14,31 ± 0,97 a	14,23 ± 0,43 a	12,69 ± 3,10 a	13,02 ± 1,40 a	
	Ntotal	%	1,44 ± 0,02 a	1,45 ± 0,05 a	1,43 ± 0,10 a	1,42 ± 0,04 a	1,27 ± 0,31 a	1,30 ± 0,14 a	
	NTK	g/Kg MS (70°C)	14,30 ± 0,20 a	14,22 ± 0,55 a	14,05 ± 0,99 a	13,98 ± 0,49 a	12,51 ± 3,08 a	12,85 ± 1,35 a	
	N-Nitratos	g/Kg MS (70°C)	0,15 ± 0,02 a	0,26 ± 0,09 c	0,25 ± 0,02 bc	0,25 ± 0,06 bc	0,18 ± 0,02 abc	0,17 ± 0,06 ab	
	Norganico	g/Kg MS (70°C)	14,2 ± 0,2 a	14,1 ± 0,6 a	13,9 ± 1,0 a	13,8 ± 0,5 a	12,4 ± 3,0 a	12,8 ± 1,3 a	
	Materia orgánica	%	36,8 ± 1,8 ab	39,6 ± 1,6 b	37,0 ± 1,7 ab	36,6 ± 1,2 ab	32,7 ± 4,3 a	34,1 ± 3,5 a	≥20%
	COT	%	21,3 ± 1,0 ab	23,0 ± 0,9 b	21,5 ± 1,0 ab	21,2 ± 0,7 ab	19,0 ± 2,5 a	19,8 ± 2,0 a	
	Fósforo total	g/Kg MS (70°C)	8,6 ± 0,4 ab	9,1 ± 0,7 b	8,7 ± 1,2 ab	9,0 ± 1,4 ab	7,4 ± 0,6 a	7,7 ± 0,5 ab	
	Potasio	g/Kg MS (70°C)	9,84 ± 2,64 a	12,61 ± 1,47 ab	15,14 ± 2,09 bc	16,75 ± 3,05 c	11,18 ± 1,33 a	13,47 ± 0,88 abc	

## 5. CONCLUSIONES

Mediante el estudio de estos tratamientos, analizando el manejo del compostaje tanto en tamaño de pilas (pilas chicas, grandes y la combinación de ambas) y el momento de inoculación (etapa mesófila inicial y/o etapa de maduración), se logró cumplir con los objetivos propuestos. Se pudo evaluar el efecto del inóculo y las distintas alternativas de manejo de compostaje de residuos agropecuarios y agroindustriales sobre la dinámica del proceso de compostaje y sobre la calidad de los compost finales.

Por un lado, los tratamientos tuvieron un efecto sobre los comportamientos de los indicadores del compostaje, pero no todos. Los tratamientos combinados modificaron el comportamiento de la temperatura, el pH y la humedad. El único indicador que no presentó ninguna modificación en función de los tratamientos fue la relación C:N.

Por otro lado, al considerar los parámetros de estabilidad y madurez solo los T2, T4 y T6 cumplieron con ambos conceptos. Todos los tratamientos produjeron una mejora en contenido de EPT y microorganismos patógenos, notando una menor eficiencia en la higienización para los tratamientos en pila chica. Todos los tratamientos presentaron una calidad agronómica final adecuada, siendo de nuevo los menores valores correspondientes a los tratamientos en pila chica.

Teniendo en cuenta todos estos parámetros, se puede decir como conclusión que el T2, correspondiente a compostaje en pila grande con inoculación en etapa de maduración, fue el que presentó mejores condiciones finales tanto en términos de estabilidad y madurez como también de calidad final, cumpliendo también con las normativas restrictivas de EPT y contenido de patógenos. Este tratamiento fue el que obtuvo el valor más alto de MO, presentó un buen contenido relativo de macronutrientes, obtuvo el menor pH alcalino en comparación al resto de los tratamientos, y presentó características físico-químicas adecuadas, calificándolo, así como el compost con mejor calidad final. Este resultado concuerda también con lo analizado en los parámetros de estabilidad y madurez, los cuales presentaron mejores aptitudes para este tratamiento.

La decisión final del mejor tratamiento fue no solo en base a los resultados de calidad, sino también teniendo en cuenta la búsqueda de una mayor eficiencia en el proceso. Si bien los tratamientos 4 y 6 presentaron características finales adecuadas, se consideraron también otros factores como inversión de tiempo, dinero y mano de obra, disponibilidad de espacio para aplicar el tratamiento elegido, gastos en maquinarias y disponibilidad de residuos. Al tener pilas grandes, se podrá tratar una mayor cantidad de residuos en el mismo espacio en comparación a las pilas chicas. Se obtendrá una mayor cantidad de producto final para el mismo tiempo, espacio, y mano de obra, disminuyendo los costos asociados. El compost final tendrá también mejor calidad, aumentando su valor en el mercado.



Estudios posteriores podrían investigar el efecto de la aplicación de distintas dosis del inóculo y su impacto en la calidad final del compost. También se podría considerar cambiar la proporción de residuos elegidos para la mezcla inicial y evaluar el impacto que esto produce en distintos parámetros (especialmente en el pH, CE y humedad final) junto con la aplicación del inóculo.

Finalmente, mediante este trabajo se demuestra cómo la revalorización de residuos es posible, dando un producto con aptitud agronómica a partir de desechos sin aparente valor económico. A pesar de numerosos avances e innovaciones tecnológicas, los residuos aún son considerados como elementos ajenos al sistema de producción, por lo que se considera al compostaje y sus diversos manejos como una alternativa factible para revalorizar esos residuos y reintegrarlos al circuito económico, logrando la circularidad y disminuyendo los impactos ambientales asociados.

## BIBLIOGRAFÍA

Aguilar-Paredes, A., Valdés, G., Araneda, N., Valdebenito, E., Hansen, F., & Nuti, M. (2023). *Microbial Community in the Composting Process and Its Positive Impact on the Soil Biota in Sustainable Agriculture*. *Agronomy*, 13(2), 542. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020542>

Almaraz-Sánchez, C. I. (2022). Processing agroindustry by-products for obtaining value-added products and reducing environmental impact. *Journal of Chemistry*, 2022, Article 3656932. <https://doi.org/10.1155/2022/3656932>

Annan, J. S., y White, R. K. (1998). Evaluation of techniques for measuring air filled porosity in composts of municipal biosolids and wood chips, in K.C DAS and E.F graves, *Proceedings of the 1998 Conference on Composting in the Southeast* (pp. 88-96).

Awasthi, M. K., Wang, Q., Wang, Z., Zhao, J., Ren, X., & Li, R. (2020). *Effect of biochar on greenhouse gas mitigation and process improvement during composting of vegetable waste*. *Sustainable Environment Research*, 30(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0012-9>

Barbaro L, Karlanian M, Rizzo P y Riera N (2019). Caracterización de diferentes compost para su uso como componente de sustratos. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 35(2), 126-136.

Barrena Gómez, R. (2006). Compostaje de residuos sólidos orgánicos: aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso. Tesis de doctorado en Ingeniería Química. Universidad Autónoma de Barcelona, España.

Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). *Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review*. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>

Bernal, M.P., Sommer, S.G., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L. y Michel, F.C. (2017). Current Approaches And Future Trends In Compost Quality Criteria For Agronomic, Environmental, And Human Health Benefits. Pp. 143-233. Doi:10.1016/Bs.Agron.2017.03.002

British Standards Institution. (2011). PAS 100: Specification for composted materials. BSI.

Bohórquez Santana, W. (2019). *El proceso de compostaje* (No. 1). Universidad de la Salle.

Bueno, P., Díaz, M., & Cabrera, F. (2008). Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de compostaje. En J. Moreno & R. Moral (Eds.), *Compostaje* (pp. 89–125). Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). <https://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20proceso%20de%20compostaje.pdf>

Bustamante, M. A., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F. C., Pérez-Espinosa, A., Bernal, M. P., & Moral, R. (2008). Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere*, 72(4), 551–557. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.03.030>

Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2005). *Guidelines for Compost Quality*. [https://ccme.ca/en/res/guidelines\\_for\\_compost\\_quality\\_en.pdf](https://ccme.ca/en/res/guidelines_for_compost_quality_en.pdf)

Castro Hernández, F. (2021). Optimización del proceso de elaboración y efecto de la adición de diferentes fuentes de inóculo microbiano, sobre la calidad del abono orgánico tipo compost en la empresa Abonos Vivos SA.

Cayuela, M. L., Sánchez-Monedero, M. A., & Roig, A. (2006). Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes. *Process Biochemistry*, 41(3), 616–623. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.08.007>

CCQC. (2001). Compost Maturity Index: Technical Report. California Compost Quality Council

Cedeño, Á. M. G., Pazmiño, D. E. Z., Álava, M. A. C., y Vera, B. R. V. (2020). Inóculo microbiano con capacidad celulolítica para la producción de compost en Manabí-Ecuador. *Revista Ciencia y Tecnología*, 13(2), 39-45.

Chávez, E., & Vázquez, M. (2010). *Evaluación comparativa de la calidad del compost producido a partir de diferentes combinaciones de desechos agroindustriales azucareros*. INICA - Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. <https://www.researchgate.net/publication/41676503>

Chen, Y., Song, Y., Han, J., Yang, X., Li, B., Wei, Y., & Zhang, S. (2024). *Microbial succession and correlation with physicochemical parameters during cow manure composting*. *BMC Microbiology*, 24(1), 63. <https://doi.org/10.1186/s12866-024-03449-4>

Chiumenti A., Chiumenti R., Diaz L.F., Savage G., Eggerth L. y Goldstein N. (2005). Modern composting technologies. *Biocycle. Journal of Composting Organics Recycling*. Singapore, 96 pp.

Chowdhury, M. A., de Neergaard, A., & Jensen, L. S. (2014). Potential of aeration flow rate and bio-char addition to reduce greenhouse gas and ammonia emissions during

manure composting. *Chemosphere*, 97, 16–25.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.030>

Cornell Waste Management Institute. (2005). *Compost Physics*. Recuperado de <https://compost.css.cornell.edu/physics.html>

Corrales Sillo, E. E., Luna Murillo, R. A., Carrión Benavides, C. D., Quinatoa Lozada, E. F., & Espinoza Coronel, A. L. (2024). Comparación de producción de compost con diferentes formulaciones de residuos de origen vegetal y pecuario. *Ciencia y Tecnología*, 17(2), 64–72.  
<https://revistas.uteq.edu.ec/index.php/cyt/article/view/803/911>

Danish Ministry of the Environment. (2006). *Statutory Order on Sludge and Compost from Wastewater Treatment Plants*. Environmental Protection Agency of Denmark.

De Bertoldi, M., Vallini, G. y Pera, A. (1983). The Biology Of Composting: A Review. *Waste Manag. Res.*, 1, 157-176.

X

European Compost Network. (2014). *ECN-QAS Quality Manual: European Quality Assurance Scheme for Compost and Digestate*. <https://www.compostnetwork.info>

FOSAC Perú. (s.f.). *Conductividad eléctrica en las enmiendas orgánicas (compost): importancia, efecto y recomendaciones*. Recuperado de <https://www.fosacperu.com/conductividad-electrica-en-las-enmiendas-organicas-compost-importancia-efecto-y-recomendaciones/>

Gao, M., Li, B., Yu, A., Liang, F., Yang, L., & Sun, Y. (2009). Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios. *Bioresource Technology*, 100(21), 5444–5448.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>

García-Ramos, C., Arozarena-Daza, N. J., Martínez-Rodríguez, F., Hernández-Guillén, M., Pascual-Amaro, J. Á., y Santana-Gato, D. (2019). Obtención de compost mediante la biotransformación de residuos de mercados agropecuarios. *Cultivos Tropicales*, 40(2).

Gómez, R., Bolontrade, A., Caminiti, S., López, S., & Longo, A. (2024). *Municipal and agro-industrial organic waste composts as soil amendments in agroecological horticultural systems in Argentina: Environmental and food safety evaluation*. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, Article 1338451.  
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1338451>

Hanníbal, B., Rafaela, V., y Guevara, L. (2016). Obtención de compost a partir de residuos sólidos orgánicos generados en el mercado mayorista del Cantón Riobamba. *European Scientific Journal*, 12, 76-94.

Hettiarachchi, H., Caucci, S., & Schwärzel, K. (2020). Organic waste composting through nexus thinking: Practices, policies, and trends. Springer Nature.

Haug, R.T. (1993). The Practical Handbook Of Compost Engineering. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, Estados Unidos.

Instituto Nacional de Estadística y Censos INDEC, República Argentina (2023). Informe de avance del nivel de actividad. Primer trimestre del 2023. Cuentas Nacionales, Vol. 7, n° 10

Kahn, B. A., Stoffella, P. J., Calvert, D. V., He, Z. y Yang, X. 2005. Ventajas que suponen la utilización de compost para la nutrición fosfórica, potásica, cálcica, magnésica y de micronutrientes. Paper presented at the Utilización de compost en los sistemas de cultivo hortícola.

Kumar, M., Ou, Y.-L., & Lin, J.-G. (2005). Bioremediation of contaminated lake sediments and evaluation of maturity indices as indicators of compost stability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2(2), 251–262. <https://doi.org/10.3390/ijerph2005020009>

Lara, M. S. M., Lizaola, R. Q., Victoria, D. E., Alarcón, A., Barra, J. D. E., Santos, A. T., y Martínez, F. V. C. (2018). Generación de un inoculante acelerador del compostaje. *Revista argentina de microbiología*, 50(2), 206-210.

López, M., Soliva, M., & Martínez-Farré, F. X. (2005). Composting of anaerobically digested sewage sludge: evaluation of organic matter stabilization and nitrogen and phosphorus availability. *Bioresource Technology*, 96(5), 561–568. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.006>

Malwana, C., Weerasinghe, T. K., & Pilapitiya, S. (2013). Determination of optimal pile dimensions during thermophilic windrow composting of municipal solid waste (MSW) in Sri Lanka. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*, 3(6), 552.

Martínez, F. R., Monteros, D. A. N., Muñoz, D. P., Hernández, M. D. J. M., y Mirón, A. O., (2019). Efecto De Las Dimensiones De Las Pilas En El Desarrollo De La Fase Termofílica En Un Proceso De Composteo.

Martinez, L. E., Rizzo, P. F., Bres, P. A., Riera, N. I., Beily, M. E., y Young, B. J. (2021). Compendio de métodos analíticos para la caracterización de residuos, compost y efluentes de origen agropecuario y agroindustrial. Ediciones INTA.

Mazzarino, M. J. y Satti, P. S. (2012). Compostaje en la Argentina. Experiencias en producción, calidad y uso: Editorial UNRN.

Meseguer, M. (2016). Compostaje de residuos sólidos urbanos: Fundamentos y aplicaciones. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 33(2), 45–58.

Miller, F. C., Macauley, B. J., & Harper, E. M. (1990). Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. In D. A. Lewandowski (Ed.), *Microbiology of the Composting Process* (pp. 1–44). CRC Press.

Millner, P. D., Ingram, D. T., & Hirsh, D. C. (2015). Physical covering for control of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. in static and windrow composting processes. *Applied and Environmental Microbiology*, 81(2), 689–697.  
<https://doi.org/10.1128/AEM.04002-14>

Ministerio de Economía Argentina (2022). Panorama Productivo: Evolución de los principales indicadores de la actividad productiva.

Ministerio de la Presidencia. (2013). *Real Decreto 506/2013, sobre productos fertilizantes*. Boletín Oficial del Estado, España.  
<https://www.boe.es/eli/es/rd/2013/06/28/506>

Moore, P. A.; Huff, Jr. W. E.; Daniel, T. C.; Edward, D. R.; Saucer, T. C. 1997. Effect of aluminum sulfate on ammonia fluxes from poultry litter in commercial broiler houses. In: Proceedings of Fifth International Symposium on Livestock Environment, Transactions of the ASAE 2, pp. 883–891

Moreno Casco, J. y Moral Herrero, R. (2008). Compostaje: Ediciones Mundi-Prensa.

Municipalidad de Luján, (2020). Plan de acciones vinculadas a la emergencia ambiental: Luján limpio. (pp. 5–7). Luján, Buenos Aires.

Municipio de Luján, (2022). Luján actual. <https://www.lujan.gob.ar/> (verificado en Marzo 2023)

Negri Rodriguez, L. M., Urfalino, D. P., Aimaretti, N. R., Albe Aguirre, R. G., y Monetta, P. M. (2022). Aprovechamiento de residuos, descartes y subproductos agroalimentarios y agropecuarios: tecnologías para la obtención de alimentos y bioproductos para cadenas productivas. Resultados obtenidos 2019-2022.

Pagans, E., Barrena, R., Font, X., & Sánchez, A. (2006). Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature. *Chemosphere*, 62(9), 1534–1542.  
[https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.06.044:contentReference\[oaicite:7\]{index=7}](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.06.044:contentReference[oaicite:7]{index=7})

RAL-GZ 251. (n.d.). *Quality assurance for compost: Quality requirements and test methods*. German Institute for Quality Assurance and Labelling (RAL).  
[https://www.kompost.de/fileadmin/user\\_upload/ral\\_english\\_2011.pdf](https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/ral_english_2011.pdf)

Raut et. al, (2007). Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste. A compost maturity analysis perspective. *Bioresour Technol.*, 99, pp. 6512-6519

Rengifo Barboza, I. M. (2022). Optimización del proceso de compostaje de residuos sólidos orgánicos, en el distrito de Contamana, Provincia de Ucayali, Departamento de Loreto.

Richard, T. L. (1996). *Composting basics: Excessive pile size*. Cornell Waste Management Institute, Cornell University.  
<https://ecommons.cornell.edu/handle/1813/33799>

Rizzo, P. F., (2020). Análisis integral para el manejo del guano de aves ponedoras: caracterización, bioestabilización y valorización de los productos generado.

Rynk, R., Black, G., Gilbert, J., Biala, J., Bonhotal, J., Schwarz, M., & Cooperband, L. (Eds.). (2021). *The Composting Handbook: A how-to and why manual for farm, municipal, institutional and commercial composters*. Academic Press.

Rynk, R., Sailus, M., Popow, J. S., Bernat, J., Grant, R., Van de Kamp, M., Willson, G. B., Singley, M. E. y Richard, T. L. 1994. *On-farm composting handbook*: New York, US: Northeast Regional Agricultural Engineering Service.

Sánchez ÓJ, Ospina DA, Montoya S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Manage.* 69:136-153.

Sánchez, A., Gea, T., Font, X., Artola, A., Barrena, R., & Moral-Vico, J. (Eds.). (2025). *Composting: Fundamentals and recent advances*. Royal Society of Chemistry.  
<https://www.rsc.org>

Sánchez, A., Gabarrell, X., Artola, A., Barrena, R., Colón, J., Font, X. y Komilis, D. (2016). Composting Of Wastes. Pp. 77-106. In: Taherzadeh, M.J. y Richards, T. (Eds.). *Resource Recovery To Approach Zero Municipal Waste*. Taylor And Francis Group, Boca Ratón, Florida, United States.

Sánchez-Monedero, M. A. (2008). Evolución de la materia orgánica durante el compostaje: parámetros indicadores de la estabilidad y madurez del compost. En J. Moreno & R. Moral (Eds.), *Compostaje de residuos orgánicos* (pp. 115–140). Mundi-Prensa.

Saveyn, H., & Eder, P. (2014). *End-of-waste criteria for biodegradable waste subjected to biological treatment (compost & digestate): Technical proposals*. Publications Office of the European Union.

SCyMA y SENASA. 2019. Resolución Conjunta 1/19 - Marco Normativo para la Producción, Registro y Aplicación de Compost. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Argentina:

Retrieved from <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-1-2019-318692/texto>.

Stentiford E. (1996). Composting control: principles and practice. En: European Commission. Memorias. International symposium 1996 (M. de Bertoldi, P. Sequi, B. Lemmes y T. Papi, Eds.). The Science of Composting. Chapman & Hall, Glasgow, pp 49-59.

Tirado, S. M. (2008). *Effects of turning frequency, pile size and season on physical, chemical and biological properties during composting of dairy manure/sawdust (DM+S)* (Tesis de Maestría). The Ohio State University.

US Composting Council. (2001). *Test Methods for the Examination of Composting and Compost (TMECC)*. U.S. Department of Agriculture & U.S. Composting Council. <https://tmecc.org/tmecc/>

U.S. Environmental Protection Agency. (1993). *40 CFR Part 503: Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge, Appendix B – Pathogen Treatment Processes*. Recuperado de [https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-B\\_to\\_part\\_503](https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/appendix-B_to_part_503)

U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). (1993). *Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge; Final Rules. Federal Register*, 58(32), 9248–9415.

Usda, Uscc. 2001. Test Methods For The Examination Of Composting And Compost (Tmecc). Edaphos International, Department Of Agriculture And Composting Council, Usa, Houston.

Vargas-Sánchez, A., Trujillo-Ortega, M. E., Reyes-Sánchez, L., & Mendoza-Elvira, S. (2020). Using an endogenous inoculum to accelerate organic matter degradation by composting in a pig farm. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(4), 985–996. <https://doi.org/10.20937/RICA.53416>

Vélez-Sánchez C, Pinedo-Álvarez C, Viramontes-Oliva O, Ortega C, Melgoza-Castillo A. (2008). Bio-tecnologías ambientales para el tratamiento de residuos ganaderos (Environmental biotechnologies for treatment of livestock waste, in Spanish). *Creativ Desarr Tecnol*. 2:131-144

Wan, L., Wang, X., Cong, C., Li, J., Xu, Y., Li, X., & Hou, F. (2020). *Effect of inoculating microorganisms in chicken manure composting with maize straw. Bioresource Technology*, 301, 122730.

Wong, J. W. C., Li, S. W. Y., & Wong, M. H. (1995). Coal fly ash as a composting material for sewage sludge: Effects on microbial activities. *Environmental Technology*, 16(6), 527–537. <https://doi.org/10.1080/09593331608616294>

Young B J, Riera N I, Beily M E, Bres P A, Crespo D C y Ronco A E. (2012). Toxicity of the effluent from an anaerobic bioreactor treating cereal residues on *Lactuca sativa*. *Ecotox Environ Safe*, 76, 182-186. doi: doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.09.019

Xi, B., He, X., Dang, Q., Yang, T., Li, M., Wang, X., Li, D., & Tang, J. (2015). Effect of multi-stage inoculation on the bacterial and fungal community structure during organic municipal solid wastes composting. *Bioresource Technology*, 196, 399–405.

Xi, B.D.; He, X.S.; Wei, Z.M.; Jiang, Y.H.; Li, M.X.; Li, D.; Li, Y.; Dang, Q.L (2012). Effect of inoculation methods on the composting efficiency of municipal solid wastes. *Chemosphere* **2012**, 88, 744–750.

Zeng GY, Chen M, Huang Y, Zhang D, Huang J, Jiang H, Yu R. (2010). Effects of inoculation with *Phanerochaete chrysosporium* at various time points on enzyme activities during agricultural waste composting. *Bioresour Technol*. 10;101:222-227.

Zhang, L., & Sun, B. (2016). *Microbes as vital additives for solid waste composting: ideal pH ranges and effects on microbial communities*.