



Secado de biosólidos municipales para su uso en compostaje y combustión

Drying of municipal biosolids for use in composting and combustion

 <https://doi.org/10.47230/ra.v9i1.147>

Recibido: 10-01-2026 **Aceptado:** 15-05-2026 **Publicado:** 10-06-2026

Gessela Lisbeth Quishpe Jaramillo¹
 <https://orcid.org/0009-0001-5042-5416>

Alison Katherine Maldonado Tandalla⁴
 <https://orcid.org/0009-0001-4630-7222>

Diego Andrés Chancusig Espinoza²
 <https://orcid.org/0009-0009-1476-3221>

Sabinne Nickol Castillo Aldaz³
 <https://orcid.org/0009-0004-3598-553X>

1. Estudiante en la Universidad Nacional de Chimborazo; Ambato, Ecuador.
2. Estudiante en la Universidad Nacional de Chimborazo; Ambato, Ecuador.
3. Estudiante en la Universidad Nacional de Chimborazo; Ambato, Ecuador.
4. Estudiante en la Universidad Nacional de Chimborazo; Ambato, Ecuador.

Volumen: 9

Número: 1

Año: 2026

Paginación: 103-120

URL: <https://alcance.unesum.edu.ec/index.php/alcance/article/view/147>

***Correspondencia autor:** gessela.quishpe@unach.edu.ec

RESUMEN

El secado de biosólidos municipales constituye una alternativa técnica, ambiental y socialmente viable para la gestión sostenible de los residuos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales. El presente artículo tiene como objetivo analizar de manera integral el proceso de secado de biosólidos, su origen, finalidad y los principales métodos empleados, así como su aplicación en compostaje o combustión. La investigación se desarrolló bajo un enfoque descriptivo-exploratorio, sustentado en revisión bibliográfica y análisis comparativo de información técnica y científica. Los resultados evidencian que la reducción del contenido de humedad mejora la estabilidad del material, facilita su manejo y amplía sus posibilidades de valorización, contribuyendo a los principios de la economía circular y a la reducción de impactos ambientales asociados a la disposición final.

Palabras clave: Biosólidos municipales, Secado de biosólidos, Compostaje, Combustión, Economía circular.

ABSTRACT

The drying of municipal biosolids is a technically, environmentally, and socially viable alternative for the sustainable management of waste generated in wastewater treatment plants. This article aims to comprehensively analyze the biosolids drying process, its origin, purpose, and the main methods employed, as well as its application in composting and combustion. The research was conducted using a descriptive-exploratory approach, based on a literature review and comparative analysis of technical and scientific information. The results show that reducing moisture content improves the material's stability, facilitates its handling, and expands its valorization possibilities, contributing to the principles of the circular economy and reducing the environmental impacts associated with final disposal.

Keywords: Municipal biosolids, Biosolids drying, Composting, Combustion, Circular economy.



Creative Commons Attribution 4.0
International (CC BY 4.0)

Introducción

El tratamiento de las aguas residuales urbanas genera grandes volúmenes de lodos residuales que, tras procesos de estabilización, se denominan biosólidos. Estos materiales presentan altos contenidos de humedad y materia orgánica, lo que dificulta su manejo, transporte y disposición final. En las últimas décadas, la gestión inadecuada de los biosólidos ha sido identificada como una fuente potencial de contaminación ambiental y riesgos sanitarios, especialmente cuando son dispuestos en rellenos sanitarios sin tratamiento previo. Tal como lo expone (Cristina, 2021) en su estudio “Estabilización y manejo de lodos residuales en la Planta de Tratamiento Municipal. Portoviejo”, este caso refleja cómo la falta de un manejo integral de lodos puede convertirse en un problema ambiental y operativo serio, actualmente no cuenta con un manejo adecuado de los lodos generados, dificultando su disposición, tratamiento y captura de nutrientes lo que está afectando la eficiencia del sistema, genera malos olores, y complica lograr una disposición final adecuada para evitar impactos ambientales y sanitarios. La investigación sugiere que; “esta situación puede estar generando una acumulación de residuos que no se integran correctamente al proceso de tratamiento, lo que puede causar contaminación del suelo y afectaciones operativas en la planta”.

En este contexto, el secado de biosólidos municipales se posiciona como una etapa clave dentro de las estrategias de tratamiento y valorización de residuos, ya que permite disminuir el contenido de agua, reducir el volumen y peso del material, mejorar su estabilidad y favorecer su aprovechamiento posterior (Portal web del Ayuntamiento de Madrid). Diversos estudios como “A review of the influence of heat drying, alkaline treatment, and composting on biosolids characteristics and their impacts on nitrogen dynamics in biosolids-amended soils” señalan que el secado facilita el uso de biosólidos en aplicaciones como el com-

postaje agrícola y la combustión para generación de energía, alineándose con los principios de sostenibilidad y economía circular. (Skrzypczak, Trzaska, Gil, Izydorczyk, & Chojnacka, 2024)

La necesidad de implementar tecnologías eficientes que permitan la gestión integral de residuos nace como consecuencia el crecimiento poblacional expansión urbana, misma que ha incrementado de manera significativa la generación de aguas residuales, lo que ha derivado en una mayor producción de biosólidos en las plantas de tratamiento municipales, de modo que se busca minimizar los impactos ambientales y la optimización de los recursos disponibles. En este sentido, el secado se ha consolidado como una operación unitaria esencial dentro del tratamiento de biosólidos, al actuar como un puente entre la estabilización del lodo y su disposición o reutilización final. (Agreda Oña, Moreno Ávila, Daza Guerra, & Martínez Yanchapaxi, 2025)

Desde el punto de vista técnico, los biosólidos contienen una elevada fracción de agua que puede superar el 70 %, lo que incrementa considerablemente los costos asociados al transporte y almacenamiento. El secado permite reducir esta humedad hasta niveles adecuados para su manejo seguro, disminuyendo la generación de lixiviados y la proliferación de microorganismos patógenos (Giraldo & Lozano de Yunda, 2006). Asimismo, la reducción del contenido de humedad contribuye a la disminución de olores desagradables, uno de los principales factores de rechazo social hacia las instalaciones de tratamiento de biosólidos.

El secado de biosólidos también desempeña un papel fundamental en la valorización de estos materiales como recurso. En aplicaciones agrícolas, el secado previo mejora la estabilidad del biosólido y facilita su integración en procesos de compostaje, permitiendo la obtención de enmiendas orgánicas que aportan nutrientes y materia orgánica al suelo (Potisek-Talavera, Figueroa-Viramontes,

González-Cervantes, Jasso-Ibarra, & Orna-Castillo, 2010). Por otro lado, cuando el objetivo es la valorización energética, el secado resulta indispensable para incrementar el poder calorífico del material y garantizar una combustión eficiente, segura y conforme a la normativa ambiental vigente.

Existen diversas tecnologías de secado de biosólidos, que van desde métodos naturales, como el secado solar, hasta sistemas térmicos avanzados de operación continua. La selección de la tecnología adecuada depende de múltiples factores, entre ellos las características del biosólido, la capacidad de la planta, la disponibilidad energética, las condiciones climáticas y los requerimientos ambientales (Díaz Gómez, Cifuentes Osorio, Sierra Cárdenas, & Villalobos Enciso, 2020). Cada alternativa presenta ventajas y limitaciones en términos de eficiencia, costos de inversión y operación, consumo energético y control de emisiones.

En el marco de la gestión sostenible de residuos, el secado de biosólidos se integra como una estrategia que contribuye a la reducción del volumen de residuos destinados a disposición final, al tiempo que promueve su reutilización y valorización (Universidad Internacional de Andalucía, 2025). Este enfoque permite avanzar hacia modelos de economía circular, donde los residuos dejan de ser considerados un problema y se transforman en insumos para otros procesos productivos, reduciendo la presión sobre los recursos naturales y los impactos ambientales asociados.

Finalmente, el presente artículo tiene como objetivo analizar el secado de biosólidos municipales desde una perspectiva técnica y ambiental, describiendo su origen, características, objetivos y principales métodos de secado, así como su aplicación en procesos de compostaje y combustión. Con este artículo se busca aportar una visión integral que permita comprender la importancia del secado de biosólidos como una operación unita-

ria clave dentro de la gestión moderna de aguas residuales urbanas.

Materiales y métodos

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque descriptivo-exploratorio, basado en la revisión documental de literatura científica, normas técnicas y documentos institucionales relacionados con el secado y aprovechamiento de biosólidos municipales. Se analizaron artículos científicos publicados en bases de datos académicas como ScienceDirect, MDPI y PubMed, así como informes técnicos de organismos internacionales.

Adicionalmente, se realizó un análisis comparativo de los métodos de secado de biosólidos, considerando criterios como eficiencia de reducción de humedad, requerimientos energéticos, viabilidad operativa y aplicaciones finales del material seco.

Estrategia de búsqueda y fuentes de información

La recopilación de información para la presente investigación se llevó a cabo mediante una búsqueda sistemática y exhaustiva en bases de datos científicas y técnicas de reconocido prestigio, seleccionadas por su relevancia en los ámbitos de la ingeniería ambiental, el tratamiento de aguas residuales y la gestión de residuos sólidos. Las principales fuentes consultadas incluyeron Google Scholar, ScienceDirect, Scopus y SciELO, así como repositorios institucionales y documentos técnicos de organismos internacionales como la United States Environmental Protection Agency (EPA), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), los cuales constituyen referentes internacionales en el manejo y valorización de biosólidos.

Para la identificación de los documentos científicos y técnicos se emplearon descriptores especializados relacionados con el tratamiento y secado de biosólidos, se-

leccionados a partir de tesauros técnicos y términos normalizados utilizados en ingeniería ambiental. Estos descriptores fueron combinados mediante operadores booleanos (AND, OR) con el fin de ampliar o delimitar los resultados de búsqueda según la pertinencia temática. Entre las principales combinaciones empleadas se incluyen:

“Biosólidos municipales” AND “Secado”

“Tratamiento de lodos” AND “Valorización”

“Secado térmico” OR “Secado solar” AND “Biosólidos” “Compostaje” OR “Combustión” AND “Lodos de depuradora”

“Gestión de biosólidos” AND “Impacto ambiental”

Estas combinaciones permitieron localizar literatura científica relevante relacionada con el origen, composición y tratamiento de biosólidos, así como con las diferentes tecnologías de secado, sus ventajas y limitaciones, el control de patógenos y olores, y las alternativas de aprovechamiento mediante compostaje y valorización energética. La información recopilada fue analizada y seleccionada en función de su actualidad, rigor metodológico y aplicabilidad a contextos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, constituyendo la base teórica y técnica para el desarrollo del presente estudio.

Criterios de inclusión y exclusión

Con el propósito de garantizar la calidad, pertinencia y actualidad de la información analizada en la presente investigación, se establecieron criterios explícitos de inclusión y exclusión para la selección de fuentes bibliográficas y documentales. Como criterios de inclusión se consideraron artículos científicos, libros especializados y reportes técnicos publicados entre los años 2015 y 2026, período que refleja el desarrollo reciente de tecnologías de tratamiento, seca-

do y valorización de biosólidos municipales. Asimismo, se incluyeron documentos redactados en idioma español e inglés que abordan de manera explícita el origen, la caracterización, los métodos de secado y las aplicaciones de los biosólidos en procesos de compostaje y valorización energética.

De igual forma, se priorizaron estudios provenientes de revistas científicas indexadas, organismos internacionales y entidades técnicas reconocidas, tales como la United States Environmental Protection Agency (EPA), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y manuales técnicos de ingeniería ambiental, que aportaran información verificable y metodológicamente sustentada sobre el manejo y secado de biosólidos.

Limitaciones del estudio

Entre las principales limitaciones de la investigación se encuentra la dependencia de información secundaria, lo que implica que los resultados están condicionados a la calidad y disponibilidad de los estudios consultados. Además, la diversidad de condiciones operativas, climáticas y normativas entre países puede limitar la extrapolación directa de algunos resultados a contextos locales específicos.

Otra limitación relevante es la variabilidad en la composición de los biosólidos, la cual influye de manera significativa en la eficiencia de los métodos de secado y en las alternativas de valorización. Esta variabilidad dificulta la comparación directa entre estudios y resalta la necesidad de considerar condiciones particulares de cada planta de tratamiento.

Procedimiento de selección de los estudios

El proceso de selección de los documentos se llevó a cabo en varias etapas. En una primera fase, se identificó un universo inicial de publicaciones a partir de las búsquedas realizadas en las bases de datos seleccionadas. Posteriormente, se efectuó

un primer filtrado mediante la revisión de títulos y resúmenes, con el fin de descartar aquellos estudios que no cumplieran con los criterios establecidos.

En una segunda fase, se realizó una lectura crítica y analítica de los textos completos, evaluando aspectos como la claridad metodológica, la coherencia teórica y la pertinencia de los aportes en relación con el objetivo del estudio.

Para el tratamiento y análisis de la información recopilada se empleó la técnica de análisis de contenido, la cual permitió identificar patrones, categorías técnicas y relaciones conceptuales presentes en la literatura científica y técnica revisada sobre el secado de biosólidos municipales. Esta técnica resultó adecuada para examinar de manera sistemática los enfoques, metodologías y resultados reportados en estudios previos, facilitando la interpretación comparativa de la información.

Los métodos y aplicaciones identificados fueron clasificados en tres dimensiones analíticas, en coherencia con los objetivos y resultados del estudio:

- Tecnologías de secado de biosólidos, centradas en métodos térmicos directos, térmicos indirectos, secado solar y secado por aireación forzada, considerando su eficiencia, requerimientos energéticos y viabilidad operativa.
- Aplicaciones del biosólido seco, vinculadas al compostaje, la valorización energética mediante combustión y otras alternativas de aprovechamiento, evaluando sus beneficios ambientales y técnicos.
- Aspectos ambientales y sanitarios, asociados al control de patógenos, olores, emisiones atmosféricas y riesgos operativos durante el proceso de secado.

Este enfoque metodológico permitió estructurar los hallazgos de manera clara y coherente, proporcionando una visión integral del secado de biosólidos municipales como operación unitaria clave dentro del tratamiento de aguas residuales. Asimismo, sentó las bases para el análisis comparativo y la discusión de los resultados en los apartados posteriores del artículo

Resultados

Biosólidos

Los biosólidos son materiales sólidos o semisólidos de naturaleza predominantemente orgánica, generados como subproducto del tratamiento de aguas residuales domésticas en plantas de tratamiento municipales, tras haber sido sometidos a procesos de separación, estabilización y, en algunos casos, deshidratación. Estos materiales contienen una fracción significativa de materia orgánica, nutrientes esenciales y microorganismos, cuya composición y características dependen del origen del efluente y de las tecnologías de tratamiento empleadas. Cuando reciben un tratamiento adecuado que garantiza su estabilidad y control sanitario, los biosólidos pueden ser valorizados de manera segura en aplicaciones como el compostaje, la recuperación de suelos o la generación de energía, contribuyendo a una gestión sostenible de los residuos (Vélez Zuluaga, 2007).

Origen de los biosólidos

Los biosólidos se generan a partir del tratamiento de aguas residuales domésticas y otros materiales orgánicos. Este proceso comprende varias etapas secuenciales:

1. **Tratamiento primario**, en el cual las aguas residuales son sometidas a procesos físicos para la remoción de sólidos gruesos y sedimentables.
2. **Tratamiento secundario**, que utiliza procesos biológicos para degradar la materia orgánica disuelta y suspendida.

3. **Digestión anaeróbica**, donde los lodos generados son estabilizados mediante microorganismos en ausencia de oxígeno, produciendo biogás como subproducto.
4. **Deshidratación**, cuyo objetivo es reducir el volumen y peso del lodo, obteniéndose finalmente los biosólidos.

Composición de los biosólidos

La composición de los biosólidos es altamente variable y depende del tipo de efluente tratado, del proceso tecnológico aplicado, de la edad del material y de las condiciones ambientales de almacenamiento. Desde el punto de vista físico, se caracterizan por su contenido de sólidos totales (TS) y sólidos volátiles (VS). Los biosólidos líquidos presentan entre 2 % y 12 % de TS, los deshidratados entre 12 % y 30 %, y los secos o compostados alcanzan valores cercanos al 50 %.

La materia orgánica representa entre el 50 % y el 70 % del peso seco del biosólido. En cuanto a nutrientes, destacan el nitrógeno y el fósforo, con contenidos aproximados de nitrógeno total cercanos al 3 %, predominando el nitrógeno orgánico. Los metales traza presentes incluyen zinc, cobre, níquel, plomo y cadmio, generalmente asociados a la fracción orgánica y mineral, con concentraciones que, en la mayoría de los casos, se encuentran dentro de los límites normativos (Wijesekara , y otros, 2016).

Objetivos del secado de biosólidos municipales

El secado de biosólidos municipales tiene como objetivo principal la reducción del contenido de humedad, lo que permite disminuir significativamente el volumen y peso del material, facilitando su transporte, manejo y almacenamiento. Asimismo, el secado contribuye a la estabilización del biosólido, limitando la actividad microbiana, reduciendo la generación de olores y favoreciendo el control sanitario.

Desde una perspectiva ambiental, este proceso disminuye los impactos asociados a la disposición final, al reducir la generación de lixiviados y la cantidad de residuos enviados a rellenos sanitarios. Finalmente, el secado permite adecuar el contenido de humedad del biosólido para su valorización mediante compostaje o combustión. (Giraldo & Lozano de Yunda, 2006).

Biosólidos para compostaje y combustión

Los biosólidos pueden ser valorizados mediante alternativas como el compostaje y la combustión, cuya selección depende de sus características fisicoquímicas, especialmente el contenido de humedad, la estabilidad biológica y la presencia de contaminantes.

Biosólidos para compostaje

El compostaje es un proceso biológico aeróbico que permite la estabilización de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos, generando un producto similar al humus. Para su aplicación, los biosólidos deben presentar un contenido de humedad entre 40 % y 60 % y una adecuada fracción de sólidos volátiles.

La mezcla con materiales estructurantes ricos en carbono, como restos vegetales o aserrín, permite mejorar la relación C/N y la aireación. Este proceso reduce patógenos y disminuye la biodisponibilidad de metales pesados, incrementando la seguridad del compost final (Fernández-Gutiérrez, Manali, Tsamoutsoglou, Gikas, & Lara Guillén, 2023).

Biosólidos para combustión

La combustión de biosólidos es una alternativa de valorización energética que requiere contenidos de humedad inferiores al 10–20 %. El alto contenido de materia orgánica confiere a los biosólidos un poder calorífico comparable al de otros combustibles sólidos de baja calidad.

Este proceso reduce significativamente el volumen del residuo y permite la destrucción total de patógenos. Sin embargo, genera cenizas concentradas en metales pesados y requiere estrictos sistemas de control de emisiones atmosféricas (Rojas Remis & Mendoza Espinosa, 2012).

Métodos de secado de biosólidos

El secado es una etapa fundamental en la gestión de biosólidos, ya que mejora su estabilidad, facilita su transporte y amplía sus alternativas de aprovechamiento.

Tabla 1. Métodos de secado de biosólidos

Método de secado	Principio de funcionamiento	Equipos más utilizados	Ventajas	Desventajas
Secado térmico directo	Utiliza gases calientes en contacto directo con el biosólido, transfiriendo calor principalmente por convección. (HERNANDEZ)	Secadores rotatorios, secadores de banda	Alta eficiencia; permite alcanzar elevados contenidos de sólidos en tiempos cortos; adecuado para valorización energética	Alto consumo energético; requiere sistemas de control de emisiones y olores
Secado térmico indirecto	El calor se transfiere a través de superficies metálicas sin contacto directo con los gases calientes. (Shane Le Capitaine & Carrie Carlson)	Secadores de discos, secadores de paletas	Mayor control del proceso; menor riesgo de emisiones contaminantes	Elevados costos de inversión y mantenimiento
Secado por aireación forzada	Circulación de aire a temperatura ambiente o ligeramente calentado a través del biosólido. (S&P, 2021)	Lechos aireados, sistemas de ventilación forzada	Bajo consumo energético; útil como etapa complementaria	Eficiencia limitada; no permite alcanzar contenidos de sólidos muy elevados
Secado solar	Aprovecha la energía solar para reducir el contenido de humedad del biosólido. (Ahmad, Abdullah, Ahmad, Koji, & Yuzir, 2022)	Secadores solares tipo invernadero	Mínimo consumo energético; tecnología sostenible	Requiere grandes superficies; largos tiempos de secado; alta dependencia de las condiciones climáticas

Funcionamiento básico de un secador de biosólidos

El funcionamiento básico de un secador de biosólidos consiste en reducir el contenido de humedad del lodo proveniente del tratamiento de aguas residuales mediante la aplicación de energía térmica y flujo de aire, con el fin de disminuir su volumen, mejorar su estabilidad y facilitar su manejo o aprovechamiento final.

En primer lugar, los biosólidos húmedos ingresan al secador después de un proceso previo de deshidratación mecánica, como centrifugación o filtración, normalmente con

contenidos de humedad elevados. El material se introduce de forma controlada en el sistema de secado, ya sea sobre bandejas, en una cinta transportadora, en un tambor rotatorio o sobre una superficie móvil, dependiendo del tipo de secador, como se observa en la tabla 2.

Posteriormente, se suministra calor, que puede provenir de fuentes como aire caliente, vapor, gases de combustión o energía solar. Este calor provoca la evaporación del agua contenida en los biosólidos. Al mismo tiempo, un flujo de aire atraviesa el material, arrastrando el vapor de agua generado y evitando la saturación del

ambiente interno del secador, lo que mejora la eficiencia del proceso.

Durante el secado, se controla la temperatura, el tiempo de residencia y la velocidad del aire para evitar la degradación

del material y garantizar una reducción homogénea de la humedad. En muchos sistemas, el proceso térmico también contribuye a la higienización del biosólido, reduciendo microorganismos patógenos.

Tabla 2. Tipos de secador de biosólidos

Tecnología de secado	Principio de funcionamiento	Condiciones operativas típicas	Ventajas técnicas y ambientales	Limitaciones técnicas	Aplicabilidad en Ecuador
Secador rotatorio	Secado continuo mediante un cilindro metálico giratorio con aletas internas que incrementan el contacto entre biosólidos y aire o gases calientes, promoviendo la evaporación de la humedad. (YIBU)	Altas temperaturas de operación y elevados caudales de aire caliente; adecuado para biosólidos con alto contenido de humedad inicial.	Alta capacidad de procesamiento, secado relativamente uniforme y potencial de higienización del material.	Alto consumo energético; necesidad de sistemas adicionales para control de emisiones, polvo y olores.	Limitada a grandes PTAR con disponibilidad energética e infraestructura industrial.
Secador de banda	Circulación controlada de aire caliente a través de capas delgadas de biosólidos dispuestas sobre bandas transportadoras perforadas dentro de una cámara cerrada. (Schwingbioset)	Temperaturas moderadas y tiempos de residencia ajustables; operación continua y controlada.	Secado homogéneo, menor degradación del biosólido, reducción significativa de volumen y peso.	Alta inversión inicial y requerimientos de mantenimiento especializado.	Viable para PTAR medianas y grandes en zonas urbanas con acceso a energía estable.
Secador solar tipo invernadero	Sistema de convección libre que aprovecha la radiación solar mediante efecto invernadero, con ventilación forzada alimentada por energía solar y almacenamiento pasivo de calor. (López Cerino & Chávez García, 2018)	Operación a bajas y medias temperaturas; capacidad de secado entre 800 y 1.000 kg; funcionamiento continuo incluso en periodos nocturnos.	Bajo consumo energético, autonomía operativa, reducción del tiempo de secado hasta en 50 %, menor impacto ambiental.	Dependencia parcial de las condiciones climáticas y mayor requerimiento de área.	Alta aplicabilidad en PTAR pequeñas y medianas, especialmente en regiones andinas y amazónicas.

Comparación de los diferentes tipos de secadores y su aplicación en biosólidos

Tabla 3. Análisis del tipo de secadores y su aplicación en biosólidos

Tipo de secador	Tipo de calentamiento	Operación	Ventajas principales	Desventajas principales	Aplicación en biosólidos
Secador de túnel	Directo	Continuo	Secado uniforme	Requiere gran espacio	Plantas medianas
Secador	Directo	Continuo	Muy rápido	Arrastre de	Biosólidos finos

neumático				partículas	
Secador	Directo	Continuo	Separación	Control limitado	Presecado
ciclónico			eficiente	de humedad	
Secador de cama	Directo	Continuo	Buen control de	Mayor	Secado
vibratoria			secado	mantenimiento	controlado
Secador de cama	Directo	Continuo	Alta eficiencia	Alto consumo	Grandes plantas
fluidizada			térmica	energético	
Secador spray	Directo	Continuo	Secado	Muy costoso	Usos especiales
			instantáneo		
Secador rotatorio	Directo	Continuo	Alta capacidad y	Genera olores	Plantas de
			robustez		tratamiento
Secador de	Directo	Discontinuo	Simple y	Proceso lento	Pequeñas plantas
bandejas con			económico		
aire					
Secador de	Indirecto	Continuo	Buen control	Alto costo	Uso industrial
tambor			térmico		
Secador con	Indirecto	Continuo	Secado uniforme	Diseño complejo	Biosólidos
circulación a					estabilizados
través del lecho					
Secador de	Indirecto	Discontinuo	Baja temperatura	Muy costoso	Aplicaciones
bandejas al vacío					especiales
Secador por	Indirecto	Discontinuo	Alta calidad final	Costo elevado	No común en
congelación					biosólidos

Fuente: Elaboración propia con base en (Universidad de Sonora, 2007) y (AUCANCELA & CHAVEZ, 2009)

Ventajas y desventajas del secado solar de biosólidos

Tabla 4. Ventajas y desventajas del secado solar de biosólidos

Tecnología de secado	Ventajas	Desventajas
Secado solar	Bajo consumo energético al utilizar radiación solar. Bajos costos de operación y mantenimiento. Tecnología simple y de fácil implementación. Desinfección parcial por exposición prolongada al sol. Baja huella de carbono en comparación con secadores térmicos. Adecuado para proyectos comunitarios o plantas pequeñas y medianas en zonas con alta radiación solar. (Bożym & Bok, 2017)	Proceso lento (días o semanas). Alta dependencia de las condiciones climáticas. Requiere grandes extensiones de terreno. Riesgo de olores y proliferación de vectores. Control limitado de la humedad final. Requiere medidas de bioseguridad para evitar impactos ambientales y sanitarios. (Bożym & Bok, 2017)
Secado térmico	Reducción significativa del volumen y peso de los biosólidos. Destrucción efectiva de patógenos, permitiendo la obtención de biosólidos Clase A. Producto más estable y con menor generación de olores. Mayor control y uniformidad de la humedad final. Menor requerimiento de área física. Facilita la valorización agrícola, energética o industrial. (United States Environmental Protection Agency, 2006)	Alto consumo energético. Elevada inversión inicial en equipos e infraestructura. Altos costos de operación y mantenimiento. Potencial emisión de gases y olores, requiriendo sistemas de control. Necesidad de pretratamiento del lodo. Alta complejidad operativa y requerimiento de personal especializado. (United States Environmental Protection Agency, 2006)

Tabla 5. Aplicaciones de los biosólidos secos (compostaje)

Tipo de aplicación	Uso específico	Beneficios principales	Limitaciones / Requisitos
Compostaje y uso agrícola	Enmienda orgánica y compost	Incrementa la materia orgánica del suelo. Aporta nutrientes esenciales (N, P, K). Mejora la estructura y fertilidad del suelo.	Requiere control de metales pesados y patógenos. Necesita agentes estructurantes y tiempo de maduración.
	Mejora agronómica y revegetación	Restauración de suelos degradados. Apoyo a proyectos de reforestación y recuperación ambiental.	Aplicación restringida por normas de calidad sanitaria y ambiental.
	Sustratos y acondicionadores de suelo	Uso en viveros forestales y agrícolas. Mejora la retención de agua y aireación del sustrato.	Requiere curado y estabilización previa del biosólido.
	Beneficios ambientales	Retención de carbono en el suelo. Mejora de la capacidad de retención hídrica.	Beneficios dependen de la dosificación y manejo adecuado.
Combustión y valorización energética	Combustible en calderas industriales	Generación directa de calor. Reducción del uso de combustibles fósiles.	Necesita bajo contenido de humedad y control de emisiones.
	Co-combustión en centrales o cementeras	Recuperación energética eficiente. Aprovechamiento de infraestructuras existentes.	Requiere mezcla homogénea y control de cenizas.
	Pelletizado y briqueteado	Mejora el manejo, transporte y eficiencia de combustión.	Costos adicionales de procesamiento.
	Gasificación y pirólisis	Producción de syngas, bio-oil y biochar. Alta eficiencia energética potencial.	Alta inversión tecnológica y control ambiental estricto.
	Cogeneración (CHP)	Producción simultánea de calor y electricidad.	Requiere diseño específico de planta.

Fuente: (Román, Martínez, & Pantoja, 2013)

Durante el secado de biosólidos municipales se producen olores desagradables debido a la volatilización de compuestos como sulfuro de hidrógeno, amoníaco y compuestos orgánicos volátiles, los cuales, si bien no suelen representar un riesgo directo para la salud, generan molestias y rechazo social, especialmente en plantas ubicadas cerca de zonas urbanas. Por ello, el control de olores constituye un aspecto crítico en el diseño y operación del proceso, y desde el enfoque de las operaciones unitarias se basa en la captación, tratamiento

y neutralización de los gases antes de su liberación a la atmósfera. (Chávez, Garcés, Araya, & Sanchez, 2020)

De manera complementaria, el secado cumple una función esencial en el control de patógenos, ya que la reducción de humedad y la aplicación de calor permiten la inactivación de microorganismos como bacterias, virus y huevos de helmintos, condición indispensable para la reutilización segura del biosólido en procesos de compostaje o como combustible alternativo. (Cota & Ponce, 2008)

El secado de biosólidos es una de las operaciones unitarias con mayor demanda energética, siendo la energía requerida dependiente del contenido inicial de humedad, el tipo de equipo y la temperatura de operación, lo que hace necesario optimizar el balance energético para reducir costos y emisiones. Este proceso genera emisiones gaseosas que incluyen vapor de agua, partículas finas y gases olorosos, las cuales deben ser controladas mediante sistemas de extracción, tratamiento y monitoreo continuo.

Asimismo, el uso de equipos robustos y de operación continua en plantas municipales garantiza una adecuada reducción

de humedad e higienización del material, mientras que el manejo y almacenamiento del biosólido seco resultan fundamentales para evitar rehumectación, generación de polvo y riesgos sanitarios.

Finalmente, el proceso implica riesgos laborales y ambientales asociados a altas temperaturas, polvo combustible y exposición a gases, por lo que requiere estrictas medidas de seguridad; pese a ello, el secado presenta un balance ambiental positivo al reducir el volumen y los riesgos sanitarios del residuo, aunque con impactos derivados del consumo energético y las emisiones generadas.

Tabla 6. Control, Equipo, Manejo e impactos de el secado de los biosólidos

Control de olor durante el secado	Principales compuestos causantes de olor	Compuesto	Origen	Característica del olor
		Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	Descomposición anaerobia	Huevo podrido
		Amoníaco (NH ₃)	Degradación de proteínas	Olor penetrante
		Mercaptanos	Materia orgánica	Olor intenso y persistente
	COV	Volatilización térmica	Olor orgánico	
	Métodos de control de olores	Método	Principios de funcionamiento	Aplicación
			Degradación	Plantas
		Biofiltros	biológica de gases	municipales
		Lavadores de gases (scrubbers)	Absorción química	Secado térmico
		Encapsulamiento	Confinamiento del proceso	Secadores cerrados
Oxidación térmica		Dstrucción por temperatura	Plantas de alta capacidad	
Control de patógenos en el secado	Patógenos comunes en biosólidos	Tipo	Ejemplos	
		Bacterias	Salmonella, E. coli	
		Virus	Enterovirus	
		Parásitos	Huevos de helmintos	
	Condiciones típicas de inactivación	Parámetro	Valor aproximado	
		Temperatura mínima	70 °C	

		Tiempo de exposición	30–60 min
		Humedad final	< 10–15 %
Emisiones generadas en el secado	Tipos de emisiones	Emisión	Fuente
		Vapor de agua	Evaporación
		Material particulado	Arrastre de sólidos
		Gases sulfurados	Materia orgánica
		CO ₂	Procesos térmicos
	Sistemas de control	Sistema	Función
Ciclones		Retención de partículas	
Filtros de mangas		Control de polvo	
Biofiltros		Tratamiento de gases	
Scrubbers		Absorción química	
Energía necesaria para secar biosólidos	Factores que influyen en el consumo energético	Factor	Influencia
		Humedad inicial	Mayor humedad → más energía
		Tipo de secador	Eficiencia variable A mayor
		Temperatura	temperatura, mayor consumo
		Recuperación de calor	Reduce demanda energética
	Valores típicos de energía	Proceso	Energía aproximada
Secado térmico		800–1200 kWh/t de agua	
Secado solar		Baja, dependiente del clima	
Equipos usados en plantas municipales	Equipos más comunes	Equipo	Característica
		Secador rotatorio	Alta capacidad
		Secador de banda	Operación continua
		Secador de lecho fluidizado	Alta eficiencia térmica
		Secado solar	Bajo costo energético
Manejo y almacenamiento del biosólido seco	Requisitos de almacenamiento	Aspecto	Recomendación
		Humedad	< 15 %
		Ventilación	Controlada
		Protección	Contra lluvia y plagas
		Tiempo	Almacenamiento limitado
Riesgos y seguridad en el secado de biosólidos	Riesgos principales	Riesgo	Consecuencias
		Explosión de polvo	Daños graves

Impactos ambientales del secado de biosólidos	Medidas de seguridad	Quemaduras	Contacto térmico
		Inhalación de gases	Problemas respiratorios
		Medida	Aplicación
		Equipos de protección personal	Operadores
		Sistemas de ventilación	Áreas cerradas
	Impactos positivos	Sensores de temperatura	Control del proceso
		Impacto	Beneficio
		Reducción de volumen	Menos transporte
		Eliminación de patógenos	Seguridad ambiental
		Valorización	Uso como recurso
	Impactos negativos	Impacto	Efecto
		Consumo energético	Emisiones indirectas
		Emisión de olores	Impacto social
		Material particulado	Calidad del aire

Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que el secado de biosólidos constituye una operación unitaria clave para la valorización y gestión sostenible de los residuos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales. La caracterización del origen y composición de los biosólidos destaca debido a la alta fracción orgánica y el potencial energético de los mismo, siempre y cuando son adecuadamente tratados.

El análisis de los métodos de secado muestra que las tecnologías térmicas directas e indirectas permiten alcanzar bajos contenidos de humedad en tiempos reducidos, favoreciendo su uso en combustión y generación de energía, tal como señalan (Werther & Oga-da). Sin embargo, el alto consumo energético asociado representa una limitación importante, especialmente en contextos municipales con restricciones presupuestarias.

En contraste, el secado solar se presenta como una alternativa ambientalmente sostenible, con bajo consumo energético y reducida huella de carbono. Estudios como el de (Bożym & Bok, 2017) indican que esta tecnología es especialmente viable en regiones con alta radiación solar, aunque su dependencia climática limita su aplicabilidad a gran escala.

Los resultados evidencian que tanto el secado solar como el secado térmico presentan ventajas y limitaciones significativas, cuya aplicabilidad depende principalmente de la escala de operación, los recursos disponibles y las condiciones climáticas del entorno. El secado solar destaca por su bajo consumo energético y reducida huella de carbono, lo que lo convierte en una alternativa ambientalmente sostenible y económicamente accesible, especialmente para plantas de tratamiento pequeñas y medianas. Sin embargo, su eficiencia se ve limi-

tada por los largos tiempos de secado y la alta dependencia de factores climáticos, lo que dificulta garantizar una humedad final uniforme y un control sanitario total.

En contraste, el secado térmico permite un control riguroso del proceso, alcanzando niveles de humedad bajos y estables, así como la eliminación efectiva de patógenos, posibilitando la producción de biosólidos Clase A. Estas características favorecen la valorización del biosólido en aplicaciones agrícolas, energéticas o industriales. No obstante, esta tecnología implica altos costos de inversión y operación, además de un mayor consumo energético y la necesidad de sistemas de control ambiental para mitigar emisiones gaseosas.

Desde un enfoque de sostenibilidad, el secado solar se alinea mejor con estrategias de bajo costo y bajo impacto ambiental, mientras que el secado térmico resulta más adecuado cuando se prioriza la calidad del producto final y su valorización a gran escala.

Respecto al compostaje, los resultados confirman que el secado previo mejora la estabilidad del biosólido y reduce riesgos sanitarios, facilitando su incorporación en suelos agrícolas y proyectos de restauración ambiental. Esto concuerda con lo reportado por (Gutiérrez, Manali, Tsamoutoglou, Gikas, & Guillén, 2023), quien destaca la reducción de patógenos y la mejora en la calidad agronómica del compost final.

La discusión sobre control de olores, patógenos y emisiones demuestra que el secado no debe considerarse únicamente como una etapa de reducción de humedad, sino como un proceso integral que requiere sistemas de control ambiental y medidas de seguridad operativa.

Conclusiones

El estudio confirma que los biosólidos municipales presentan una elevada fracción orgánica y un contenido significativo de hu-

medad, características que condicionan su manejo, transporte y disposición final. No obstante, cuando son sometidos a procesos adecuados de secado, estos materiales pueden transformarse en un recurso valorizable, contribuyendo a una gestión más sostenible de los residuos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Los resultados obtenidos evidencian que el secado de biosólidos constituye una operación unitaria clave, ya que permite reducir de manera efectiva el volumen y peso del material, mejorar su estabilidad fisicoquímica y favorecer el control sanitario, particularmente en términos de reducción de patógenos y olores. Estos beneficios amplían las posibilidades de aprovechamiento del biosólido en aplicaciones agrícolas y energéticas.

El análisis comparativo de los métodos de secado demuestra que las tecnologías térmicas directas e indirectas son altamente eficientes para alcanzar bajos contenidos de humedad en tiempos reducidos, lo que las hace adecuadas para procesos de valorización energética como la combustión. Sin embargo, su elevado consumo energético y los costos asociados limitan su implementación en sistemas municipales con restricciones económicas.

En contraste, el secado solar se posiciona como una alternativa ambientalmente sostenible, caracterizada por un bajo consumo energético y una reducida huella de carbono. Esta tecnología resulta especialmente viable en regiones con alta radiación solar, aunque su dependencia de las condiciones climáticas y los largos tiempos de secado restringen su aplicabilidad a gran escala.

Asimismo, se concluye que el secado previo mejora significativamente la aptitud de los biosólidos para el compostaje, al incrementar la estabilidad del material y reducir riesgos sanitarios, facilitando su uso seguro en la recuperación de suelos y enmiendas orgánicas. De igual manera, el secado es un requisito indispensable para la combustión de biosólidos, al optimizar su

poder calorífico y garantizar una destrucción eficiente de patógenos.

En el contexto ecuatoriano, caracterizado por una alta radiación solar en regiones como la Costa y la Sierra interandina, el secado solar de biosólidos representa una alternativa técnicamente viable y económicamente atractiva para municipios pequeños y medianos, donde las restricciones presupuestarias limitan la implementación de tecnologías intensivas en energía. Además, su bajo requerimiento tecnológico facilita su adopción en proyectos comunitarios y plantas descentralizadas.

No obstante, la elevada humedad ambiental y la estacionalidad de las lluvias en gran parte del país pueden reducir la eficiencia del secado solar, haciendo necesario complementar esta tecnología con cubiertas, sistemas de drenaje y protocolos de bioseguridad. Por otro lado, el secado térmico, aunque más costoso, puede ser considerado en grandes centros urbanos como Quito o Guayaquil, donde la generación de biosólidos es mayor y existe una demanda potencial para su valorización energética o industrial.

En consecuencia, la selección de la tecnología de secado en Ecuador debe basarse en un análisis integral que considere la escala de la planta, las condiciones climáticas locales, los costos de inversión y operación, y los objetivos de valorización del biosólido, priorizando soluciones sostenibles y acordes a la realidad socioeconómica del país.

Finalmente, el estudio evidencia que la selección del método de secado debe basarse en criterios técnicos, ambientales y económicos, considerando las características del biosólido, las condiciones climáticas y el objetivo de valorización. En este sentido, el secado de biosólidos debe entenderse como un proceso integral dentro de la gestión de residuos, orientado a maximizar su aprovechamiento y minimizar los impactos ambientales, en concordancia

con los principios de sostenibilidad y economía circular.

Bibliografía

- Agreda Oña, J. L., Moreno Ávila, A. S., Daza Guerra, O. R., & Martínez Yanchapaxi, A. d. (06 de 05 de 2025). Optimización del sistema de gestión de residuos del GAD municipal de salcedo a través de un sistema dinámico a través de la vinculación con la sociedad. doi:10.26820/recimundo/9.(esp).mayo.2025.282-297
- Bożym, M., & Bok, A. (julio de 2017). Advantages and disadvantages of the solar drying of sewage sludge in Poland. doi:10.4467/2353737XCT.17.217.7760
- Fernández-Gutiérrez, D., Manali, A., Tsamoutsoglou, K., Gikas, P., & Lara Guillén, A. (17 de julio de 2023). Environmental life cycle assessment of an integrated biosolids microsieving-drying-gasification pilot plant from WWTP. Obtenido de <https://www.pivotscipub.com/ges/3/3/0004>
- Giraldo, Ó., & Lozano de Yunda, A. (2006). Efecto del secado de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre (Bogotá) sobre su contenido de nutrientes, metales pesados y patógenos. Obtenido de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652006000200019#:~:text=Secado%20del%20bios%C3%B3lido,de%20secado%20\(tabla%201\)](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652006000200019#:~:text=Secado%20del%20bios%C3%B3lido,de%20secado%20(tabla%201)).
- United States Environmental Protection Agency. (septiembre de 2006). Biosolids Technology Fact Sheet. Obtenido de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-11/documents/heat-drying-factsheet.pdf>
- Wijesekara, H., Bolan, N., Kumarathilaka, P., Geekiyanage, N., Kunhikrishnan, A., Seshadri, B., . . . Vithanage, M. (2016). Chapter 3 - Biosolids Enhance Mine Site Rehabilitation and Revegetation. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00003-2>
- Ahmad, I., Abdullah, N., Ahmad, M., Koji, I., & Yuzir, A. (2022). Chapter 19 - Harnessing solar radiation for potential algal biomass production. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823764-9.00017-0>
- AUCANCELA, C., & CHAVEZ, E. (2009). DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE TUNEL PARA LA DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SECADOR DE TUNEL PARA LA. Riobamba. Obtenido de <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/60e8cab2-d779-4f90-a8ba-5a93c8aade59/content>

- Chávez, F., Garcés, J., Araya, A., & Sanchez, P. (24 de julio de 2020). Gestión de olores del Centro de Gestión de Biosólidos El Rutal. Obtenido de https://olores.org/index.php?option=com_content&view=article&id=1032:gestion-de-olores-del-centro-de-gestion-de-biosolidos-el-rutal&catid=90:odour-abatement&lang=es&acm=_264
- Cota, A., & Ponce, C. (junio de 2008). Eliminación de bacterias patógenas en lodos residuales durante el secado solar. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992008000400002
- Cristina, P. A. (23 de Noviembre de 2021). Estabilización y manejo de lodos residuales en la Planta de Tratamiento Municipal. Obtenido de https://repositoriobe.espe.edu.ec/server/api/core/bitstreams/d2940742-66e1-45f6-bf83-045be6a5c1e6/content?utm_source=chatgpt.com
- Díaz Gómez, J., Cifuentes Osorio, G., Sierra Cárdenas, E., & Villalobos Enciso, J. (Diciembre de 2020). De la generación al aprovechamiento sostenible : lodos y biosólidos de tratamiento de aguas y aguas residuales. doi:10.24267/9789585120136
- Giraldo, Ó., & Lozano de Yunda, A. (jul/dic de 2006). Efecto del secado de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre (Bogotá) sobre su contenido de nutrientes, metales pesados y patógenos. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652006000200019
- HERNANDEZ, M. Z. (s.f.). EQUIPOS MAQUINAS E INSTALACIONES INDUSTRIALES. Obtenido de UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL FRANCISCO DE MIRANDA: <https://ele.chaco.gob.ar/mod/resource/view.php?id=198788>
- López Cerino, I., & Chávez García, E. (sep./nov. de 2018). Eficacia de secador solar tipo túnel con cacao (Theobroma Cacao L.) en Tabasco. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342018000904395
- Portal web del Ayuntamiento de Madrid. (s.f.). Secado térmico de biosólidos. Obtenido de <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Secado-termico-de-biosolidos?vgnextfmt=default&vgnextoid=61f9b484853be210VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnnextchannel=3edd31d3b28fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD#:~:text=El%20Proceso%20de%20Secado%20>
- Potisek-Talavera, M. d., Figueroa-Viramontes, U., González-Cervantes, G., Jasso-Ibarra, R., & Orón-Castillo, I. (oct-dic de 2010). Aplicación de biosólidos al suelo y su efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrimentos. doi: ISSN 0187-5779
- Rojas Remis, R., & Mendoza Espinosa, L. (diciembre de 2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México (The use of biosolids for energy recovery in Mexico). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/236578740_Utilizacion_de_biosolidos_para_la_recuperacion_energetica_en_Mexico_The_use_of_biosolids_for_energy_recovery_in_Mexico
- Román, P., Martínez, M., & Pantoja, A. (2013). MANUAL DE COMPOSTAJE DEL AGRICULTOR. Obtenido de <https://www.fao.org/4/i3388s/i3388s.pdf>
- S&P. (09 de 09 de 2021). Ventilación de SILOS – Secado por aireación. Obtenido de <https://www.solerpalau.com/blog/es-es/ventilacion-de-silos-secado-por-aireacion/>
- Schwingbioset. (s.f.). Secador de lecho fluido. Obtenido de <https://www.schwingbioset.com/es/municipal-products/fluid-bed-dryer/>
- Shane Le Capitaine, & Carrie Carlson. (s.f.). Indirect Drying vs. Direct Drying. Obtenido de <https://feeco.com/rotary-dryers-indirect-vs-direct-drying/>
- Skrzypczak, D., Trzaska, K., Gil, F., Izydorczyk, G., & Chojnacka, K. (10 de julio de 2024). Guidelines for efficient nitrogen preservation in sewage sludge-based fertilizers. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174460>
- Universidad de Sonora. (2007). Obtenido de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4122/capitulo4.pdf> Universidad Internacional de Andalucía. (20 de Enero de 2025). Gestión de residuos sólidos y economía circular. Obtenido de <https://www.unia.es/vida-universitaria/blog/gestion-de-residuos-solidos-y-economia-circular#:~:text=Esta%20tecnolog%C3%ADa%20se%20alineará%20con%20los%20principios,modelo%20m%C3%A1s%20sostenible%20de%20gesti%C3%B3n%20de%20residuos.>
- Vélez Zuluaga, J. (06 de Diciembre de 2007). Los biosólidos. Obtenido de <https://repository.unilasallista.edu.co/server/api/core/bitstreams/4a286a6b-2311-4bc0-8f87-465822a8dec9/content>

YIBU. (s.f.). Sistema de soluciones y/o equipos, máquina de secado industrial. Obtenido de Secador de tambor rotatorio: <http://material-dryer.com/1-5-10-rotary->

dryer/#:~:text=Secador%20de%20tambor%20rotatorio,r%C3%A1pidamente%20la%20humedad%20n o%20deseada.&text=El%20equipo%20de%20secado%20se,de%20calcio%20y%20arcillas%20activas. &text=Alta%20capacidad%20de%20producci%C3%B3n

Cómo citar: Quishpe Jaramillo, G. L., Chancusig Espinoza, D. A., Castillo Aldaz, S. N., & Maldonado Tandalla, A. K. (2026). Secado de biosólidos municipales para su uso en compostaje y combustión. REVISTA ALCANCE, 9(1). <https://doi.org/10.47230/ra.v9i1.147>