



Aprovechamiento de lodos residuales provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de una industria maderera, para usarlos como base para un abono.

Juliana Rodríguez Saldarriaga

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero Químico

Asesor interno

Edwin Alexis Alarcón Durango, Doctor (PhD) en Ciencias Químicas

Asesor externo

Steven Andrés Reyes Schoonewolff, Especialista (Esp) en Gestión ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Química
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	(Rodríguez Saldarriaga, 2024)
Referencia	Rodríguez Saldarriaga, J. (2024). Aprovechamiento de lodos residuales provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de una industria maderera, para usarlos como base para un fertilizante. [Informe de práctica]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Se lo dedico a mis papás porque siempre estuvieron apoyándome en cada paso de este camino, sin ustedes no hubiera sido posible.

Agradecimientos

Gracias a mi tía Tatiana que no me dejó estresarme de más haciendo este proyecto y que me ayudaba a ver las cosas mucho mejor para poder seguir y sobre todo gracias a José Nisperuza, porque sin usted este proyecto no hubiera sido posible.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1 Planteamiento del problema	11
1.1 Antecedentes	12
1.1.1 Abono orgánico-Planta de agudos.....	12
1.1.2 Uso de lodos residuales como fertilizante en eucalipto – diagnóstico de investigación	13
2 Justificación.....	15
3 Objetivos	16
3.1 Objetivo general	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
4 Marco teórico	17
4.1 Técnicas de tratamiento y disposición de biosólidos, hacia la economía circular en el manejo de residuos industriales.	17
4.2 Método de tratamiento de lodos	17
4.3 Aplicaciones de los lodos residuales.....	18
4.3.1 Producción de biogás	18
4.3.2 Compostaje de lodos	20
4.3.2.1 Algunos componentes del compost.....	20
4.3.2.2 Factores que afectan al proceso del compostaje.....	21
4.3.3 Material de construcción a partir de biosólidos y vías forestales.....	23
4.4 Disposición final	24
4.4.1 Disposición de lodos en rellenos sanitarios.....	24
4.4.2 Disposición por incineración.....	25

5 Metodología	26
6 Resultados y discusión	28
7 Conclusiones	35
8 Recomendaciones.....	36
Anexo	41
Anexo 1. Trasplante de las plantas que crecieron	41

Lista de tablas

Tabla 1 Resultados de la caracterización física y química (Grupo de investigaciones ambientales, 2012).....	28
Tabla 2 Resultados de la caracterización de reactividad (Grupo de investigaciones ambientales, 2012).....	28
Tabla 3 Resultados de la prueba de Ecotoxicidad Daphnia (Grupo de investigaciones ambientales, 2012).....	29
Tabla 4 Resultados de la caracterización microbiológica (Grupo de investigaciones ambientales, 2012).....	29
Tabla 5 Análisis del blanco de campo (Grupo de investigaciones ambientales, 2012).	29
Tabla 6 Mediciones de la altura del tallo de las plantas de frijoles.....	31
Tabla 7 Humedades de los diferentes medios de crecimiento (Base seca) obtenidas en el horno.	32
Tabla 8 Humedades de los diferentes medios de crecimiento (Base seca) en el IMAL UM 2000.	32

Lista de ilustraciones

Ilustración 1 Plantación de las semillas de frijol.....	30
Ilustración 2 Germinación de las semillas de frijol.....	30
Ilustración 3 Crecimiento de la planta de frijol en abono.	31
Ilustración 4 Crecimiento de la planta de frijol en tierra negra.....	32
Ilustración 5 Trasplante del frijol en el compost al suelo	41
Ilustración 6 Trasplante del frijol en la tierra negra al suelo.....	41

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un enfoque integral y sostenible para abordar la gestión de lodos generados en la planta de aguas residuales de Dexco Zona Franca S.A.S dedicada a la producción de tableros MDF (Medium Density Fibreboard). En un medio donde la gestión de la sostenibilidad de los recursos y la disminución del impacto ambiental son cruciales, esta iniciativa se centra en la reducción, tratamiento y aprovechamiento eficiente de estos biosólidos.

Los propósitos principales, son mitigar el impacto ambiental y reducir los costos asociados a disposición de biosólidos derivados de la producción de tableros MDF (Medium Density Fibreboard). El proyecto aspira a contribuir al desarrollo de soluciones innovadoras aplicables en diversas industrias. La conexión entre la sostenibilidad, la eficiencia en el uso de recursos y la viabilidad económica empresarial es un pilar esencial de la propuesta; destacando la importancia de un enfoque en cuanto gestión ambiental y economía circular.

***Palabras clave* — Lodos, sostenibilidad, planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), gestión ambiental.**

Abstract

This project aims to develop a comprehensive and sustainable approach to address the management of sludge generated in the wastewater plant of Dexco Zona Franca S.A.S a company dedicated to the production of MDF (Medium Density Fibreboard). In an environment where resource sustainability management and environmental impact reduction are crucial, this initiative focuses on the reduction, treatment and efficient use of these biosolids.

The main purposes are to mitigate the environmental impact and reduce the costs associated with the disposal of biosolids derived from the production of MDF boards. The project aims to contribute to the development of innovative solutions applicable to various industries. The connection between sustainability, resource efficiency and business economic viability is an essential pillar of the proposal; highlighting the importance of a focus on environmental management and circular economy.

Keywords - Sludge, sustainability, wastewater treatment plant (WWTP), environmental management.

Introducción

En el contexto actual donde la gestión sostenible de los recursos y la minimización del impacto ambiental son imprescindibles, este proyecto se enfoca en el desarrollo de un enfoque integral y sostenible para la disminución, tratamiento y aprovechamiento eficiente de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de una empresa que produce tableros MDF (Medium Density Fireboard). El objetivo fundamental es mitigar tanto el impacto ambiental como los costos asociados a la gestión de los biosólidos que se derivan de este proceso industrial.

Este proyecto no solo tiene la finalidad de resolver este desafío específico de gestión de biosólidos, sino que busca contribuir en el desarrollo de soluciones innovadoras que se pueden aplicar en otras industrias, sino el enlace entre la sostenibilidad, la eficiencia en el uso de recursos y la utilidad económica para la empresa, es una base importante de esta propuesta, con la cual se busca adoptar prácticas empresariales más responsables y sostenibles en el tiempo, para esto es importante tener en consideración el cumplimiento normativo ambiental como la decreto 1287 de 2014, la cual regula el uso de los lodos residuales provenientes de una planta de tratamiento de aguas y tiene en cuenta la innovación tecnológica que haya actualmente para el tratamiento de lodos que contribuyan para desarrollos futuros de la industria.

Es necesario tener en cuenta que la soluciones que se encuentren en cuanto al tratamiento y disposición final de estos lodos residuales, deben estar enfocadas en que no solo se aborde el problema actual, sino que sean prácticas que perduren en el tiempo y evolucionen con los años gracias a avances tecnológicos y a las exigencias del mercado, debido a la investigación y evaluación continua de los tratamientos de lodos que estén más recientes para asegurar que las soluciones propuestas se mantengan actualizadas y que estas propuestas sean flexibles en el tiempo a actualizaciones, específicamente la de elaborar un fertilizante a base de estos lodos y cenizas que provienen del proceso de combustión de la caldera y es por esto que es importante establecer un sistema continuo de monitoreo, ya que de esta manera se puede evaluar el rendimiento de la solución implementada.

1 Planteamiento del problema

Es muy importante tener en cuenta que en la actualidad, la gestión sostenible de los recursos y la reducción del impacto ambiental es muy importante para Dexco como empresa, la cual ha asumido públicamente un compromiso con el cumplimiento legal y el desarrollo sustentable a partir de su Política Ambiental y sus prácticas de gestión (Dexco,2023); especialmente por desempeñarse en una industria como la producción de tableros MDF (Medium Density Fbreboard), ya que en este tipo de industrias se necesita hacer uso de recursos naturales como el agua o la madera en grandes cantidades. En este contexto, surge la necesidad de abordar de manera integral y sostenible la gestión y disposición de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, debido a que estos biosólidos representan un gran desafío desde una perspectiva tanto ambiental como económica, ya que la cantidad de lodos residuales que se generan es considerable.

El problema radica en que no se ha desarrollado aun un enfoque integral y sostenible para la gestión de estos lodos. Actualmente, la disposición de los biosólidos representa unos costos considerables y si no se manejan correctamente, podría tener un impacto ambiental negativo como el manejo de sus lixiviados en el relleno sanitario y su tratamiento (Noguera & Olivero, 2010).

La regulación ambiental, como el decreto 1287 del 10 de julio 2014, *por el cual se establecen criterio para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales* (Presidencia de la República de Colombia, 2014) como una base comparativa, pero por la cual no nos podemos regir porque este es para aguas en su mayoría domésticas, es por esto que hay una presión adicional sobre las empresas para que las soluciones que se encuentren sean viables y que además cumplan con normativas como la resolución No. 00150 del 21 de enero de 2003, *Por la cual se adopta el Reglamento Técnico de Fertilizantes y acondicionadores de Suelo para Colombia (ICA, 2003)*. Es importante mantener una investigación constante prácticas que se puedan aplicar para mejorar el compost. Por esto se requiere un sistema de monitoreo continuo, no solo de los factores que afectan día a día el compost como la temperatura, pH, humedad, aireación, entre otras cosas, sino también investigar y evaluar cada cuánto tiempo es necesario hacer estudios de la calidad del abono, ya que esto permite evaluar tanto el rendimiento como la eficacia de las soluciones implementadas a lo largo del tiempo.

En resumen, el principal problema radica en la ausencia de un enfoque integral y sostenible para abordar la gestión de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales de empresas dedicadas a la producción de tableros MDF (Medium Density Fibreboard). La necesidad

de encontrar soluciones innovadoras y sostenibles que cumplan con los requisitos normativos y que se adapten a los cambios en el mercado es fundamental para mitigar el impacto ambiental y reducir los costos asociados a la disposición de estos biosólidos.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Abono orgánico-Planta de agudos.

En la planta de Agudos de Dexco en Brasil por medio de la gestión de desarrollo forestal, se desarrolló un proyecto para hacer uso de los biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales para uso en fertilización forestal, este proyecto se usa como una estrategia de reducción de costos. La estructura y producción del proyecto, contempla 8 contenedores de compost y 2 pilas de almacenamiento y el material de almacenamiento son lodos y cenizas. El tiempo de fabricación de este compost es de 60 días y se produce una media de 1.200 toneladas/mes, lo que representa alrededor de 14.100 ton/año. Es importante garantizar parámetros como la humedad, cantidad de nitrógeno, la densidad, la relación C/N, entre otras cosas. El proceso del compostaje puede representar algunos riesgos como almacenamiento de lodos, ya que se puede presentar presencia de biomasa, también que haya irregularidades en la producción como paradas en la producción de abono orgánico para mantenimiento de los equipos o la oscilación de materias primas debido a las operaciones de la fábrica; que se incumpla con las garantías nutricionales con el nitrógeno y el potasio inferior al requerido, gracias al coste de adquisición del cloruro de potasio, la heterogeneidad del abono orgánico; que se incumpla con las garantías físicas como que haya presencia de partícula en el producto final, baja densidad y que la humedad sea demasiado elevada y la explotación forestal en la cual se puede presentar baja eficacia de funcionamiento, que no se cumpla con la dosificación recomendada, la manera en que se distribuya en el campo o que sea el suministro nutricional adecuado para el bosque. Se hacen unos controles y trazabilidad para cada una de las etapas, por ejemplo para la etapa del compostaje se realizará un informe diario de operación, se hará la producción del compost y un calendario de producción de este, donde se tengan los días, aciertos, incidencias y adición de compost, además del control de los parámetros semanales como humedad y temperatura; en la etapa del producto final se busca hacer muestreos, registro de existencia y el control de transporte, por último en la etapa de silvicultura se debe hacer un control de la dirección de los desplazamientos a las parcelas, aplicaciones de control (dosis, periodo, distribución) y parcelas de seguimiento de las zonas aplicadas.

En Dexco consideran que el abono orgánico producido por la fábrica de Agudos tiene potencial para sustituir al abono mineral que se utiliza actualmente como primer abonado en las zonas de plantación de la empresa (bosque). La planta de abonos se encarga de secar, homogenizar y compostar los lodos y cenizas generados en la PTAR y calderas, además de añadir el cloruro de potasio al proceso para cumplir con las garantías nutricionales exigidas, la estructura actual de la zona en la planta de Agudos que tiene la capacidad para 30 días de estabilización del material, 30 días de producción y que permite la producción media de aproximadamente 1.200 toneladas/mes de abono orgánico, lo que da una capacidad de producción anual de 14.400 toneladas. Se requieren controles operativos diarios para la supervisión del abono orgánico producido y utilizado en la empresa por el área de forestal; entre esos controles se incluye la producción de compost en la que se hace control de la materia prima (lodos, cenizas, KCl) que se utiliza para producir el abono, tener el registro de cada paso en el proceso de producción del compost como lo son las vueltas dadas, la adición de KCl, además de medir semanalmente parámetros como la humedad y temperatura (Dexco, 2021).

1.1.2 Uso de lodos residuales como fertilizante en eucalipto – diagnóstico de investigación

La disposición final de los lodos residuales puede resultar en un problema si es descartado de forma incorrecta, lo que genera graves problemas.

En Brasil hay diversos estudios con el uso del lodos realizados en las últimas tres décadas, los cuales evalúan la aplicación de estos en varios cultivos tanto para cultivos hortícolas como para cultivos forestales, generando ventajas como su reciclaje y la aplicación al suelo reincorporando los nutrientes que fueron extraídos por los diferentes cultivos, ya que el tratamiento y disposición de estos pueden alcanzar hasta el 50% de los costos operacionales de las estaciones de tratamiento, por lo cual se tienen varias alternativas para el reciclado de este residuo como la agricultura y la actividad forestal, ya que este residuo luego de ser tratado, puede ser utilizado como fertilizante orgánico en la recuperación de áreas degradadas y áreas de silvicultura.

Las especies como el eucalipto y el pino son las más plantadas en Brasil, siendo el eucalipto más relevante, ya que hay un aumento en las investigaciones y avances tecnológicos con respecto a él; este es una especie forestal poco exigente en términos nutricionales, debido a que se adapta bien a suelos ácidos y pobres en nutrientes, sin embargo es fundamental realizar la fertilización en la fase de plántula con la finalidad de que los árboles crezcan rápidamente en campo, aunque hay

un impedimento que es la variación del contenido de nutrientes en el lodo residual según el lugar donde fue generado, sin embargo este residuo suele ser pobre en potasio, ya que este nutriente es altamente soluble en agua y dependiendo del cultivo es necesario adicionar este nutriente en el caso de la fertilización, como es en el caso del eucalipto (Zabotto et al,2019).

2 Justificación

Es fundamental reconocer que para las empresas y personas en la actualidad es de vital importancia todo lo concerniente a la sostenibilidad de los recursos, pero en especial que sus prácticas cada vez tengan una contribución menor al impacto ambiental, en especial en industrias altamente demandantes de recursos naturales, como por ejemplo la industria papelera o maderera con la producción de tableros MDF (Medium density fibreboard) o de aglomerados como el MDP (Medium Density Particleboard). En este contexto surge la necesidad de abordar de una manera sostenible toda la gestión y disposición de los lodos generados en estas plantas de tratamiento de aguas residuales.

Los biosólidos que se obtienen en estas plantas, representan un desafío importante, no solo desde una perspectiva ambiental sino también desde una perspectiva económica, ya que la gestión de estos residuos representa una carga financiera considerable para estas empresas por un lado y por otro lado la disposición inadecuada puede causar efectos medioambientales adversos. Además, la economía circular, que promueve la reutilización y valorización de subproductos, añade presión adicional para encontrar soluciones eficientes y sostenibles a largo plazo.

Actualmente, existe una carencia notable en cuanto a enfoques sostenibles para la gestión de estos lodos, también la falta de innovación y lo escasas que son las soluciones eficaces, dificultan aún más la situación; otra cosa que dificulta un poco que haya más soluciones es que hay que tener en cuenta la regulación ambiental vigente, como el Decreto 1287 del 10 de julio de 2014 *por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales* (Presidencia de la República de Colombia, 2014), lo cual genera algo más que se debe cumplir y que dificulta un poco para las empresas el desarrollo de soluciones que no solo sean viables, sino también que cumplan con los requisitos normativos.

Por eso es muy importante abordar el problema de la gestión y disposición de los biosólidos de manera que sean adaptables y sostenibles en el tiempo y que estos se puedan utilizar y aprovechar teniendo en cuenta las constantes actualizaciones y mejoras en cuanto a la gestión de biosólidos, ya que la opción propuesta es la aprovecharlos como abonos, pero en un futuro podría implementarse también otra de las opciones, según sea conveniente.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Aprovechar los lodos residuales provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de Dexco Zona Franca S.A.S para usarlos como base para un abono y de esa manera el impacto ambiental y económico asociado a la gestión de biosólidos del proceso disminuya.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los lodos residuales, para el análisis exhaustivo de la composición fisicoquímica de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales, identificando sus componentes claves y su variabilidad.
- Evaluar el impacto ambiental teniendo en cuenta la disposición final de estos lodos de diversos modos, por ejemplo, en un relleno sanitario, por incineración o si se desecha en otro lugar.
- Identificar oportunidades comerciales para la valorización de los biosólidos, teniendo en cuenta la caracterización de los lodos, explorando cuáles son sus mercados potenciales; como fertilizantes, material para construcción o la producción de biogás.

4 Marco teórico

4.1 Técnicas de tratamiento y disposición de biosólidos, hacia la economía circular en el manejo de residuos industriales.

Los biosólidos obtenidos de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), se pueden disponer de distintas maneras y pueden tener diferentes aplicaciones, las cuales contribuyen a la economía circular, porque buscan aprovechar un “desecho” como materia prima.

Uno de los principales problemas en el tratamiento de aguas es todo lo que tiene que ver con el tratamiento y disposición de lodos, ya que el costo de su tratamiento puede representar hasta un 50% de valor total del tratamiento (Romero Rojas J.A, 2004).

Hay varios tipos de lodos que se producen en el tratamiento de aguas residuales como los lodos primarios provenientes de la sedimentación de aguas residuales, lodos secundarios que provienen del tratamiento biológico de las aguas residuales, y lodos que provienen del proceso de la coagulación y sedimentación de aguas residuales.

Un problema que representan los lodos en el momento del tratamiento es el bajo porcentaje en sólidos que suelen tener (Romero Rojas J.A, 2004), es decir su alta humedad, es por esto que para tratar el pequeño porcentaje en sólido se necesita una gran cantidad de lodo, por lo que el objetivo principal es concentrar los sólidos por medio de la remoción de agua y reducir su contenido orgánico, ya que estos están compuestos principalmente de la materia orgánica que contiene el agua residual de la cual fueron extraídos, por lo que eventualmente esto se descompone ocasionando problemas similares a los del agua residual cruda.

El lodo obtenido de una planta de aguas residuales varía mucho dependiendo de su origen o industria y agua residual del que sean obtenidos, lo que hace que varíe mucho de industria a industria sobre cómo estos se pueden disponer.

4.2 Método de tratamiento de lodos

Existen métodos de sedimentación que consiste en la separación suave del agua y sólidos mediante gravedad, flotación o centrifugación, el efecto que tiene en los lodos es que se concentra los sólidos mediante la remoción de agua (Amador-Díaz et al, 2015); la digestión con la cual se realiza la estabilización biológica a través de la conversión de materia orgánica en CO₂, agua y metano, lo cual reduce los patógenos y materia biodegradable (Amador-Díaz et al, 2015); por otra parte la estabilización alcalina es la que se da mediante la adición de materiales alcalinos (cal),

disminuye la actividad biológica; también está el acondicionamiento que es el proceso que causa la coagulación de los sólidos para favorecer la deshidratación, lo que facilita la aglomeración de los sólidos (Amador-Díaz et al, 2015).

Por otro lado están la deshidratación con la cual ocurre una separación fuerte del agua y los sólidos; lo cual facilita el manejo de los lodos (Amador-Díaz et al, 2015); también el compostaje con el que se busca la estabilización biológica aeróbica en un montículo a temperaturas por encima de los 45°C, lo cual contribuye a la disminución de la actividad biológica y el calentamiento, ya que el calor termina de eliminar los organismos patógenos y elimina la humedad residual, lo que desinfecta los lodos y destruye organismos patógenos (Amador-Díaz et al, 2015).

4.3 Aplicaciones de los lodos residuales

4.3.1 Producción de biogás

Por una parte es posible aprovechar los desechos de las plantas de tratamiento de aguas residuales para generar energía en forma de gas; esto se hace tratando el agua residual con un tratamiento anaerobio en lugar de aerobio, el cual genera como producto gas metano el cual puede ser utilizado in situ en la planta de tratamiento en procesos como calentar el digestor de lodos o para secar y reducir el volumen de lodos antes de su disposición final, sin embargo un gran reto que presenta la digestión anaerobia son los costos iniciales al llevar esto a escala masiva en comparación con los procedimientos aeróbicos utilizados actualmente, en especial si no se cuenta con una estructura previa o mínima desde el inicio (Saravia Matus et al,2022), el proceso de degradación anaerobia se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, en el que un gran número de microorganismos que trabajan en serie o en serie-paralelo, degradan la materia orgánica en sucesivas etapas.

En la práctica ingenieril se acostumbra a considerar tres etapas para residuos sólidos o lodos, que son la hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis, sin embargo, ahora hay un enfoque más novedoso que son cuatro etapas que considera la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y la metanogénesis (Acosta & Abreu, 2005). Por una parte, la hidrólisis es una etapa donde los procesos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular, por lo que se consideran exoenzimas; la hidrólisis es, por tanto, la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros (Acosta & Abreu, 2005).

La acidogénesis es una etapa donde los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico (Acosta & Abreu, 2005); a su vez la acetogénesis se le conoce también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono (Acosta & Abreu, 2005); en este momento de la etapa, la mayoría de las bacterias anaerobias han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, han de eliminar sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente (Morales, 2017) y la metanogénesis es una etapa metabólica de metano, el cual es producido a partir del ácido acético o de mezclas de hidrógeno y dióxido de carbono, el metano también puede formarse a partir de ácido fórmico y metanol, las bacterias metanogénicas se definen por el tipo de sustrato disponible (Acosta & Abreu, 2005); se debe destacar que en la reacción a diferencia de lo que ocurre con la degradación de los procesos de oxidación acetogénicos, energéticamente desfavorable, es probable que se produzcan en asociación con el proceso de reducción del bicarbonato al metano (Morales, 2017).

En esta época los biocombustibles tienen un papel fundamental en el desarrollo y búsqueda de sostenibilidad, en la actualidad se busca la sustitución de los hidrocarburos por fuentes alternativas sustentables de generación de energía, las cuales cobran cada vez más importancia, el biogás hace parte del grupo de combustibles de fuentes renovables, dado que puede producirse a partir de residuos, además busca disminuir el uso de combustibles fósiles, ya que tiene un gran potencial de producción y es necesario que se implementen investigaciones para lograr nuevas tecnologías para la obtención de este recurso.

Se pueden utilizar microorganismos para la purificación de este, para lograr remover sustancias consideradas como contaminantes, también puede ser una herramienta que un futuro supla el consumo de gas natural vehicular sin que se perjudique la potencia del vehículo y ser utilizados en sistemas de refrigeración industrial, equipos de tratamiento térmico, estufas y hornos industriales, equipos de calefacción, climatización, combustible agrícola, motores de combustión interna, turbinas, entre otras cosas (Souza & Schaefer, 2013).

4.3.2 Compostaje de lodos

El compostaje como método de descomposición biológica de los biorresiduos en presencia de oxígeno contribuye poderosamente al reciclaje y conservación de varios macro y micronutrientes de los lodos de depuradora en el suelo. Su alternativa, el vermicompostaje es una biotecnología moderna, barata y ecológica en la que las lombrices se utilizan como biorreactores naturales en el suelo. Como biorreactores naturales para descomponer la materia orgánica.

Aunque el compostaje puede considerarse altamente beneficioso y una estrategia de bajo coste de conversión de aguas residuales en materia que permite reciclar nutrientes orgánicos en el ecosistema, sigue causando algunos problemas importantes desde el punto de vista medioambiental. Debido a la rápida degradación de la materia orgánica nitrogenada materia orgánica nitrogenada, se observan importantes pérdidas de nitrógeno y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Rorat et al, 2019).

Existen diversas formas y materia prima para realizar el compostaje, por un lado, está el que utiliza cascara de frutas, el que utiliza poda u hojas secas como base, pero también está el que usa directamente los lodos y le añade los respectivos estabilizadores y nutrientes faltantes para que sea un compost que cumpla su objetivo. En el caso de las hojas secas y la poda, se necesitan cosas adicionales como la urea, melaza, agua y algo oscuro con que tapar esto; además de esto se le agregan los lodos y cenizas luego de que estos ya han reposado por un tiempo luego de haberlos obtenido.

4.3.2.1 Algunos componentes del compost

Urea es un compuesto químico que contiene nitrógeno y puede utilizarse como fuente de nitrógeno para el compostaje, ya que es una fuente esencial para la descomposición de la materia orgánica del compost, ya que con un mayor contenido de nitrógeno por lo general es más fácil de descomponer la materia orgánica con menor contenido de nitrógeno, ya que los microorganismos de descomposición necesitan nitrógeno para producir sus celular (biomasa) (Boyd, 2016), esta puede ser muy útil en el compostaje de materiales ricos en carbono, como hojas secas (Segovia, s.f.), ya que tienen a descomponerse más lentamente por su baja proporción de nitrógeno, es importante adicionarla con moderación para regular la relación carbono nitrógeno. Por otro lado está la melaza que sirve como alimento para los microorganismos que surgen en la fase descomposición, como bacterias y hongos que encuentran en esta fuente de energía suficiente, por

lo que contribuye a acelerar el proceso de descomposición; en esto el agua también juega un papel fundamental porque ayuda a mantener la humedad la cual también contribuye a la regulación de la temperatura, por otra parte facilita la difusión de nutrientes y a su absorción por parte de los microorganismos. Las hojas secas ayudan a darle estructura al compost, aportan carbono lo que es fundamental para mantener la relación de carbono y nitrógeno, aportan nutrientes y absorben humedad que ayuda a mantener las condiciones ideales para el compost.

Las cenizas de caldera mejoran significativamente la porosidad del suelo, la capacidad de retención del agua, el pH y los contenidos de fósforo, potasio, magnesio y calcio del suelo, además de que el uso de estos residuos industriales en la fertilización en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en suelo de baja fertilidad natural, permite aumentos expresivos de volumen maderable (Bellote et al, 1995).

4.3.2.2 Factores que afectan al proceso del compostaje

Factores como la temperatura afectan mucho el compostaje, ya que se ha comprobado que pequeños cambios en la temperatura afectan más a la actividad microbiana que la humedad o la relación C/N, siendo esta un parámetro que puede juzgar la eficiencia y estabilización a la que ha llegado el proceso; por otro lado está la humedad que es importante ya que el compostaje es un proceso biológico de descomposición de materia, donde la presencia de agua es imprescindible para las necesidades fisiológicas de los microorganismos, al ser el medio de transporte de las sustancias solubles que sirven de alimento a las células, sin embargo es importante que el agua no ocupe totalmente los poros de dicha masa, para que haya circulación de oxígeno como la de otros gases producidos en la reacción; otro factor fundamental que se debe tener en cuenta es el pH, ya que este tiene una relación directa en el compostaje debido a su acción sobre la dinámica de los procesos microbianos (Márquez et al, s.f.).

También es necesario tener en cuenta la aireación, debido a que es fundamental en el correcto desarrollo del compostaje es necesario asegurar la presencia de oxígeno, ya que los microorganismos que intervienen son aerobios y de tener una aireación insuficiente, empiezan a aparecer microorganismos anaerobios y empiezan a sustituir a los aerobios, por lo que se retrasaría la descomposición y aparecerían compuestos como el sulfuro de hidrógeno y la probable aparición de malos olores, sin embargo es de vital relevancia que durante la maduración del compost no haya un exceso de aireación, ya que puede contribuir a que se reduzca la humedad; además no solo lo

anteriormente mencionado tiene relevancia, sino que el tamaño de partícula es fundamental, debido que a mayor superficie expuesta al ataque microbiano por unidad de masa, más rápida y completa será la reacción, aunque que sea demasiado pequeño el tamaño de partícula puede provocar la reducción del espacio entre partículas y aumentar las fuerzas de fricción , lo cual limita la difusión de oxígeno hacia el interior y de dióxido de carbono hacia el exterior, lo que restringe la proliferación microbiana al ser imposible la aireación por convección, además de que si es muy pequeño el tamaño de partícula, existe el riesgo de compactación del compost (Márquez et al, s.f.).

El rango ideal de la aireación durante el compostaje es de entre el 5% y el 15%, ya que una más baja del 5% lleva insuficiencia en la evaporación del agua, generando exceso de humedad y un ambiente anaerobio, lo que se puede solucionar con el volteo de la muerta y/o la adición de material estructurante que permita la aireación, sin embargo si este porcentaje es mayor al 15% hay un exceso de aireación por ende un deceso de temperatura y gran evaporación del agua, haciendo que el proceso se detenga por falta de agua, esto se puede superar añadiendo más material picado y que de esa manera se reduzca el tamaño de poro y así reducir la aireación, también añadir material fresco con mayor contenido de agua (restos de fruta y verduras, césped, purines u otros) (Román et al, 2013).

El rango ideal durante el compostaje para la humedad es de entre 45% -60%, debajo de este rango hay humedad insuficiente y puede detener el proceso por falta de agua para los microorganismos, estos se soluciona ya sea añadiendo agua o material fresco con mayor contenido de agua, sin embargo si es mayor al 60% hay insuficiencia de oxígeno, ya que este parámetro es uno que está estrechamente vinculado a los microorganismos, porque estos usan el agua como medio de transporte para los nutrientes (Román et al, 2013).

Los nutrientes se dividen en micro y macronutrientes, esto en función de lo que la planta necesite, por ejemplo el nitrógeno es un nutriente muy importante, porque este actúa como el motor de crecimiento de planta, ya que está involucrado en los principales procesos de desarrollo de las plantas, además de ser importante para la absorción de otros nutrientes; el fósforo es importante en la transferencia de energía, por lo que es esencial en la eficiencia de la fotosíntesis, este suele estar ausente en la mayoría de suelos naturales y agrícolas o dónde el pH puede limitar su disponibilidad y por último tenemos al potasio el cuál juega un papel vital en la síntesis de carbohidratos y proteínas, y por ende en la estructura de la planta y aumenta su tolerancia a la sequía, heladas y

salinidad, además de que las plantas con un buen suministro de potasio sufren menos enfermedades (Román et al).

4.3.2.3 Nutrientes necesarios para plantaciones forestales para pino y eucalipto.

El pino caribeño (*Pinus caribae*) es un árbol alto que crece rápidamente y produce madera de diversos usos incluyendo productos de papel. Se cultiva extensamente en los trópicos húmedos. Se emplea también en planes de reforestación debido a la plasticidad ecológica, adaptabilidad a condiciones adversas, fácil manejo y crecimiento rápido. Como conífera, habita en suelos poco fértiles, aunque las plantaciones establecidas en sitios muy degradados y marginales no producen los rendimientos que corresponden al potencial de la especie. Algunas propiedades físicas del suelo adversas como mal drenaje, densidad aparente alta o poca profundidad defectiva pueden limitar el crecimiento de estas especies. En cuanto a requerimiento de nutrientes para las plantaciones de *P. caribaea* en Brasil y Nigeria, requerimientos como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio

La fertilización en etapa de crecimiento rápido en suelos ácidos para aportar nitrógeno, fosforo y potasio, además de hacer una aplicación de mantenimiento que mantenga estos componentes (Alvarado et al, 2006).

En cuanto al eucalipto, sus necesidades nutricionales el potasio es fundamental, ya que forma parte de ningún compuesto orgánico, no toma parte en ninguna función estructural en la planta, ya que este nutriente actúa en la activación de muchas enzimas, este compuesto está involucrado en la síntesis de proteínas y por esta razón, es por esto que las plantas que presentan bajo contenido en potasio tienen bajo contenido proteico, otro efecto atribuido al potasio es que las plantas bien nutridas son más resistentes a la sequía y a las heladas, función asociada a la retención de agua, también está asociado a los mecanismos de defensa de la planta a las plagas y enfermedades (Arruda & Malavolta, 2001).

4.3.3 Material de construcción a partir de biosólidos y vías forestales

Tras la incineración, los lodos de depuradora siguen siendo ricos en sílice, alúmina óxido de calcio y óxido de hierro, por lo que pueden utilizarse en la producción de materiales de construcción (Rorat et al, 2019).

4.4 Disposición final

4.4.1 Disposición de lodos en rellenos sanitarios

La eliminación indiscriminada de las aguas residuales industriales y los vertederos de lodos se considera una práctica peligrosa en la gestión integrada de residuos a nivel mundial. Algunos países han prohibido esta práctica aplicando una normativa estricta (Al Yaqout, 2003)

La transferencia de los componentes de los residuos al lixiviado no es lineal porque las condiciones del cuerpo del vertedero determinan el comportamiento de descontaminación de los sólidos. Dado que los procesos de lixiviación y microbianos dependen del agua, los lodos de depuradora secos y granulados pueden retrasar ahora la fase de acidificación en el cuerpo del vertedero (Van Berg, 1993).

Los residuos una vez recolectados pueden ser asignados a diversos procesos de transformación; incluyendo el reciclaje, el aprovechamiento energético, la elaboración de compost, la producción de biogás y la formulación de combustible alternos, entre otros. Estos procesos deben estar enmarcados dentro de una Gestión Integral de Residuos Sólidos, de tal forma que representen beneficios sanitarios, ambientales, sociales, económicos e inclusive culturales. Cuando el aprovechamiento de la basura no es posible, el relleno sanitario y en algunos casos la incineración, aparecen como opciones para la disposición final de las mismas. Sin embargo, cada día se insiste con mayor frecuencia en el aprovechamiento de residuos, y la tendencia actual es la disminución de la fracción de aquellos destinados en rellenos sanitarios, aumentando el incremento en las cifras correspondientes al reciclaje y el compost. Hay algunos problemas ligados a la disposición en rellenos sanitarios como los líquidos percolados que son más conocidos comúnmente como lixiviados, los cuales suelen ser recolectados en el fondo de una celda y enviados a lagunas donde son tratados o recirculados al interior del relleno (Noguera & Olivero, 2010).

La problemática ambiental de los residuos sólidos del caso colombiano se ha reglamentado a través del tiempo su recolección, transporte, tratamiento y disposición final; la política de los residuos ha servido para establecer el marco normativo correspondiente a la estructuración de una metodología, con la cual se diseñan planes para el manejo de residuos sólidos (PGIRS) generados en el país. Los PGIRS son un conjunto de operaciones y disposiciones encaminadas a dar los residuos sólidos producidos, el destino más adecuado de acuerdo con sus características, sin embargo, en el caso de Medellín y otros 22 municipios con el parque ambiental La Pradera, el cual presenta múltiples problemas de impacto ambiental, entre ellos la no existencia de un sistema de

tratamiento para los lixiviados. En la actualidad cuenta con una laguna de estabilización como sistema de pre-tratamiento, el cual viene funcionando desde el año 2003. Los vertimientos tienen caudales muy grandes, causando constante contaminación de recursos hídricos cercanos (Noguera & Olivero, 2010).

4.4.2 Disposición por incineración

Este es considerado uno de los métodos más atractivos para la disposición de lodos en Europa, gracias a que sustituyen los vertederos o rellenos sanitarios y a la dificultad que en ocasiones generan las estrategias agrícolas. Todos los procesos térmicos se consideran sistemas de conversión de lodos en energía que conducen a la oxidación completa de la materia volátil con producción de un residuo (cenizas). La combustión y/o la incineración se consideran los métodos de eliminación más atractivos para los lodos de depuradora.

Se utilizan tres variantes principales de este proceso se utilizan la incineración en plantas específicas, co-incineración con residuos sólidos urbanos e incineración en hornos de cemento. El coste medioambiental de estos sistemas es el elevado consumo de energía y la producción de gases nocivos (Rorat et al, 2019).

La integración de principios de desarrollo sostenible y economía circular es esencial para el éxito y la relevancia de nuestro proyecto. Al adoptar enfoques sostenibles, no solo cumplimos con nuestra responsabilidad ambiental, sino que también contribuimos a la viabilidad a largo plazo y la fortaleza económica, ya que el desarrollo sostenible implica la manera en que debemos llevar a cabo nuestra vida en la actualidad para asegurar un futuro mejor, el cual se centra en abordar las necesidades actuales sin poner en riesgo las oportunidades de las generaciones venideras para satisfacer las suyas propias. La supervivencia de nuestras sociedades y del medio ambiente compartido depende de la construcción de un mundo más sostenible (Naciones unidas, 2023).

La economía circular, al minimizar los residuos y fomentar la reutilización de recursos, no solo beneficia al medio ambiente, sino que también puede generar eficiencias operativas y abrir nuevas oportunidades de negocio. Estas prácticas no solo son un imperativo ético, sino que también fortalecen nuestra posición como agentes de cambio positivo en nuestra comunidad y sector. En resumen, incorporar estos principios no solo es lo correcto, sino que también es estratégicamente beneficioso para la sostenibilidad y el éxito a largo plazo de nuestro proyecto.

5 Metodología

Lo que se busca con el proyecto es tener datos preliminares para investigaciones futuras siguiendo detalladamente la Resolución No. 00150 *Por el cual se adopta el Reglamento Técnico de Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos para Colombia* (ICA, 2003) , esto se hace por medio del seguimiento de algunos factores importantes los cuales se pueden expresar de forma cuantitativa como por ejemplo con la humedad de los diferentes medios en los que se plantaron los frijoles y también del crecimiento del tallo de cada una de estas plantas.

Para la realización de los diferentes análisis del CRETIB como los resultados de la caracterización fisicoquímica la cual sigue los lineamientos del Decreto 4717 de 2005 *por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos generados en el marco de la gestión integral* (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo, 2005), para la caracterización de reactividad se sigue la Regulación CFR EPA 40, parte-261 *para la identificación y listado de residuos peligrosos* (EPA, 2016), para la prueba de Ecotoxicidad Daphnia se siguen dos normativas como la Regulación EPA SW-846 Capítulo 7 *que trata sobre las definiciones introductorias y reglamentarias relativas a las características de los residuos peligrosos* (EPA, n.d.) y la Resolución 062 de 2007 por la cual se adoptan protocolos de muestreo y análisis de laboratorio para la caracterización fisicoquímica de los residuos peligrosos en el país (IDEAM, 2007) y para la caracterización microbiológica se sigue la Regulación EPA 40, Parte 503 (Para biosólido clase B) *para la utilización o eliminación de lodos residuales* (EPA, n.d.).

El proceso de producción de compost contó con diferentes etapas y materiales clave. En primer lugar, se recolectaron hojas secas y/o material de poda, que se acumularon en el sitio designado. Se estima una cantidad aproximada de 38 kilogramos, para esta cantidad se le agrega aproximadamente cinco kilogramos de urea que tiene una alta fuente de nitrógeno el cuál ayuda a favorecer el proceso de descomposición (Segovia, s.f.).

Una parte que es esencial en el proceso implica la preparación de una mezcla por cuatro kilogramos de melaza diluida en 16 litros de agua. Este líquido se añadió al montón de materiales cada dos semanas durante tres ocasiones, utilizando una concentración reducida de un kilogramo de melaza en cuatro litros de agua en cada aplicación. Para favorecer el proceso de descomposición, se cubrió la pila de materiales con plástico negro en una zona sombreada. A lo largo del proceso, se aseguró la humedad adecuada mediante la adición periódica de agua, excepto

en las semanas en que se aplica la solución de melaza. Esta humedad es crucial para el éxito del proceso.

Tras seis semanas de descomposición, se permitió que el compost reposara durante una semana con el fin de que se enfríe y se estabilizara. Durante este tiempo, se liberan gases que elevan la temperatura y es necesario esperar para asegurar que el abono sea seguro para su uso.

Finalmente, se añaden aproximadamente 20 kilogramos los lodos residuales y de las cenizas provenientes del proceso de combustión de la caldera al compost obtenido, esta mezcla se revolvió muy bien y se tapó por una semana para que el compost quede listo para usarse. El añadir estos lodos enriquece el abono con nutrientes esenciales para su función como un acondicionador de suelos de calidad.

Por otra parte, como estudio preliminar se plantaron seis semillas de frijol, dos en solo lodos y ceniza, otro en el abono y otro en tierra sin adiciones, esto con la finalidad de observar dos cosas, si algo crecía en el abono y si en comparación con los otros medios había algún cambio positivo por encima de los demás.

6 Resultados y discusión

A continuación, de la Tabla 1 a la Tabla 5 se presenta información suficiente para saber que estos lodos no son peligrosos, en estas pruebas se corrobora la caracterización física y química, la caracterización de reactividad, los análisis del blanco en el campo y la prueba de ecotoxicidad para los cuales dan resultados negativos y fuera del rango.

Tabla 1 Resultados de la caracterización física y química (Grupo de investigaciones ambientales, 2012).

Características	Decreto 4741/05 y Regulación CFR EPA 40, Parte-261	Lodos PTAR
Corrosividad	pH ≤ 2.0 ó pH ≥ 12,5	Negativa

Tabla 2 Resultados de la caracterización de reactividad (Grupo de investigaciones ambientales, 2012).

Característica	Decreto 4741/05 y Regulación CFR EPA 40, Parte-261 y Regulación EPA SW-846 Cap 7	Lodos PTAR
Reactividad	Ver Nota 2	Negativa
Cianuro reactivo	250 mg CN-/Kg (b.s)	12.19 ± 1.94

Nota 2: De acuerdo con la EPA, una concentración mayor a 250 mgCN/Kg (b.s.) de cianuro reactivo en un residuo, les confiere a estas características de reactividad.

Tabla 3 Resultados de la prueba de Ecotoxicidad Daphnia (Grupo de investigaciones ambientales, 2012).

Ensayo de Toxicidad aguda con Daphnia Magna	Resolución 062 de 2007 IDEAM	Lodos PTAR
Porcentaje de inmovilización para 100% WAF	Si el porcentaje de inmovilización es mayor o igual al 50%, el residuo es clasificado como ECOTOXICO	5% ± 3.53

Tabla 4 Resultados de la caracterización microbiológica (Grupo de investigaciones ambientales, 2012).

Características	Regulación EPA 40, Parte 503 (Para biosólido clase B)	Lodos PTAR
Recuento de coliformes totales	2x10 ⁶ UFC/g	280000
Huevos de Helminto	15Hm viable/g	Ausente

Tabla 5 Análisis del blanco de campo (Grupo de investigaciones ambientales, 2012).

Parámetro	Unidades	Blanco Lodo PTAR
pH-Lixiviado	pH ≤ 2.0 ó pH ≥ 12,5	Negativa

Del 100% de las muestras plantadas, solo el 50% logró germinar, sin embargo, únicamente solo alrededor del 34% creció. Esta situación puede atribuirse por un lado al origen de las semillas, ya que, al provenir de una bolsa de frijol comercial, no se tiene certeza del porcentaje de viabilidad y salud de sus semillas.

Ilustración 1 Plantación de las semillas de frijol



*Las dos primeras de izquierda a derecha son la de lodos + cenizas, los dos siguientes son los del compost y las dos de más a la derecha son de tierra negra.

Ilustración 2 Germinación de las semillas de frijol.



*Las dos primeras de izquierda a derecha son la de lodos + cenizas, los dos siguientes son los del compost y las dos de más a la derecha son de tierra negra.

Tabla 6 Mediciones de la altura del tallo de las plantas de frijoles

Altura del tallo (centímetros)			
Fecha	Compost	Tierra negra	Lodos + cenizas
01-03-2024	1.5	1.0	0
04-03-2024	8.0	3.5	0
05-03-2024	10.0	5.0	0
06-03-2024	13.0	8.0	0
07-03-2024	16.0	11.0	0
08-03-2024	18.0	13.0	0
11-03-2024	22.0	15.0	0
15-03-2024	23.0	16.0	0
18-03-2024	24.0	18.0	0
19-03-2024	25.0	19.0	0
20-03-2024	26.0	21.0	0
21-03-2024	27.0	23.0	0
22-03-2024	28.0	24.0	0

* No se miden los tallos a diario, porque no se tiene acceso diario a las plantas de frijoles.

Ilustración 3 Crecimiento de la planta de frijol en abono.



Ilustración 4 Crecimiento de la planta de frijol en tierra negra.



Analizando detalladamente la Tabla 6, se nota un crecimiento ligeramente más rápido en las plantas tratadas con el abono derivado de los biosólidos, donde la planta que tenía abono le llevaba más ventaja a la otra en el crecimiento inicial, aunque con el tiempo se va estabilizando el avance de las dos; aunque es importante considerar esta como una investigación preliminar que dé paso a una más minuciosa y detallada, que brinde unos resultados más contundentes.

Tabla 7 Humedades de los diferentes medios de crecimiento (Base seca) obtenidas en el horno.

Porcentaje de Humedad		
Lodos + cenizas	Compost	Tierra negra
125.4778	53.7650	35.7212
125.7702	50.9695	39.6063

Tabla 8 Humedades de los diferentes medios de crecimiento (Base seca) en el IMAL UM 2000.

Porcentaje de Humedad		
Lodos + cenizas	Compost	Tierra negra
109.92	56.48	36.85
124.42	52.32	38.21

La humedad es un factor importante en cuanto a lo que se refiere a la germinación, ya que un exceso de agua también puede llegar a ser desfavorable al dificultar la llegada de oxígeno al

embrión. Por ello algunas especies impiden la germinación en presencia de un exceso de agua, generando una capa que dificulta la entrada de suficiente oxígeno como para que se inicie la germinación (García & Villamil, 1998), esta puede ser una de las razones por la cual ninguna de las semillas creció en el medio de lodos + cenizas.

Es fundamental tener en cuenta que existen diversas razones por las cuales las semillas pueden no crecer o no alcanzar su pleno desarrollo, incluso cuando se proporciona un entorno adecuado. En muchas ocasiones, las semillas tras su maduración y dispersión no son capaces de germinar, bien puede ser porque son durmientes o porque las condiciones ambientales no le son favorables. En esta situación las semillas empiezan a deteriorarse lo que se manifiesta por la progresiva pérdida de su capacidad de germinar (viabilidad) y de dar lugar a plántulas sanas y vigorosas. El tiempo que tardan las semillas en perder su viabilidad (longevidad) es variable según las especies y dependiente de factores tanto externos (temperatura ambiental), como interno (contenido en humedad, genotipo, etc) a las propias semillas (García & Villamil, 2001).

Las observaciones realizadas en esta investigación preliminar sugieren que los lodos podrían ser una opción viable para su utilización como compost o abono, ya que al menos una de las plantas creció en ese medio; también teniendo en cuenta los antecedentes *Abono orgánico-Planta agudos (Dexco, 2021)* y *Usos de lodos residuales como fertilizante en eucalipto-diagnóstico de investigación (Zabotto et al, 2019)* con las cuales se confirma que se pueden reutilizar este tipo de residuos convirtiéndolos en algo más, siendo parte así de la economía circular.

Se tiene el potencial de generar ahorros económicos significativos y una disminución favorable del impacto ambiental en los vertederos, ya que la cantidad de lodos y cenizas que se disponen al año y el costo por su transporte y disposición es bastante significativo. Esta práctica se alinea estrechamente con los principios de sostenibilidad al convertir un subproducto en un recurso valioso, promoviendo así la economía circular, además es fundamental considerar los beneficios ambientales de esta práctica, como la disminución de la contaminación del suelo y el agua, en espec.

En resumen, la utilización de los biosólidos para la producción de abono ofrece una serie de beneficios económicos, ambiental y agrícolas. Si bien es necesario llevar a cabo más investigaciones para validar en su totalidad estos hallazgos, los resultados preliminares indican un potencial prometedor para esta práctica en el contexto de la empresa. Además, la implementación

exitosa de este enfoque podría servir como un ejemplo inspirador para otras empresas del sector, incentivándolas a adoptar prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Al mismo tiempo, es importante destacar la importancia de un enfoque integral que considere tanto los aspectos técnicos y económicos como los sociales y ambientales para garantizar el éxito a largo plazo de esta iniciativa.

Se optó por realizar un estudio preliminar de lodos y las cenizas del proceso de combustión de la caldera con el propósito de utilizarlos en el compostaje, motivado por dos consideraciones fundamentales. En primer lugar, se tomó en cuenta la disponibilidad de recursos, ya que, para llevar a cabo la digestión anaerobia con el fin de producir biogás, así como para la fabricación de materiales de construcción a partir de los biosólidos, se requerirían herramientas adicionales para realizar al menos un análisis preliminar. En segundo lugar, se valoró la especificidad del producto, dado que su destino primordial es proporcionar nutrientes a las plantaciones de pino y eucalipto de la empresa, lo que confiere un enfoque más definido y concreto al proyecto.

7 Conclusiones

- Se puede establecer la viabilidad preliminar del uso de los biosólidos para la elaboración del abono, teniendo en cuenta los antecedentes de esta investigación, además de tener en cuenta los resultados del CRETIB con el cual se confirma que los lodos no son tóxicos, por ende, se pueden usar.
- La utilización de biosólidos para la producción de compost no solo tiene el potencial de generar ahorros económicos significativos al reducir los costos asociados con la disposición de residuos y la compra de fertilizantes comerciales, sino que también puede contribuir a la reducción de residuos en los vertederos y promover la economía circular.
- Teniendo en cuenta la problemática actual con los rellenos sanitarios, sus lixiviados y su vida útil; el hecho de no tener que disponer de estos residuos que anteriormente se trataban como un desecho no solo reduce el impacto ambiental sino también el económico.
- La oportunidad de valorización y contribución a la economía circular de este residuo está en la elaboración de abono, uso para la elaboración de biogás o el uso en construcción como en el caso de las vías forestales y que es más factible usar para abono en el contexto de la empresa.
- La implementación exitosa de esta práctica en Dexco podría servir como un ejemplo para otras empresas del sector, fomentando la adopción de prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Esto podría tener un impacto positivo en la industria en su conjunto y contribuir al logro de objetivos más amplios de sostenibilidad.

8 Recomendaciones

Para maximizar la utilidad del compost o abono en la utilización de biosólidos, es crucial implementar estrategias que aceleren el proceso de descomposición. Se recomienda introducir organismos como lombrices (Rorat et al,2019), que pueden agilizar significativamente la descomposición de los materiales orgánicos. Además, es aconsejable iniciar el proceso de compostaje con anticipación, permitiendo la descomposición previa de los materiales base, como hojas secas o poda, según el componente seleccionado para la elaboración del abono. Es importante mantener el compost húmedo, pero sin saturarlo, ya que la humedad mayor del 60%, lo cual puede inhibir la descomposición y generar malos olores.

Mantener una proporción adecuada de materiales ricos en carbono y nitrógeno es crucial para el éxito del compostaje. Esto implica un equilibrio entre hojas secas césped cortado (aporte de carbono) (Segovia, s.f.) y la cantidad de urea adicionada (aporte de nitrógeno) aireación adecuada del abono es esencial para evitar la compactación y fomentar la actividad microbiana aeróbica (Boyd, 2016), que se puede lograr volteando regularmente el compost o utilizando un sistema que permita una buena circulación de aire (Román et al, 2013).

Referencias

Arruda, S. R., & Malavolta, E. (2001). Nutrición y Fertilización Potásica en Eucalipto. (en línea). *Informacoes Agronómicas*. 91. 1-10.

Acosta, Y. L., & Abreu, M. C. O. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 35-48.

Al Yaqout, A. F. (2003). Assessment and analysis of industrial liquid waste and sludge disposal at unlined landfill sites in arid climate. *Waste management*, 23(9), 817-824.

Alvarado, A., Raigosa, J., & Oviedo, J. (2006). Nutricion y fertilizacion del pino caribeño (*Pinus caribaea*). *Informaciones Agronómicas*, 62, 8-12.

Amador-Díaz, A., Veliz-Lorenzo, E., & Bataller-Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 46, 1-10.

Arruda, S. R., & Malavolta, E. (2001). Nutrición y Fertilización Potásica en Eucalipto.(en línea). *Informacoes Agronómicas*. 91. 1-10.

Bellote, A. F., Ferreira, C. A., Da Silva, H. D., & Andrade, G. D. C. (1995). Efecto de la aplicación de ceniza de caldera y residuo de celulosa en el suelo y en el crecimiento de *Eucalyptus grandis*. *Bosque*, 16(1), 95-100.

Boyd, C. (2016). Descomposición y acumulación de materia orgánica en estanques. Extraído de <https://www.globalseafood.org/advocate/descomposicion-y-acumulacion-de-materia-organica-en-estanques/>

Dexco. (2021). Abono orgánico-Planta de agudos: Uso en fertilización forestal. Gestión de desarrollo forestal.

Dexco. (2021). Control de calidad y producción de abono orgánico-Unidad de agudos.

Dexco. (2023). Gestión ambiental - Dexco. <https://www.dex.co/es/esg/gestion-ambiental/>

Environmental Protection Agency from United States (n.d.). Chapter Seven of the Sw-846 - Compendium: Introductory and Regulatory Definitions Pertaining to Hazardous Waste Characteristics. Taken from <https://www.epa.gov/hw-sw846/chapter-seven-sw-846-compendium-introductory-and-regulatory-definitions-pertaining>

Environmental Protection Agency (EPA) from United States. (n.d.) Code Federal Regulations Title 40 Part 503- Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludg. Taken from <https://www.epa.gov/biosolids/biosolids-laws-and-regulations>.

García, F. P., & Villamil, J. M. P. (1998). *Germinación de semillas*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, secretaria general de Estructuras.

García, F. P., & Villamil, J. M. P. (2001). *Viabilidad, vigor, longevidad y conservación de semillas*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, secretaria general de Estructuras.

Grupo de investigaciones ambientales, UPB. (2012). Informe de resultados GIA3I-067-12

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (enero 21, 2003). Resolución No.00150. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico de Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos para Colombia. Extraído de <https://www.ica.gov.co/areas/agricola/servicios/fertilizantes-y-bio-insumos-agricolas/resolucion-150-de-2003-1-1.aspx>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (marzo 30, 2007). Resolución 62 de 2007. Por la cual se adoptan los protocolos de muestreo y análisis de laboratorio para la caracterización fisicoquímica de los residuos o desechos peligrosos en el país. Extraído de https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_ideam_0062_2007.htm

Márquez, P. B., Blanco, M. J. D., & Capitán, F. C. Capítulo 4. Factores que afectan al proceso de Compostaje. *Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva*.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (diciembre 30, 2005). Decreto 4741 de 2005. Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos generados en el marco de la gestión integral. Extraído de <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/4741%20-%202005.pdf>

Morales, J. A. R. (2017). Obtención de biogás a partir de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante la digestión anaerobia mesofílica.

National Archives. (July 1, 2016). Code Federal Regulations Title 40 Part 261-Identification and listing of hazardous waste. Taken from <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-I/part-261>

Noguera, K. M., & Olivero, J. T. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano.

Presidencia de la República de Colombia. (Julio 10, 2014). Decreto 1287 de 2014. Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Extraído de <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1259502>

Román, P., Martínez, M. P., & Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina.

Rorat, A., Courtois, P., Vandenbulcke, F., & Lemiere, S. (2019). Sanitary and environmental aspects of sewage sludge management. In *Industrial and Municipal Sludge* (pp. 155-180). Butterworth-Heinemann.

Saravia Matus, S., Gil Sevilla, M., Fernández, D., Montañez, A., Blanco, E., Naranjo, L., Llavona, A. & Sarmanto, N. (2022). Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe.

Segovia, G. (s.f.). Verde es vida. La utilidad de las hojas secas. Extraído de https://www.verdeesvida.es/tecnicas-y-cuidados_4/la-utilidad-de-las-hojas-secas_570

Souza, J., & Schaeffer, L. (2013). Sistema de compresión de biogás y biometano. *Información tecnológica*, 24(6), 03-08.

Van Berg, J. D. (1993). Effects of sewage sludge disposal. *Land Degradation & Development*, 4(4), 407-413.

Zabotto, A. R., Zuñiga, E. A., Ruiz Machuca, L. M., Broetto, F., Reis Tavares, A., & Kanashiro, S. (2019). Uso de lodos residuales como fertilizante en eucalipto-diagnóstico de investigación. *Idesia (Arica)*, 37(2), 103-108.

Anexo

Anexo 1. Trasplante de las plantas que crecieron

Ilustración 5 Trasplante del frijol en el compost al suelo



Ilustración 6 Trasplante del frijol en la tierra negra al suelo



Aprovechamiento de lodos provenientes de la planta de tratamiento de agua residuales de una industria maderera, para usarlos como base para un abono.



PRACTICANTE: Juliana Rodríguez Saldarriaga

ASESORES: Edwin Alarcón y Steven Reyes

PROGRAMA: Ingeniería química

Semestre de la práctica: 2023-2

Descripción del proyecto

La gestión sostenible de recursos y la reducción del impacto ambiental son prioritarias para Dexco como empresa, especialmente en esta industria que requiere grandes cantidades de agua y madera. La empresa ha asumido un compromiso público con la sostenibilidad a través de su política ambiental, sin embargo, se enfrenta al desafío de manejar los lodos residuales de sus plantas de tratamiento de aguas de manera integral y sostenible debido a su considerable cantidad y su impacto ambiental y económico.

Metodología

Se recolectaron hojas secas, a las cuales se les añadió urea para favorecer la descomposición. Se preparó una mezcla de melaza diluida en agua que se aplicó al montón de materiales cada dos semanas.

Para favorecer el proceso de descomposición, se cubrió con plástico negro en una zona con sombra. Después de seis semanas de descomposición, se permitió que el compost reposará durante una semana. Se agregaron lodos residuales y cenizas a la mezcla, que luego se dejó reposar por otra semana. Esto enriqueció el compost con nutrientes.

Se realizó un estudio preliminar plantando semillas de frijol en diferentes medios como solo lodos y ceniza, tierra sin adiciones y el abono, esto con el objetivo de observar el crecimiento.



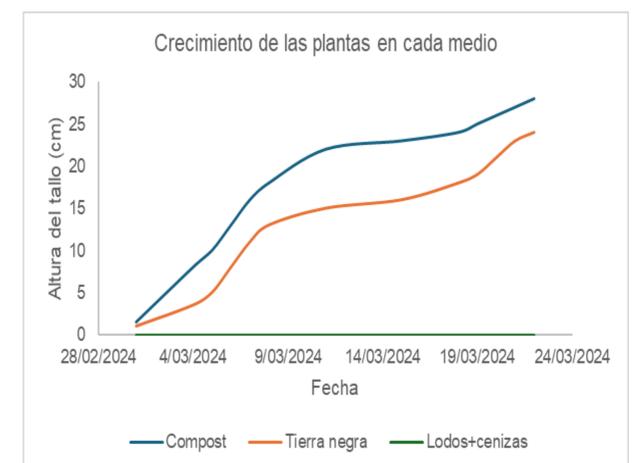
Resultados

Humedades de los diferentes medios de crecimiento (Base seca) obtenidas en el horno.

Porcentaje de Humedad		
Lodos + cenizas	Compost	Tierra negra
125.4778	53.7650	35.7212
125.7702	50.9695	39.6063

Humedades de los diferentes medios de crecimiento (Base seca) en el IMAL UM 2000.

Porcentaje de Humedad		
Lodos + cenizas	Compost	Tierra negra
109.92	56.48	36.85
124.42	52.32	38.21



Objetivos

- ✓ **Aprovechar los lodos residuales provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de Dexco Zona Franca S.A.S para usarlos como base para un abono y de esa manera el impacto ambiental y económico asociado a los biosólidos del proceso disminuya.**
- ✓ **Caracterizar los lodos residuales, para el análisis exhaustivo de la composición fisicoquímica de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales, identificando sus componentes claves y su variabilidad.**
- ✓ **Evaluar el impacto ambiental teniendo en cuenta la disposición final de estos lodos de diversos modos, por ejemplo, en un relleno sanitario, por incineración o si se desecha en otro lugar.**
- ✓ **Identificar oportunidades comerciales para la valorización de los biosólidos, teniendo en cuenta la caracterización de los lodos, explorando cuáles son sus mercados potenciales; como fertilizantes, material para construcción o la producción de biogás.**

Conclusiones

- ✓ **El uso de biosólidos en la producción de compost no solo puede generar ahorros económicos al reducir los costos de disposición de residuos y la compra de fertilizantes comerciales, sino que también ayuda a reducir la cantidad de residuos en vertederos lo que promueve la economía circular.**
- ✓ **Considerando los desafíos actuales con los rellenos sanitarios, sus lixiviados y su vida útil, el no tener que disponer de estos residuos como desechos no solo reduce el impacto ambiental, sino también el económico.**
- ✓ **La valorización de este residuo puede contribuir a la economía circular mediante su uso para abono, biogás o en construcción, como en el caso de las vías forestales, sin embargo, en este contexto empresarial, su uso principal sería para la elaboración de abono.**