

FACULTAD DE INGENIERÍA

SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

INFORME TÉCNICO RESULTADO DE INVESTIGACIÓN

APLICACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR, EN EL APROVECHAMIENTO DE
LOS LODOS RESIDUALES GENERADOS EN GELCO MANIZALES.

AUTORES

DANIELA CORTÉS CIFUENTES
GERENCIA DE PROCESOS DE CALIDAD E INNOVACIÓN

VALENTINA FRANCO VÁSQUEZ
GERENCIA DE PROCESOS DE CALIDAD E INNOVACIÓN

NICOLAS GABALO LEGUIZAMO
GERENCIA DE PROYECTOS

DAVID LEONARDO MÉNDEZ FLÓREZ
GERENCIA DE PROCESOS DE CALIDAD E INNOVACIÓN

EDUARDO ALFONSO ROA RODRIGUEZ
GERENCIA DE PROCESOS DE CALIDAD E INNOVACIÓN

BOGOTÁ, D.C.,

MAYO DE 2022

Tabla de contenido

Resumen.....	4
Introducción.....	5
Problema de investigación	6
Pregunta de Investigación	8
Objetivos.....	9
Objetivo general.	9
Objetivos específicos.....	9
Justificación	9
Marco referencial.....	10
Marco teórico.....	10
Antecedente investigativo	12
Marco normativo.....	16
Marco institucional	17
Metodología de primer nivel.....	18
Alcance de la investigación.....	18
Diseño de la investigación.....	19
Hipótesis de investigación	20
Variables aplicadas en la investigación.....	20
Determinación de la población y muestra de la investigación	23
Metodología de segundo nivel.....	24
Instrumento para la recolección de información.....	24
Técnicas para el análisis de datos	25
Análisis Y Discusión De Resultados.....	26
Resultados aplicación método Dephi	26
Proceso actual de aprovechamiento de lodos residuales generados por la planta Gelco Manizales.....	28
Identificación de beneficios económicos, ambientales y sociales.....	29
Codificación abierta: categorías de análisis.....	36
Resultados: Instrumentos de medición	37
Codificación axial.....	38
Conclusiones.....	45

Referencias	46
-------------------	----

Índice de Tablas

Tabla 1 Diseño de la investigación	20
Tabla 2 Variables aplicadas en la investigación.....	23
Tabla 3 Población objetivo y muestra de investigación.....	24
Tabla 4.Variable e Indicador de la variable	25
Tabla 5.Técnica de análisis por instrumento de recolección de datos	26
Tabla 6.Resultados instrumento de medición expertos Gelco Manizales	29
Tabla 7. Beneficios económicos, ambientales, sociales y desventajas por cada alternativa de tratamiento según la metodología empleada.....	33
Tabla 8.Beneficios económicos, ambientales, sociales y desventajas por cada alternativa de tratamiento según el tipo de producto obtenido	35
Tabla 9.Clasificación de la información expertos externos.....	38
Tabla 10.Clasificación información expertos Gelco	38
Tabla 11.Referentes principales obtenidos entre la relación de los datos para los instrumentos de medición.....	39
Tabla 12.Número de beneficios económicos, ambientales y sociales por alternativa de tratamiento.....	43

Índice de Anexos

Anexos A. Instrumento recolección de datos, entrevistas expertos.	27
--	----

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.Número de beneficios económicos, ambientales y sociales por alternativa de tratamiento	43
--	----

Resumen

Se presenta la formulación de un proyecto de investigación aplicado a la empresa Gelco Manizales, la cual se dedica a la producción y comercialización de gelatina farmacéutica, alimenticia e industrial. En el proceso de producción de gelatina, se generan aproximadamente 400 toneladas de lodos residuales por mes los cuales llegan a una planta de tratamiento de agua residual PTAR, de los cuales solo el 13% son aprovechados.

A continuación, se realiza el abordaje de una investigación tipo mixta que permita mediante revisión bibliográfica la identificación de las características más relevantes de cada método de aprovechamiento de los lodos y luego se procede con la investigación tipo cuantitativa donde se evalúan las alternativas en términos de beneficios económicos, sociales, ambientales y sus desventajas para así identificar la más apropiada para Gelco Manizales.

Palabras clave: Aprovechamiento de residuos, PTAR, Lodos residuales, Alternativas de tratamiento.

Abstract

The formulation of a research project applied to the company Gelco Manizales, dedicated to the production and marketing of pharmaceutical, food and industrial gelatin. In the gelatin production process, approximately 400 tons of residual sludge are generated per month, which reach a WWTP wastewater treatment plant of which only 13% are exploited.

Next, the approach of a descriptive type investigation is carried out that allows, through bibliographic review, the identification of the most relevant characteristics of each method of use of the sludge and then, a quantitative type investigation is carried out where the alternatives are evaluated in terms of economic, social, environmental benefits and their disadvantages in order to identify the most appropriate sludge utilization alternative for Gelco Manizales

Keywords: Reuse of waste, WWTP, residual sludge, treatment alternatives

Introducción

El presente proyecto de investigación se desarrolla en la empresa Gelco Manizales, con el objetivo de mejorar el aprovechamiento de los lodos residuales generados por la actividad de producción de gelatina industrial, alimentaria y farmacéutica. En el desarrollo de la primera parte del documento se presentan las generalidades del contexto del problema, junto con los objetivos, justificación, marco referencial; así como la metodología, alcance, hipótesis y variables de la investigación.

En la segunda parte del documento se determina la población y muestra de investigación para el caso de estudio, en donde se identificaron dos poblaciones específicas: expertos técnicos de Gelco Manizales y expertos técnicos externos. Para cada población identificada se implementaron dos métodos de recolección de datos establecidos así: expertos técnicos de Gelco – metodología Delphi y para expertos externos – cuestionario auto aplicado. Una vez recolectados los datos se procede a realizar la validación de los datos, edición y codificación de estos.

Dentro del desarrollo de la investigación científica tipo analítica, se realizó revisión teórica de cada una de las alternativas de tratamiento de los lodos, llevando a categorizarlas en tratamiento térmico, químico y biológico. Para cada uno de los tratamientos se identificaron los beneficios económicos, ambientales, sociales, así como las desventajas asociadas de cada una de ellas.

Luego se procedió a realizar el análisis de los datos identificados haciendo uso de codificación. Para los datos recolectados mediante la investigación científica analítica se hizo uso de la codificación abierta donde se establecieron categorías y subcategorías, para los datos recolectados haciendo uso de la metodología del Delphi y encuesta con las poblaciones objetivos, se hizo uso de la codificación axial.

Por último, se establecieron los análisis, discusión y las conclusiones pertinentes.

Problema de investigación

En la actualidad, el mundo vive una problemática ambiental debida al exceso de generación de lodos en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) (Gherghel, Teodosiu, & Gisi, 2019). Este aumento está relacionado con la mejora de las tecnologías de tratamientos, la ampliación de los sistemas de alcantarillado y el desarrollo de nuevas plantas industriales, así como la rápida industrialización y urbanización (Świerczek, Cieślik, & Konieczka, 2018). Según Boguniewicz-Zablocka, Klosok-Bazan, & Capodaglio (2021), la eliminación segura de lodos residuales es un tema importante para la Unión Europea, ya que se estimó que su producción superó los 14 millones de toneladas (peso seco) en el año 2020. Para cuantificar la situación, la cantidad total de lodos generados por 27 países de la unión europea osciló entre 2852 y 7844 toneladas de materia seca (MS), mientras que el nivel medio fue de 5680 ± 1231 toneladas de MS, entre los años 2006 y 2017 (EUROSTAT 2020), para el caso de países como EE. UU, China y Japón dichas cantidades fueron 6514, 2966 y 2000 toneladas/año de MS, respectivamente (UNHABITAT 2008).

En relación con la problemática de la empresa caso de estudio, Gelco Manizales, en esta se generan en promedio 400 Toneladas de lodos por mes, siendo esta cantidad similar a la producción de gelatina, dicho volumen indica que este es un residuo que requiere de atención, una adecuada disposición y buen manejo para impactar lo menos posible el medio ambiente. Actualmente, sólo el 13% de los lodos que genera la compañía son reincorporados en un proceso productivo por un externo, siendo su aplicación el compostaje; la cantidad restante es dispuesta en el relleno sanitario la Esmeralda (Manizales/Caldas) el cual cuenta con un límite de aceptación. En ambos casos, la compañía debe asumir un costo asociado.

No solo el volumen de este residuo es una problemática, también lo es su contenido de microorganismos patógenos y metales tóxicos, los cuales constituyen un riesgo para la salud (Świerczek, Cieślík, & Konieczka, 2018). Adicionalmente, se ha determinado que los procesos de disposición de lodos son responsables del 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero en una PTAR (Gherghel, Teodosiu, & Gisi, 2019). Es por esto, que los lodos sin tratar pueden afectar la salud de las personas y el medio ambiente y por tal razón existen normas sobre el manejo adecuado de los lodos, las cuales establecen el control sobre los metales pesados y la contaminación microbiológica de los biosólidos “los lodos estabilizados”.

En relación con el manejo actual de este residuo, la dificultad está asociada a la falta de espacios autorizados, costos de disposición muy altos, costos de transporte elevados para lugares específicos, así como restricciones legales. Lo anterior, suscita a las industrias a buscar alternativas de reincorporación de este material a una cadena de valor que permita apuntar a la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible (Urban & Isaac, 2018).

Teniendo en cuenta las problemáticas anteriormente mencionadas, el tratamiento de lodos se convierte en un tema relevante para la mayoría de los países y por esto es de gran importancia su uso en otros procesos productivos. Por ello, algunas aplicaciones a nivel mundial se basan en su aprovechamiento para la producción de biodiésel, la fabricación de ladrillos, la obtención de energía y la elaboración de compostaje (Arias & Restrepo, 2017). Para la aplicación de ladrillos, por ejemplo, la fábrica Cedal S.A de Ecuador, encontró la viabilidad de emplear lodos residuales para reemplazar un porcentaje de las materias primas originales, de tal manera que se lograron emplear entre el 10 % y el 40 % de composición en lodos (Araujo, Molina, & Noguera, 2018).

Así mismo, investigaciones han mostrado que países desarrollados han empleado lodos residuales para la generación de energía eléctrica mediante el uso de digestores anaeróbicos, teniendo como aplicación proporcionar la electricidad al sistema de digestión de las plantas industriales, cuya implementación produce 25 % de energía, reduciendo así el 24 % del volumen de lodos generados. De igual

forma, uno de los usos mayormente empleados de los lodos generados en una PTAR es para la elaboración de compostaje, esto debido a la gran cantidad de material orgánico que poseen dichos lodos (Garibay, 2019).

Por otro lado, la economía circular es aquella que permite mantener los productos y materiales en su máxima utilidad, lo cual, en el contexto de los lodos, es aplicable debido a su uso como recurso de otros procesos y no como un desecho, teniendo en cuenta los componentes valiosos que estos poseen, tales como el carbono y demás nutrientes, de tal manera que se reincorporen a un ciclo productivo (Gherghel, Teodosiu, & Gisi, 2019).

La presente investigación pretende evaluar diferentes alternativas de aprovechamiento para los lodos de la empresa Gelco Manizales, mediante consulta bibliográfica y entrevistas con expertos técnicos; de tal manera que se logren identificar aquellas que mejor se ajustan a las necesidades de la compañía, donde se logren eliminar los costos asociados por disposición de este residuo y, por tanto, este material pueda ser reincorporado en un proceso productivo. Al finalizar este estudio, se pretenden identificar aquellas alternativas que le permitan generar beneficios económicos, ambientales y sociales a la compañía, de tal manera que logre potencializar el grado de sostenibilidad y eliminar la problemática que presenta actualmente.

Pregunta de Investigación

¿Cómo puede Gelco Manizales realizar el aprovechamiento de los lodos resultantes de la PTAR, de tal manera que elimine la disposición de este residuo y en lugar de esto, genere un producto que puedan ser comercializado y/o utilizado en otros procesos productivos, logrando obtener beneficios económicos, ambientales y sociales a largo plazo?

Objetivos

Objetivo general.

Identificar las alternativas disponibles para la transformación del lodo residual generado en la planta Gelco Manizales, buscando el desarrollo de procesos sostenibles que aporten tanto a la empresa como a la comunidad.

Objetivos específicos.

- Identificar el proceso actual de aprovechamiento de los lodos residuales generados por la planta Gelco Manizales.
- Determinar métodos de aprovechamiento que puedan ser utilizados para realizar la transformación de los lodos residuales generados por Gelco Manizales en productos.
- Analizar desventajas de los posibles métodos de aprovechamiento y productos obtenidos a partir de los lodos residuales en las PTAR.
- Identificar los beneficios económicos, ambientales y sociales que se pueden generar en el evento de querer materializar el aprovechamiento de los lodos residuales en la empresa Gelco Manizales.

Justificación

La economía circular ofrece diferentes soluciones para el desarrollo económico, mediante la mitigación de problemáticas como el cambio climático, la degradación ambiental, el incremento de residuos y la contaminación, permitiendo grandes oportunidades de crecimiento (Albaladejo, 2021).

También permite desvincular el crecimiento económico con el daño ambiental, de tal manera que se aumenta la eficiencia de recursos y permite inducir a estilos de vida más sostenibles. De igual forma, la producción limpia, contribuye a la disminución de la pobreza y a la transición hacia economías verdes donde se presentan bajas emisiones de carbono (Naciones Unidas, 2015).

A partir de lo mencionado anteriormente, el objetivo de este proyecto de investigación es el de buscar alternativas en las que se puedan convertir los

residuos de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la empresa Gelco Manizales, en productos que sean utilizables en los diferentes sectores de comercio, generando así beneficios económicos por la venta de estos y a su vez a la preservación del medio ambiente mediante la reutilización de residuos que son transformados para ser aprovechados en otras actividades.

Este proyecto es relevante para la empresa Gelco Manizales dado que es un paso más hacia el cumplimiento del objetivo de desarrollo sostenible número 12, el cual está relacionado con el consumo y producción sostenibles, además de su meta 12.6 “donde se incentiva a las empresas a adoptar prácticas sostenibles” (Naciones Unidas, 2015).

Marco referencial

Marco teórico

El agua es el recurso más importante en la vida, sin embargo, al ser usada por la sociedad es contaminada, de tal manera que pasa a ser denominada residual y por lo tanto debe ser tratada en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con el fin de retornar este recurso al medio ambiente. Los tratamientos de aguas residuales utilizan tanto la eliminación física, como la transformación química y biológica de partículas, patógenos, compuestos orgánicos y nutrientes para mejorar la calidad del agua efluente (Peccia & Westerhoff, 2015).

Los lodos generados en una PTAR, hacen referencia al subproducto proveniente de la concentración de los sólidos contenidos en el agua, o de la formación de nuevos sólidos suspendidos resultantes de los sólidos disueltos, que se forman durante el tratamiento dado al agua residual generada por las plantas productoras (Díaz, Lorenzo, & Venta, 2015). Dicho subproducto, cada vez presenta mayor crecimiento debido a la obligatoriedad que se tiene por medio de las normativas colombianas para todas aquellas personas que desarrollen actividades industriales, comerciales o de servicios, de realizar un tratamiento a su agua residual generada antes de su vertimiento.

El término 'biosólidos' es una forma de enfatizar los beneficios de este residuo, dando valor a sus usos productivos y no a la disposición final improductiva en rellenos sanitarios (Andreoli, von Sperling & Fernandes,2007).

Algunos componentes indeseables en las aguas a tratar que aumentan su concentración en los lodos residuales son: metales, contaminantes orgánicos y organismos patógenos (Andreoli, von Sperling & Fernandes,2007).

La cantidad y la calidad de los lodos se ve afectada por factores como el tipo de tecnología empleada para el tratamiento de las aguas, la eficiencia del tratamiento, el volumen y la composición de las aguas tratadas (Abdel Wahaab, Mahmoud, & van Lier, 2020).

Para el caso de la empresa Gelco Manizales, sus lodos provienen de un tratamiento tanto fisicoquímico y biológico, donde inicialmente se tiene como resultado un lodo primario, el cual es generado del tratamiento inicial de las aguas residuales, donde se emplean métodos fisicoquímicos para la eliminación de los sólidos en suspensión y materiales flotantes, para después pasar a un tratamiento biológico, que busca generar lodos activados, donde por medio de un reactor se mantiene un ambiente anaerobio que busca la degradación de la materia orgánica permitiendo la disminución de los contaminantes orgánicos presentes en el lodo (Garibay, 2019).

Las técnicas de tratamiento y estabilización de lodos antes de su disposición generalmente consisten en reducciones de humedad y estabilización de la materia orgánica mediante digestión, compostaje o tratamiento térmico (Abdel Wahaab, Mahmoud, & van Lier, 2020).

Según Liew et al (2022), el rendimiento de cada técnica de tratamiento se puede evaluar en función de cinco criterios: (1) recuperación de carbono, (2) recuperación de nitrógeno, (3) reducción de volumen/peso, (4) destrucción de patógenos y (5) estabilización de metales pesados. El autor menciona la siguiente clasificación de los tipos de tratamiento:

- Tratamiento químico: Este permite una alta retención del nitrógeno en los lodos, inhibe los patógenos por los pH manejados, provoca un aumento del peso de los lodos y conlleva a un alto costo por el consumo excesivo de químicos
- Tratamiento térmico: Permite la máxima reducción volumen/peso, se realiza en cortos tiempos de tratamiento, permite la destrucción completa de patógenos, permite recuperar el carbono a través de la generación de biogás, bioaceite o biocarbón; sin embargo tiene altos costos de inversión, se deben emplear tecnologías complejas, sus requerimientos energéticos son altos, provoca emisión de contaminantes, es poco empleado a gran escala y posee baja retención de nitrógeno debido a la volatilización de este a alta temperatura
- Tratamiento biológico: Tiene una alta retención de nitrógeno en el residuo, permite estabilizar metales pesados y patógenos, sin embargo, algunas alternativas tienen altos costos de inversión y compleja operación.

Por otro lado, se hace necesario definir el término de economía circular, el cual hace referencia a un sistema industrial restaurativo por intención y diseño, de tal manera que elimina el concepto de “fin del valor de un producto” por la restauración, adicionalmente, apunta a la eliminación de desechos a través del diseño superior de productos, de tal manera que al finalizar su ciclo productivo puedan ser reincorporados en uno nuevo (Gherghel, Teodosiu, & Gisi, 2019). Este concepto está muy relacionado con la sostenibilidad empresarial, cuyo fin es generar un valor económico, ambiental y social con el fin de aumentar el bienestar de las generaciones presentes y futuras (Barrios Parejo, Niebles Núñez, & Niebles Núñez, 2021).

Antecedente investigativo

En los últimos años, se han realizado una variedad de estudios que buscan generar un aprovechamiento hacia los lodos generados en una PTAR. Una investigación realizada por la Universidad Científica del Sur en el año 2019, presenta algunos tipos de aprovechamiento dados a este subproducto, como lo es,

la generación de energía eléctrica mediante el uso de digestores anaeróbicos; lo cuales emplean el 15% de los lodos generados para la obtención de energía y provee hasta un 25% de energía a la planta procesadora de la cual provienen los lodos, reduciendo el volumen de los mismos, y generando una optimización de los recursos lo cual se refleja en una disminución de los costos anuales de la organización (Garibay, 2019).

Diferentes autores han investigado sobre los tipos de tratamiento que pueden realizarse a los lodos provenientes de una PTAR, como menciona Liew et al (2022), la digestión anaerobia, es un proceso biológico que utiliza microorganismos para convertir materia orgánica biodegradable, el autor menciona, que esta alternativa requiere un alto costo de inversión y tiene una operación compleja. De igual forma Hoang et al (2022), menciona que con esta alternativa se obtiene biogás, un producto que puede ser empleado para fines de transferencia de calor y generación eléctrica. También menciona que durante su producción se logran destruir patógenos y se limitan las emisiones de olores, sin embargo, su producción tiene un bajo rendimiento y degradación de sólidos volátiles.

Otra alternativa de tratamiento es la biológica, donde se resalta el compostaje; según Hoang et al (2022) este un proceso aerobio, donde se convierten los lodos de una PTAR en una fuente de nutrientes para plantas y carbono orgánico estabilizado y uniforme, de tal manera que puede ser empleado como acondicionador y fertilizante del suelo, sin embargo, esta aplicación puede conllevar a contaminar los suelos con metales pesados y patógenos, además de generar emisiones gaseosas (especialmente amoníaco) y olores molestos. Por otro lado, González et al (2019) menciona que el compostaje se considera una tecnología respetuosa con el medio ambiente, la cual permite descomponer eficazmente la materia orgánica en un producto final estable. Además, resalta que la alta temperatura alcanzada por el calor metabólico generado durante la fase termófila del compostaje es eficaz para destruir patógenos y mejorar la degradación biológica de diferentes micro contaminantes orgánicos. Por otro lado, Liew et al (2022) menciona dos métodos de tratamiento biológico de bajo costo y gran potencial, los

cuales son el vermicompostaje (Compostaje empleando lombrices) y las larvas de mosca soldado-negra (BSFL), de tal manera que su empleo podría eliminar la necesidad de instalar equipos de alta temperatura como lo requiere el tratamiento térmico, reduciendo así la complejidad del proceso y el costo de capital. El vermicompostaje, por ejemplo, ha demostrado la capacidad de descomponer los lodos tres veces más rápido que de forma natural, de tal manera que esto puede ocurrir durante su disposición (Liew et al., 2022).

De igual forma, Gonzales & Ydilbrando (2019) mencionan que el compostaje de este material permite nutrir los suelos por su carga orgánica, mejorando notablemente las propiedades físicas del terreno como el color, estructura, porosidad, densidad aparente, permeabilidad, entre otros, y aumentando la actividad biológica del mismo, por el porcentaje de materia orgánica. Las ventajas de este caso de aplicación pueden ser: cambio en la estructura logrando mayor estabilidad, aumento de impermeabilidad al lograr solidez de los agregados, incremento de resistencia mecánica del suelo y mayor estabilidad del suelo logrando el sello superficial (Muñoz, Amparo & Betancourt, 2019).

En relación con las alternativas térmicas, como menciona Hoang et al (2022), la incineración reduce considerablemente el volumen de lodos, se pueden obtener energías renovables, los patógenos son destruidos y el olor se minimiza considerablemente, sin embargo, Djandja et al (2020) resalta que es una metodología muy costosa que genera emisiones no deseadas (dioxinas, furanos, NOx, N2O, HF, etc.). De igual forma, Bahadori & Hosseini (2018), menciona que la calcinación de este material permite reducir entre el 90 y el 95 % del volumen de lodo, además, proporciona una estrategia más simple en la gestión de desechos industriales, sin embargo este autor resalta que la aplicación de las cenizas residuales (SSA) en la producción de cemento por ejemplo, genera baja resistencia y durabilidad, de tal manera que se hace necesario incorporar al proceso productivo otros componentes que permitan mitigar este impacto en la resistencia del material.

Como menciona Djandja et al., (2020), otra alternativa es el proceso de pirolisis, con el cual se reducen las emisiones no deseadas, se reduce el volumen

de lodos, los patógenos son destruidos. De igual forma, Racek et al (2020) describe que este proceso permite convertir los compuestos orgánicos de los lodos en un residuo sólido rico en carbono (biocarbon) y que además se genera bioaceite y gas pirolítico (syngas), donde el bioaceite es un producto de vapor condensable utilizado para la producción de energía y el Syngas (no condensable) es compuesto formado por (CO, CO₂, CH₄, H₂) y algunos hidrocarburos ligeros (C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆ y C₃H₈), el cual proporciona energía térmica.

Adicionalmente, la investigación realizada por Arias y Restrepo en el año 2018 muestra como los lodos provenientes de una PTAR pueden ser utilizados como materia prima para la extracción de lípidos en la producción de biodiesel; en otros casos referidos a combustibles, durante el proceso de gasificación también se pueden obtener diversos productos como el syngas, el bio-oíl y biocarbón, mediante un agente oxidante a temperaturas elevadas (Sanchez & Ramirez & James, 2021). Por consiguiente, lo anterior refleja la importancia de reemplazar combustibles tradicionales con el fin de disminuir la emisión de contaminantes al medio ambiente (Arias & Restrepo, 2018), por lo que la extracción de los lípidos y ácidos grasos presenten en los lodos residuales es una alternativa de gran impacto para la producción de biodiesel.

Así mismo, los lodos residuales pueden ser incinerados para producir energía, de tal manera que pueden generar electricidad o producir vapor, de igual forma, pueden ser empleados para proceso de gasificación, que permite obtener gases combustibles que pueden ser usados en motores de combustión, para generar valor energético al lodo, mediante la obtención de gas biológico rico en metano, que puede ser usado para la producción de electricidad, cuya eficiencia esta entre el 38% y 39% (Tomalá, 2020).

Otro aprovechamiento, tal y como lo menciona Ortega (2020) se da cuando los lodos se someten a altas temperaturas y presiones para cristalizar las sales minerales y los componentes como el fosforo, obteniendo de esta manera la recuperación temprana de aproximadamente el 90% de agentes los cuales serán

aprovechados en usos agrícolas, industriales, comerciales, entre otros, debido a la gran demanda actual y a futuro que posee este mineral.

Una alternativa viable en países como Polonia y Brasil es el uso del residuo por medio de técnicas de sedimentación primaria y secundaria buscando la estabilización mediante digestión anaerobia, deshidratación parcial, secado y almacenamiento, para lograr una base granular aceptable y servir como agregados en la construcción de carreteras y pavimento (Echeverry C, 2021). Esta propuesta se basa para la base y subbase granular que es aplicable en la construcción del pavimento, buscando cumplir las exigencias granulométricas para el tipo de material requerido. En el estudio de Echeverry del año 2019, se evaluaron muestras tomadas de diferentes regiones de Colombia, comparando sus propiedades físicas y químicas para el reemplazo de materiales de construcción; esta propuesta lograría un impacto positivo en cuanto crecimiento económico local por ser regiones con áreas de difícil acceso.

Marco normativo

Para el caso de Colombia, se cuenta con el DECRETO 1287 DE 2014 donde se establecen los criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales, y por tanto se definen las reglamentaciones necesarias para la disposición o reutilización de los lodos.

Según este decreto, los biosólidos pueden ser clasificados en categoría A y categoría B y su aprovechamiento en actividades agrícolas y no agrícolas, las cuales pueden ser la recuperación de suelos, actividades forestales y cobertura de rellenos sanitarios.

Los parámetros establecidos se orientan en los niveles reglamentados por la Agencia de Protección de Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés).

Por otro lado, el Instituto Colombiano Agropecuario - ICA, es el encargado de realizar el control del residuo cuando vaya a ser empleado como insumo agrícola o en procesos de elaboración de abonos, fertilizantes o productos acondicionadores

para suelos, de acuerdo con la resolución 150/2003 (Reglamento Técnico de Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos para Colombia).

De acuerdo con esto, toda compañía que desee procesar los lodos residuales para el acondicionamiento de suelos deberá realizar un registro previo con la empresa fabricante ante el ICA, además se deberán presentar los análisis fisicoquímicos, microbiológicos y de metales pesados, los cuales es necesario que se realicen ante laboratorios acreditados por el ICA con el fin de asegurar la calidad de dichos fertilizantes.

Marco institucional

La empresa seleccionada para el desarrollo de la investigación es Gelco Manizales, S.A.S, la cual pertenece al grupo de gelatineras Gelco International, que está conformado por 4 plantas: Gelco Manizales, Gelco Gelatinas de Brasil, Gelco Barranquilla de Colombia, y Gelco Ambato de Ecuador. La compañía hace parte del sector secundario de la economía, está ubicada en el parque industrial Juanchito en Manizales/Caldas y se dedica a la producción y comercialización de gelatina farmacéutica, alimenticia e industrial.

Los procesos definidos en el sistema de gestión integrado de la compañía son:

- Procesos estratégicos: Alta dirección, Gestión del talento humano y gestión de la mejora
- Procesos misionales: Fabricación y cadena de suministro
- Procesos apoyo: Recursos físicos, gestión ambiental, gestión de sistemas de información y gestión financiera.

Partiendo del enfoque de la presente investigación, el objetivo del proceso de gestión ambiental en Gelco Manizales es cumplir con los requerimientos establecidos por la normatividad vigente y los requisitos organizacionales en pro de la sostenibilidad ambiental. Para lograr esto, dicho proceso debe garantizar la adecuada operación de la planta de tratamiento de aguas residuales, realizar la

correcta deshidratación de los lodos, así como realizar la disposición de residuos generados en el proceso productivo o aprovechamiento de estos.

Las actividades que se realizan en este proceso están encaminadas a uno de los objetivos estratégicos de la organización, el cual es la sostenibilidad ambiental y está enfocado en apoyar los procesos de recirculación de agua, disminuir la captación del agua de la quebrada, contribuyendo a mantener el caudal ecológico de la misma, así como generar procesos de aprovechamiento de residuos.

En relación con la planta de tratamiento de aguas residuales de la compañía, esta se encarga de tratar las aguas generadas provenientes del proceso productivo, con el fin de remover los contaminantes presentes y causar el menor impacto ambiental que garantice el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente, siendo la resolución 631 de 2015 la cual establece los valores máximos permisibles en los vertimientos. Esta planta de tratamiento consta de dos fases, fisicoquímica y biológica y por lo tanto el total de lodos generados es el residuo que se desea abordar en la presente investigación.

Metodología de primer nivel

Alcance de la investigación

Se evaluarán las diferentes alternativas de tratamiento de acuerdo con las fuentes bibliográficas, se identificarán los beneficios económicos, ambientales y sociales, así como las desventajas asociadas y porcentaje de aprovechamiento del residuo para cada una de las alternativas, posteriormente se determinarán las necesidades de la compañía y expertos técnicos, en términos de aprovechamiento de este residuo. Finalmente se determinará el número los beneficios, de acuerdo con la triangulación de los datos, de tal manera que se identificaran aquellas alternativas que mayor grado de ajuste tienen con los requerimientos de Gelco Manizales y los expertos en el tema.

Diseño de la investigación

En la tabla número 1, se describe el diseño de la investigación, el cual fue definido en base a los lineamientos descritos por Hernández Sampieri et al (2010).

Método de investigación	La investigación se llevará a cabo mediante un método científico de tipo analítico, donde se evaluará por separado cada una de las alternativas de aprovechamiento del residuo de manera teórica, posteriormente se analizará la información y se correlacionará con aquella obtenida en los instrumentos de medición.
Tipo de investigación	La investigación será de tipo documental bibliográfica (cualitativa) y cuantitativa, ya que a partir de lo encontrado en la literatura (libros, artículos y documentos), se realizará un proceso de codificación abierta, donde se hará una lectura reflexiva que permita identificar la categorización de la información de acuerdo con los referentes teóricos. De igual forma, se revisará la información obtenida en los instrumentos de medición, para identificar las palabras clave (referentes). Posteriormente se realizará una codificación axial donde se llevará a cabo una triangulación entre los referentes teóricos y referentes técnicos, de tal manera que se pueda convertir dicha información a una forma cuantitativa que permita a analizar de mejor manera los resultados (Gibbs, 2012).
Enfoque de la investigación	Inicialmente la investigación será de tipo descriptiva ya que se partirá de una revisión bibliográfica, se identificarán las características más relevantes de cada alternativa de tratamiento, se ordenará la información y se continuará con una investigación de tipo cuantitativa

	donde se evaluarán las alternativas haciendo uso de datos numéricos.
--	--

Tabla 1 Diseño de la investigación

Hipótesis de investigación

Un tratamiento Biológico, Químico o térmico puede ser empleado para el aprovechamiento de lodos residuales generados en Gelco Manizales de tal manera que se ajuste a las necesidades económicas, sociales y ambientales definidas por la compañía.

A partir del tratamiento de los lodos residuales que tenga mayor ajuste a las necesidades de Gelco Manizales, es posible obtener un producto que pueda generar beneficios económicos, ambientales y/o sociales o apto para la incorporación en otros procesos productivos dentro o fuera de Gelco Manizales.

Es viable eliminar por lo menos al 50% la disposición de los lodos residuales que actualmente Gelco Manizales envía al relleno sanitario la esmeralda.

Variables aplicadas en la investigación

Las variables aplicadas en la presente propuesta de investigación se presentan a continuación:

- % de lodo aprovechable (kg).
- Número de beneficios ambientales por alternativa (tipo de tratamiento).
- Número de beneficios sociales por alternativa (tipo de tratamiento).
- Número de beneficios económicos por alternativa (tipo de tratamiento).

En cuanto a la declaración o propuesta de variables se tienen las siguientes:

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones
Porcentaje de lodo aprovechable	Se define como la cantidad de lodo (o	Como unidad de medida se tiene la cantidad de lodo	En cuanto a la dimensión, se tiene que los lodos son

	<p>biosólidos) que es capaz de ser utilizada de nuevo en el mismo proceso productivo o servir como agregado en una cadena de valor</p>	<p>aprovechado entre la cantidad de lodo generado, eso genera un porcentaje de la cantidad del sólido a reutilizar</p>	<p>aprovechables dependiendo de la cantidad de nutrientes que contengan. Como ejemplo se pueden encontrar algunos metales como lo son: Cadmio (Cd), Mercurio (Hg), Zinc (Zn), Arsénico (As), entre otros</p>
<p>Número de beneficios ambientales por alternativa (Tipo de tratamiento)</p>	<p>Consiste en la cantidad de aprovechamiento ambiental que existe por tipo de tratamiento (Biológico, químico o térmico)</p>	<p>Es la cantidad de beneficio ambiental que se toma de cada alternativa. Se puede expresar en:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Ahorro de materias primas: kg de abono ahorrado b) Ahorro emisiones de CO₂: Cantidad de CO₂ en el ambiente (Huella de carbono) c) Ahorro fertilizantes: Cantidad en Kg de fertilizante optimizado d) Consumo de agua: Cantidad de m³ 	<p>Recuperación de suelos, aprovechamiento forestal, aprovechamiento agrícola, adecuación de flora, entre otros</p>

		reducidos sobre el consumo de agua	
Número de beneficios sociales por alternativa (tipo de tratamiento).	Se refiere a la cantidad de impacto positivo en la sociedad al momento de implementar alguna de las alternativas	Basado en lo que se pueda aportar a la sociedad, algunos casos son: a) Cantidad en Km de carreteras construidas del aprovechamiento de lodos para facilitar el acceso. b) Cantidad de puestos de trabajo generados a partir del proceso de transformación de lodos. c) Como fuente de información para proyectos y estudio de suelos para los centros de investigación	Desarrollo social, autorrealización, condición de ingresos por familia, aumento calidad de vida, disminución del estrés al transportarse, entre otras.
Número de beneficios económicos por alternativa (tipo de tratamiento)	Es la utilidad o rendimiento que se obtiene al aplicar una alternativa de tratamiento	Se cuantifica de acuerdo con las retribuciones económicas, algunas son: a) Cantidad en Km de carreteras construidas del aprovechamiento de lodos. B) Ingresos adquiridos por la venta del compostaje	Ahorro generado en un proceso, ahorro en un año, aumento inversión, incremento desarrollo de ideas para reducir costos y gastos, etc.

		derivado de la transformación de los lodos. C) Cantidad de litros de biogás generados	
--	--	---	--

Tabla 2 Variables aplicadas en la investigación

Determinación de la población y muestra de la investigación

De acuerdo con las necesidades de la presente investigación se identificaron dos poblaciones específicas, una integrada por expertos técnicos de Gelco Manizales quienes proveen información específica de las necesidades y/o posibilidades de la empresa en estudio frente a las situaciones y posibilidades planteadas en el desarrollo de la investigación, y otra integrada por expertos externos con conocimientos técnicos en el manejo de lodos residuales y economía circular, en búsqueda de puntos de vista entorno a los procesos descritos en el presente documento.

En cuanto a los tipos de muestreo se eligió la selección de métodos no probabilísticos, ya que no permite que todos los individuos de la población tengan las mismas oportunidades de ser seleccionados, teniendo en cuenta que es necesario que la población cumpla con especificaciones particulares que aporten al desarrollo de la actividad de investigación planeada. Se empleo la selección intencionada o muestreo de conveniencia, la cual permite la elección por métodos no aleatorios de una muestra con características similares a las de la población objetivo. Mediante este muestreo la representatividad la determina el investigador de manera subjetiva, ya que no permite cuantificar la representatividad de la muestra (Casal, J., & Mateu, E.).

Población	Características	Tipo de Muestreo	Población total	Tamaño de Muestra
Expertos GELCO Manizales	Lideres de proceso Gelco Manizales	No probabilístico – por selección intencionada o muestreo de	20	2
Expertos	Integrantes de comunidad		Dado a que las conclusiones	

Externos a GELCO Manizales	universitaria, ingenieros químicos, ambientales, de alimentos industriales, administradores de empresas y empresarios de ciudades cercanas a Manizales.	Conveniencia	determinantes del presente trabajo estarán apoyadas en estudios bibliográficos, se determina trabajar en esta instancia con 10 expertos que darán soporte práctico dentro del proceso de investigación.
----------------------------	---	--------------	---

Tabla 3 Población objetivo y muestra de investigación

Metodología de segundo nivel

Instrumento para la recolección de información

Una vez se seleccionado el diseño de la presente investigación y la muestra adecuada, de acuerdo con el problema de estudio y las hipótesis planteadas, se procede a realizar la recolección de los datos pertinentes sobre las variables propuestas de las unidades de muestreo y análisis para la investigación.

Para esto, se procede a diseñar un instrumento de recolección de datos e información que cumpla con los requisitos esenciales de confiabilidad el cual es el grado en que su aplicación repetida al mismo individuo u objeto produce resultados iguales, validez la cual hace referencia al grado en que un instrumento mide realmente la variable que pretende medir y su objetividad que se refiere al grado en que éste es o no permeable a la influencia de los sesgos y tendencias del investigador o investigadores que lo administran, califican e interpretan como lo menciona Hernández Sampieri et al (2010).

Debido a esto, antes de proceder a realizar el instrumento se desarrolla un estudio de operacionalización de las variables, por medio de la especificación de los indicadores necesarios para cada una de dichas variables propuestas teniendo en cuenta sus dimensiones.

Variable	Indicador
Porcentaje de lodo aprovechable	Cantidad esperada de lodo que se aproveche en un producto comercializable
Número de beneficios ambientales por alternativa	Conocimiento y cantidad de beneficios ambientales que puedan darse por el aprovechamiento de los lodos
Número de beneficios sociales por alternativa	Conocimiento y cantidad de beneficios sociales que puedan darse por el aprovechamiento de los lodos
Número de beneficios económicos por alternativa	Conocimiento y cantidad de beneficios económicos que puedan darse por el aprovechamiento de los lodos

Tabla 4. Variable e Indicador de la variable

Se tienen dos poblaciones de estudio, para lo cual se desarrollan dos instrumentos de recolección de datos. En el instrumento desarrollado para los expertos de Gelco Manizales se aplican los fundamentos de la metodología Delphi, la cual permite estructurar un proceso comunicativo (entrevista) con algunos expertos temáticos en aras de aportar conocimiento en torno al problema de investigación (López, 2018), este proceso se da entre el entrevistador y entrevistado y consta de una estructura fija de cuestionamientos o secuencia de preguntas anteriormente formuladas para ser dirigidas en la conversación. Así mismo, para la recolección de datos de la población de expertos en el tema de ciudades cercanas a Manizales, se desarrolla un cuestionario auto aplicado.

Técnicas para el análisis de datos

De acuerdo con los instrumentos escogidos para realizar la recolección de datos e información, se procede a realizar el análisis de datos siguiendo las fases:

1. Validación de datos: Se realizará la validación de los datos recolectados para garantizar que estos sean fidedignos y cumplan con las características de la población objetivo.

2. Edición de datos: Se realizará una confirmación de datos para verificar que los datos recolectados no presentan errores.
3. Codificación de datos: Se agrupan los datos recolectados por categorías y se codifican las variables para verificar respuestas y tendencias entre los datos.

A continuación, se referencia el instrumento escogido, la técnica de análisis escogida y la descripción de la técnica.

Instrumento	Técnica de Análisis	Descripción
Entrevista estructurada	Informe de resultados	Se realizará un informe de resultados de las respuestas obtenidas en el instrumento de recolección de datos, haciendo uso de gráficos, tablas y demás elementos que permitan comprender los resultados obtenidos
	Triangulación metodológica	Se realizará un cruce de información entre la entrevista realizada a los expertos de Gelco Manizales y el cuestionario auto aplicado a los expertos técnicos externos para identificar así compatibilidades y similitudes entre sus respuestas.
Cuestionario auto aplicado	Verificación y análisis de respuestas haciendo uso de Excel	Una vez se realicé la triangulación de los datos teóricos y aquellos obtenidos con los instrumentos de medición, se llevará la información a una herramienta tecnológica que permita realizar el análisis de la información

Tabla 5. Técnica de análisis por instrumento de recolección de datos

Análisis Y Discusión De Resultados

Resultados aplicación método Dephi

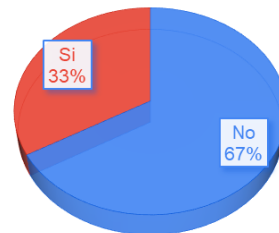
Aplicando el método Delphi en donde se implementa el instrumento de medición (encuesta) a expertos se identifican los siguientes resultados (Esto se

encontrará con mayor detalle en el anexo A. Instrumento recolección de datos, entrevistas expertos).

Anexos A. Instrumento recolección de datos, entrevistas expertos.

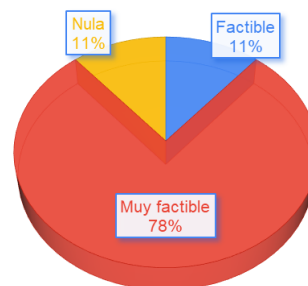
Preg 1. Tiene conocimiento, acerca de la cantidad de lodos residuales que se generan actualmente en la ciudad de Manizales y su disposición final

Resultado	Cantidad	Participación
No	6	66,67%
Si	3	33,33%
Total general	9	100,00%



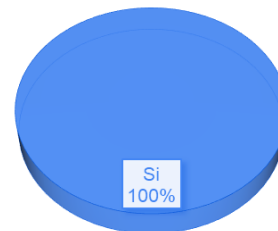
Preg 2. ¿Qué tan factible cree usted, es la implementación de nuevos procesos de aprovechamiento para los lodos residuales generados de las PTAR de la ciudad?

Resultado	Cantidad	Participación
Factible	1	11,11%
Muy factible	7	77,78%
Nula	1	11,11%
Total general	9	100,00%



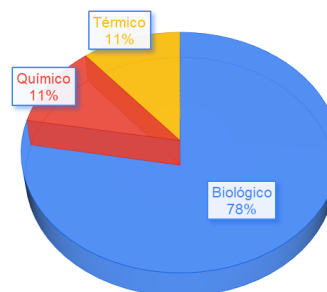
Preg 3. ¿Es posible obtener un producto donde su componente mayoritario sean los lodos residuales de las PTAR?

Resultado	Cantidad	Participación
Si	9	100,00%
Total general	9	100,00%



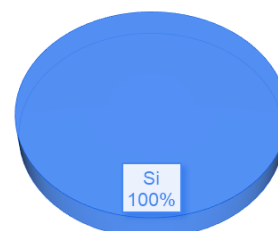
Preg 4. ¿Qué tratamiento es más factible implementar para un proceso de aprovechamiento de lodos?

Resultado	Cantidad	Participación
Biológico	7	77,78%
Químico	1	11,11%
Térmico	1	11,11%
Total general	9	100,00%



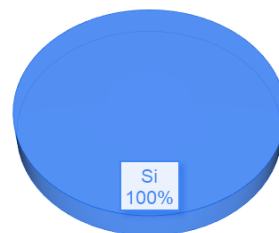
Preg 5. ¿Es posible obtener un producto que por medio del tratamiento elegido genere beneficios sociales para la comunidad manizaleña?

Resultado	Cantidad	Participación
Si	9	100,00%
Total general	9	100,00%



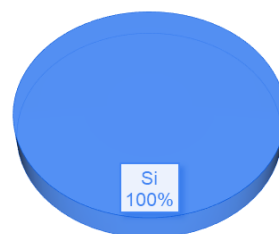
Preg 6. ¿Es posible obtener un producto que por medio del tratamiento elegido genere beneficios económicos para la comunidad manizaleña?

Resultado	Cantidad	Participación
Si	9	100,00%
Total general	9	100,00%



Preg 7. ¿Es posible obtener un producto por medio del tratamiento elegido que genere beneficios ambientales para la comunidad manizaleña?

Resultado	Cantidad	Participación
Si	9	100,00%
Total general	9	100,00%



8. Algún otro comentario que considere como valioso para la presente investigación

- Es importante evaluar el aprovechamiento de los lodos en otros países y cuáles de estos podrían ser implementados acá, teniendo en cuenta las condiciones del lodo, la tecnología disponible en Colombia y condiciones climatológicas y geográficas.
- Es una investigación muy pertinente en el momento en el cual estamos ya que aún no se constituye la PTAR y el tema de residuos sólidos es importante por las grandes cantidades que se van a manejar de lodos. Una PTAR autosostenible puede ser posible con el uso de los residuos generados no solo los lodos si no gases como el metano que pueden ser fuentes de energía alternativas

Proceso actual de aprovechamiento de lodos residuales generados por la planta Gelco Manizales

A partir del instrumento de medición aplicado a Gelco Manizales, se identificaron los datos más relevantes respecto al aprovechamiento actual del residuo en la compañía, los cuales se pueden evidenciar en la tabla número 6, de

acuerdo con esta información, se producen entre 300-500 Toneladas de lodos por mes, de los cuales una proporción es llevada al relleno sanitario y la otra es reincorporada a un nuevo proceso productivo por medio del compostaje. Se identifico que la compañía tiene interés en aprovechar más del 50 % de este residuo y por tal razón, se encuentra creando alianzas con centros de investigación, universidades y gestores de residuo, de tal manera que se pueda alcanzar dicho objetivo. De igual forma, se identificó que el tipo de tratamiento de preferencia es el tratamiento biológico y, por lo tanto, la compañía se está encaminando hacia el aprovechamiento de este material como estabilizador y fertilizante de suelos.

<i>Nombre</i>	<i>Cargo</i>	<i>Cantidad generada de lodos (Ton)</i>	<i>Disposición actual del residuo</i>	<i>Tratamiento de preferencia</i>	<i>Interés en el aprovechamiento del residuo (Si/No)</i>	<i>Recursos</i>	<i>% reducción disposición en relleno sanitario</i>
<i>David Mauricio Canal</i>	Gerente de producción	300-500	Relleno sanitario y compostaje	Biológico	Si	Alianzas con centros de investigación, gestores de residuos y universidades	> 50%
<i>Cristhian Alberto Aguirre Rengifo</i>	Ingeniero de gestión ambiental	300-400	Relleno sanitario y compostaje	Biológico	Si	Recursos humanos y económicos	> 50%

Tabla 6. Resultados instrumento de medición expertos Gelco Manizales

Identificación de beneficios económicos, ambientales y sociales

Como se describió anteriormente, la presente investigación es científica de tipo analítica, donde se hizo una revisión teórica de cada una de las alternativas de tratamiento de residuo, de tal manera que estas fueron tomadas como referencia para la categorización definida en la presente investigación, las cuales son tratamiento térmico, tratamiento químico y tratamiento biológico.

En la tabla número 7 y 8 se puede observar de manera resumida los referentes teóricos empleados para la categorización general definida, en términos

de beneficios económicos, ambientales y sociales, donde a partir de esta información se procedió a realizar la respectiva categorización de la información.

Así mismo, en la tabla 8 se presentan las desventajas y el porcentaje de todo que se emplea para cada una de las alternativas.

ALTERNATIVA	BENEFICIOS ECONÓMICOS	BENEFICIOS AMBIENTALES	BENEFICIOS SOCIALES	DESVENTAJAS DE LA ALTERNATIVA
Tratamiento térmico (Raheem et al.,2018) & (Liew et al., 2022)	Pirolisis: <ul style="list-style-type: none"> • Costos bajos • Posibilidad de tratar grandes cantidades del residuo • Conversión del residuo en energía útil Incineración: <ul style="list-style-type: none"> • Método maduro y confiable • Es empleados en la Co-combustión, generando ahorros en compra de combustibles convencionales • Tiene una amplia variedad de aplicaciones Gasificación: <ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia energética • Se logra obtener un producto comercializable (Gas de síntesis) • El metano producido tiene aplicaciones, como motores de gas, electricidad y/o calor 	Pirolisis: <ul style="list-style-type: none"> • Aplica el método de desperdicio cero ya que todos los subproductos tienen un uso • Disminuye la dependencia de combustibles fósiles • Bajas emisiones de GEI (Gases de efecto invernadero) en relación con la incineración • Destrucción de componentes orgánicos tóxicos y patógenos Incineración <ul style="list-style-type: none"> • Disminuye el consumo de combustibles fósiles Gasificación: <ul style="list-style-type: none"> • Menos emisiones de SOx y NOx, cenizas volantes y HM. 	Pirolisis: <ul style="list-style-type: none"> • Obtención de productos valiosos • Desarrollo sostenible • Reducción volumen/peso del residuo • Minimiza el olor del residuo Incineración: <ul style="list-style-type: none"> • Mediante la Cogeneración se pueden reducir las emisiones de GEI (gases de efecto invernadero) y por lo tanto lograr aceptación pública • Gran reducción volumen/peso del residuo Gasificación: <ul style="list-style-type: none"> • Permite convertir un residuo en energía útil • Gran reducción volumen/peso 	Pirolisis: <ul style="list-style-type: none"> • Necesita sistemas avanzados de control de emisiones • Los productos obtenidos no tienen mercados muy bien establecidos • Se obtiene un sólido con baja retención de nitrógeno a causa de la volatilización Incineración: <ul style="list-style-type: none"> • Obstáculos para lograr materiales de construcción de alta resistencia • Alto costo en la eliminación de cenizas y limpieza de gases de combustión • Baja retención de nitrógeno en sólido obtenido por su volatilización Gasificación: <ul style="list-style-type: none"> • Necesita de altos costos de inversión y operación • Es necesaria una limpieza del gas

				<p>de síntesis obtenido, esto previo a su uso</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baja retención de nitrógeno en sólido obtenido por su volatilización
<p>Tratamiento químico (Raheem et al., 2018), (Daneshgar et al., 2018), (Liew et al., 2022), (Valderrama et al., 2013), (Munir et al., 2019) & (Xu et al., 2012)</p>	<p>Precipitación de fosforo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es Posible obtener más del 95 % de fosforo total disponible en el lodo • Alto contenido de nutrientes contenido (nitrógeno y fósforo) <p>Tratamiento con Cal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Solo requiere el control del pH después de la adición del químico • Proceso simple 	<p>Precipitación de fosforo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los ácidos orgánicos obtenidos, se pueden utilizar como fuente de carbono en el tratamiento de aguas residuales <p>Tratamiento con Cal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estabilización microbiana 	<p>Precipitación de fosforo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Puede reutilizar como un fertilizante <p>Tratamiento con Cal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los lodos estabilizados ricos en Ca pueden ser empleados para la producción de cemento • Alta retención de nitrógeno en los lodos tratados 	<p>Precipitación de fosforo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exceso de químicos para garantizar valores de pH • Alta demanda de magnesio y amoníaco) • Requiere control de temperatura, altos gastos energéticos • Uso limitado como fertilizante • Alternativa ineficiente para la gestión de lodos. <p>Tratamiento con Cal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de exceso de químicos para garantizar valores de pH • Se puede obtener un producto libre de patógenos y olores • Aumenta el peso seco de los lodos debido al aporte de los productos químicos añadidos • No es posible recuperar el carbono en forma de biocombustible o biomasa

				<ul style="list-style-type: none"> Alto costo de operación debido al uso excesivo de químicos.
Tratamiento biológico (Raheem et al., 2018) & (Liew et al., 2022)	Digestión Anaerobia: <ul style="list-style-type: none"> Biogás rico en metano y alto poder calorífico Producción de lodos con un potencial agronómico importante Fertilizante rentable No requiere de una deshidratación de los lodos previa Método maduro Proceso simple y con bajo costo de capital Combustible microbiano: <ul style="list-style-type: none"> Conversión directa de materia orgánica a electricidad Variables de operación fácilmente adaptables (temperatura ambiente, presión normal y pH neutro) Costos de mantenimiento de equipos reducidos Compostaje aerobio, Vermicompostaje, uso de larvas de mosca soldado-negra	Digestión Anaerobia: <ul style="list-style-type: none"> Reducción de las emisiones de carbono Permite el reemplazo de fertilizantes químicos por fertilizantes orgánicos Disminuye el uso de leña, ayudando a combatir la deforestación Combustible microbiano: <ul style="list-style-type: none"> Tecnología limpia Es posible obtener bioenergía en forma de electricidad Compostaje aerobio, Vermicompostaje, uso de larvas de mosca soldado-negra <ul style="list-style-type: none"> Recuperación de carbono Capacidad de retener el nitrógeno en el lodo tratado Estabilización de lodos Emplea organismos vivos como bacterias, gusanos y larvas de insectos para acelerar la descomposición de la materia orgánica 	Digestión Anaerobia: <ul style="list-style-type: none"> Crea empleos y aumenta la mano de obra calificada Destruye los patógenos Limita las emisiones de olores Va alineado con el desarrollo sostenible Combustible microbiano: <ul style="list-style-type: none"> Estabilización de lodos y reducción de volumen Bajo ruido en los procesos productivos Permite disminuir la competencia con el uso de alimentos para estas aplicaciones Compostaje aerobio, Vermicompostaje, uso de larvas de mosca soldado-negra <ul style="list-style-type: none"> Gran reducción volumen/peso 	Digestión Anaerobia: <ul style="list-style-type: none"> Altos costos de capital y mantenimiento Baja eficiencia de conversión del residuo Proceso lento Combustible microbiano: <ul style="list-style-type: none"> Es necesario de un pretratamiento previo del residuo La electricidad producida tiene baja potencia Para algunos microorganismos es necesario el uso de iluminación artificial Compostaje aerobio, Vermicompostaje, uso de larvas de mosca soldado-negra <ul style="list-style-type: none"> Riesgo de contaminación ambiental por altas cargas de carbono orgánico, patógenos y parásitos, hidrocarburos aromáticos. Olores molestos Aplicaciones limitadas (solo acondicionamien

	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología de bajo costo • El compost se puede utilizar como fertilizante y acondicionador del suelo 			<p>to del suelo y fertilizantes)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Basado en la estrategia de remediación del suelo, la unión europea se opone a estas alternativas. • Puede haber metales pesados y patógenos en el compost que pueden ser tóxicos • Proceso que requiere de mucho tiempo
--	---	--	--	--

Tabla 7. Beneficios económicos, ambientales, sociales y desventajas por cada alternativa de tratamiento según la metodología empleada

	APROVECHAMIENTO	BENEFICIO AMBIENTAL	BENEFICIO ECONÓMICO	BENEFICIO SOCIAL	DESVENTAJA	LODO APROVECHADO
TERMICO	Adoquín (MONTAÑA, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de lodos en vertederos 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumenta la actividad puzolánica en los morteros 	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora la compactación del pavimento 	<ul style="list-style-type: none"> • Más uso de energía debido al alto contenido de humedad en los lodos 	<ul style="list-style-type: none"> • Entre el 10 % y 30% del volumen de lodos en una PTAR
	Ladrillo (Lozano & Castañeda, 2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de lodos en vertederos • Reducción del consumo de arcilla como materia en la producción de matrices cerámicas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ahorro energético durante la cocción cerámica • Ahorro del consumo de agua por la aportación de los lodos 	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementa la resistencia del material 	<ul style="list-style-type: none"> • El producto obtenido puede presentar tendencia al desgaste y a la hidratación 	<ul style="list-style-type: none"> • Entre el 40 % y 50% del volumen de lodos en una PTAR

	<u>biochar o biocarbón</u> (Machuca, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> • Permite mejorar los suelos por su alto contenido de nutrientes y bajo riesgo ambiental por su bajo contenido de metales 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso como biocarbón, el cuál por medio del tratamiento de pirólisis permite conservar algunas características de valor agronómico importante y reduce su contenido de patógenos 	<ul style="list-style-type: none"> • Conservación de contenido de fósforo, nitrógeno, materiales aprovechables para las plantas 	<ul style="list-style-type: none"> • Según procedencia puede contener concentraciones elevadas de metales que representan un riesgo ambiental 	<ul style="list-style-type: none"> • El 30% del volumen de los lodos de una PTAR
QUÍMICO	<u>Venta de metales: Concentración de metales en los sólidos</u> (Ascuña, 2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamiento de aguas residuales, degradación del cianuro libre el cuál puede llegar a transformarse en formas menos tóxicas 	<ul style="list-style-type: none"> • El sólido obtenido es comercialmente vendible 	<ul style="list-style-type: none"> • Aporta a la descontaminación del agua 	<ul style="list-style-type: none"> • Algunos de estos tratamientos utilizan reactivos que causan otro tipo de contaminación (Ejemplo oxidación con hipoclorito de Calcio) 	<ul style="list-style-type: none"> • Aproximadamente el 20% de los lodos generados por las columnas de carbón
BIOLÓGICO	<u>Energía eléctrica mediante biogás</u> (Garibay, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce emisión de GEI 0.0044% 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce el 30% de costo al año 	<ul style="list-style-type: none"> • Genera 25% de energía 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo de inversión 	<ul style="list-style-type: none"> • El 24 % del volumen de lodos en una PTAR
	<u>Compostaje</u> (Garibay, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> • Recicla la materia orgánica • Aumenta la rapidez de germinación 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo en inversión y mantenimiento • Aumenta la rapidez de germinación 	<ul style="list-style-type: none"> • Contiene alto amonio • Estabiliza los residuos 	<ul style="list-style-type: none"> • Constante volteo del sustrato • No elimina el 100 % metales • Tiene que reaccionar con el suelo para después ser asimilado por las plantas 	<ul style="list-style-type: none"> • Entre el 50 % y 60% del volumen de lodos en una PTAR

	<p>Vermicompostaje (Garibay, 2019)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • No origina residuos dañinos • Mayor contenido de nutrientes y nitratos • Reemplaza a los fertilizantes inorgánicos 	<ul style="list-style-type: none"> • Rápida descomposición • Mayor retención de agua • Bajo costo en inversión y mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor calidad del producto • Las plantas pueden asimilar de manera inmediata • Menor probabilidad de acidificación y salinización de los suelos 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere un adecuado medio para el desarrollo de las lombrices 	<ul style="list-style-type: none"> • Entre el 50 % y 60% del volumen de lodos en una PTAR
--	---	--	---	---	---	--

Tabla 8. Beneficios económicos, ambientales, sociales y desventajas por cada alternativa de tratamiento según el tipo de producto obtenido

Si bien las ventajas anteriormente mencionadas de cada tratamiento son provechosas y positivas para el ecosistema y en los diferentes aspectos, existen también ciertas desventajas que son merecedoras de análisis para poder tomar una sabia decisión frente al tipo de tratamiento a aplicar para el manejo de los lodos provenientes de la PTAR. En el primer caso se analiza el tratamiento térmico, donde se pueden evidenciar ciertos puntos críticos en los procesos de pirolisis, incineración y gasificación. Un aspecto común es el alto costo que implica alcanzar el grado de temperatura idóneo para garantizar la transformación en cada proceso, otro aspecto es el grado de control elevado que exige la metodología y en el caso de la gasificación, se tiene un alto costo debido a que se requiere la limpieza del gas de síntesis obtenida para su aprovechamiento. Para el caso del tratamiento químico, se tienen los procesos de precipitaciones de fosforo y tratamiento con Cal, aquí el Pareto en cuanto a desventajas resulta de la utilización excesiva de químicos para garantizar el pH idóneo para el aprovechamiento. Por último, en el tipo de tratamiento Biológico, se manejan tiempos de procesamiento largos, en algunos casos pretratamiento previo y se genera contaminación ambiental por cargas de carbón y olores.

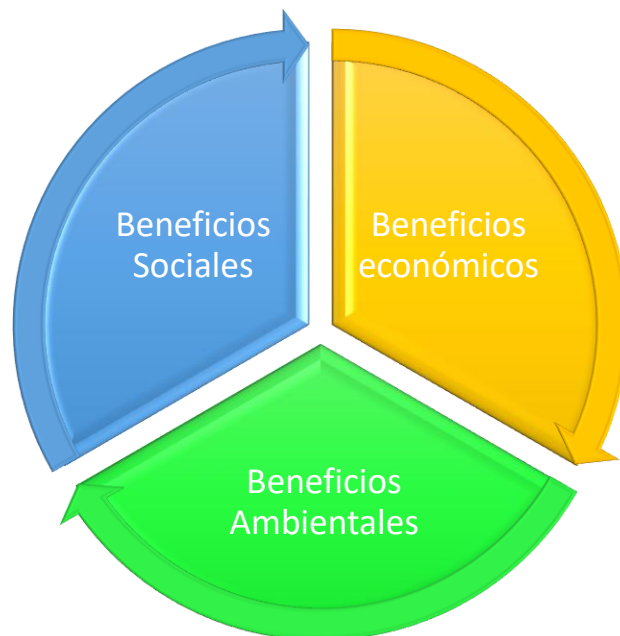
Codificación abierta: categorías de análisis

A partir de los referentes teóricos se identificaron las categorías y subcategorías para el análisis pertinente.

Categoría principal: Tipo de tratamiento por el que se transformará el residuo en un producto útil



Subcategoría: Beneficios económicos, ambientales y sociales que tiene cada alternativa



Una vez identificada la categorización aplicando una codificación abierta, se procede clasificar la información obtenida en los instrumentos de medición, donde se señala en color verde los principales referentes en términos de beneficios económicos, en color azul los principales referentes en términos de beneficios ambientales y en color naranja los principales referentes en términos de beneficios sociales. La información se puede observar en las tablas 9 y 10

Resultados: Instrumentos de medición

Tipo de tratamiento	Beneficios económicos	Beneficios Ambientales	Beneficios Sociales
Térmico	<ul style="list-style-type: none"> • Fuentes de ingresos adicionales • Insumos para la fabricación de ladrillos o cerámicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de la contaminación • Se reducen los desechos no aprovechables que van a los rellenos • Se evita la generación de lixiviados o gases contaminantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de empleo • Generación de energía • Insumos para la fabricación de ladrillos o cerámicas • Disminución de olores • Empatía de la comunidad con las PTAR • Emprendimientos con los productos obtenidos
Químico	<ul style="list-style-type: none"> • Fuentes de ingresos adicionales • Emprendimientos con los productos obtenidos • Cuando se tiene alta presencia de metales se puede emplear el residuo para la producción de bio-baterías 	<ul style="list-style-type: none"> • Neutralización casi completa del lodo • Disminución de la contaminación • Se reducen los desechos no aprovechables que van a los rellenos • Se evita la generación de lixiviados o gases contaminantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente de empleo • Menor impacto en la comunidad por olores • Empatía de la comunidad con las PTAR • Emprendimientos con los productos obtenidos

Biológico	<ul style="list-style-type: none"> Alta carga orgánica Fuentes de ingresos adicionales Componentes orgánicos aprovechables como grasas y minerales 	<ul style="list-style-type: none"> Compostaje: uso como abono Uso como fertilizante Disminución de la contaminación Sustituyen el uso de agroquímicos nocivos para el medio ambiente Se evita la generación de lixiviados o gases contaminantes 	<ul style="list-style-type: none"> Fuente de empleo Generación de energía Fuente de empleo Producción de Biogás y biosólidos Empatía de la comunidad con las PTAR Disminución de olores Emprendimientos con los productos obtenidos
-----------	---	--	--

Tabla 9. clasificación de la información expertos externos

Beneficios económicos	Beneficios Ambientales	Beneficios Sociales
<ul style="list-style-type: none"> Disminución de la dependencia de las importaciones Ingreso de recursos económicos en la región Incorporación del residuo en nuevos procesos productivos Disminución de costos por disposición Ingresos por subproductos o productos Aporte a la economía del sector rural Economía circular 	<ul style="list-style-type: none"> Producción de compostaje Disminución de residuos en relleno sanitario Aporte a cultivos y estabilización de terrenos Producción de abono orgánico Recuperación de suelos en la siembra de palma 	<ul style="list-style-type: none"> Fortalecimiento de alianzas con centros de investigación, gestores de residuo y centros universitarios para el desarrollo de procesos de economía circular con este residuo Aporte a la economía del sector rural Creación de empleos Recuperación de suelos en la siembra de palma Incorporación del residuo en nuevos procesos productivos Mejoramiento imagen corporativa

Tabla 10. Clasificación información expertos Gelco

Codificación axial

Mediante esta codificación se buscó la relación entre la información recolectada en los dos instrumentos de medición (encuestas). De acuerdo con esto, se identificaron los principales referentes que buscan los expertos de Gelco y

expertos externos, los cuales se pueden ver en la tabla 11. Posteriormente se hizo una triangulación con la información encontrada en la literatura (tablas 7 y 8), de tal manera que se pudieron definir el número de beneficios económicos, ambientales y sociales por cada alternativa de tratamiento, es decir se llevó la información cualitativa a una forma cuantitativa que permitió el posterior análisis de datos, esto se puede observar en la tabla 12.

Beneficios económicos	Beneficios Ambientales	Beneficios Sociales
<ul style="list-style-type: none"> Ingresos por subproductos o productos Disminución de productos importados Economía circular Insumos para la fabricación de otros productos 	<ul style="list-style-type: none"> Disminución de residuos en relleno sanitario Producción de abono orgánico Recuperación de suelos Neutralización del lodo Disminución de la contaminación 	<ul style="list-style-type: none"> Mejoramiento de la imagen corporativa en las organizaciones Creación de empleos Emprendimientos con los productos obtenidos Generación de energía Aporte a la economía del sector rural Disminución de olores Empatía de la comunidad con las PTAR

Tabla 11. Referentes principales obtenidos entre la relación de los datos para los instrumentos de medición

Número de Beneficios	Referente	Térmico	Químico	Biológico	Justificación con la teoría
Económico	Ingresos por subproductos o productos	6	1	5	<ul style="list-style-type: none"> Térmico: <ol style="list-style-type: none"> Energía: Conversión del residuo en energía útil Co-combustión: ahorro en compra de combustibles adicionales Adoquín: Aumento en la actividad puzolánica en los morteros Ladrillo: Ahorro energético durante la cocción cerámica Ladrillo: Ahorro consumo de agua por humedad de los lodos Biocarbón: Valor agronómico importante (contenido de fósforo, nitrógeno y materiales orgánicos) Químico: <ol style="list-style-type: none"> Extracción de fosforo: Es posible obtener más del 95 % de fosforo disponible en el lodo

					<ul style="list-style-type: none"> • Biológico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Compostaje/vermicompostaje: Tecnología de bajo costo 2. Compostaje/vermicompostaje: Costos de mantenimiento de equipos reducidos 3. Energía: Conversión del residuo en energía útil 4. Producción de fertilizante: Producto comercialmente vendible 5. Combustible microbiano: Producción de energía
	Disminución de productos importados	1	1	1	<ul style="list-style-type: none"> • Térmico: <ol style="list-style-type: none"> 1 Producción de biocarbón con un potencial agronómico importante • Químico: <ol style="list-style-type: none"> 1 Producción de minerales con un potencial agronómico importante • Biológico: <ol style="list-style-type: none"> 1 Producción de fertilizante con un potencial agronómico importante
	Economía circular	1	1	1	<ul style="list-style-type: none"> • Térmico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Reincorporación del residuo en un nuevo proceso productivo • Químico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Reincorporación del residuo en un nuevo proceso productivo • Biológico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Reincorporación del residuo en un nuevo proceso productivo
	Insumos para la fabricación de otros productos	1	1	1	<ul style="list-style-type: none"> • Térmico: <ol style="list-style-type: none"> 1 Alta eficiencia energética • Químico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Metales: El sólido obtenido es comercialmente vendible y equivalente a un 35 % de los gastos del tratamiento • Biológico: <ol style="list-style-type: none"> 1. El compost se puede utilizar como fertilizante y acondicionador del suelo
Total, beneficios económicos		9	4	8	
Ambiental	Disminución de residuos en relleno sanitario	2	1	3	<ul style="list-style-type: none"> • Térmico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Para el caso de la pirolisis aplica el método de desperdicio cero, teniendo en cuenta que todos los subproductos tienen un uso. 2. Posibilidad de tratar grandes cantidades del residuo • Químico:

					<ol style="list-style-type: none"> 1. Generalmente se usa como alternativa de pretratamiento para otras aplicaciones. Sin embargo, se reduce la disposición del residuo. <ul style="list-style-type: none"> • Biológico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Al ser procesos lentos, la cantidad de residuo a tratar en reducida. Sin embargo, se reduce la disposición del residuo. 2. Algunas técnicas no requieren de una deshidratación previa de los lodos 3. Se reutiliza materia orgánica
	Producción de abono orgánico Recuperación de suelos	1	1	2	<ul style="list-style-type: none"> • Térmico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Uso de biocarbón obtenido en los procesos de pirólisis como acondicionador de suelos • Químico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Uso de fosforo obtenido para la producción de fertilizantes • Biológico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Producción de fertilizantes y acondicionadores de suelo 2. Aumento en la rapidez de germinación de las plantas
	Neutralización del lodo	1	1	2	<ul style="list-style-type: none"> • Térmico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Destrucción de componentes orgánicos tóxicos y patógenos • Químico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Estabilización microbiana por los altos valores de pH • Biológico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Capacidad de retener el nitrógeno en el lodo tratado 2. Estabilización de lodos
	Disminución de la contaminación	4	2	4	<ul style="list-style-type: none"> • Térmico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Disminuye la dependencia de combustibles fósiles. 2. Para el caso de la gasificación y la pirólisis se tienen menos emisiones de SOx y NOx, cenizas volantes y HM. 3. Disminuye el uso de leña, ayudando a combatir la deforestación 4. Reduce el consumo de arcilla como materia principal en la producción de matrices cerámicas • Químico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Ácidos obtenidos pueden ser usados como fuente de carbono

					<p>en procesos de tratamiento de aguas residuales</p> <ol style="list-style-type: none"> Los metales obtenidos con este tipo de tratamiento pueden ser empleados para la degradación del cianuro libre, en el tratamiento de aguas residuales <ul style="list-style-type: none"> Biológico: <ol style="list-style-type: none"> Reducción de las emisiones de carbono en 0,0044 % Permite el reemplazo de fertilizantes químicos por fertilizantes orgánicos Disminuye el uso de leña, ayudando a combatir la deforestación, Es posible obtener bioenergía en forma de electricidad
Total, Beneficios ambientales		8	5	11	
Social	Mejoramiento de la imagen corporativa	1	0	1	<ul style="list-style-type: none"> Térmico: <ol style="list-style-type: none"> Aprovechamiento de residuos de manera sostenible Químico: No aplica ya que el alto consumo de químicos limita este tipo de tratamiento en el ámbito social. Biológico: <ol style="list-style-type: none"> Aprovechamiento de residuos de manera sostenible
	Creación de empleos	1	1	1	<ul style="list-style-type: none"> Térmico: <ol style="list-style-type: none"> Generación de nuevos empleos Químico: <ol style="list-style-type: none"> Generación de nuevos empleos Biológico: <ol style="list-style-type: none"> Generación de nuevos empleos
	Emprendimientos con los productos obtenidos	1	1	1	<ul style="list-style-type: none"> Térmico: <ol style="list-style-type: none"> Obtención de productos comercializables Químico: <ol style="list-style-type: none"> Obtención de productos comercializables Biológico: <ol style="list-style-type: none"> Obtención de productos comercializables
	Generación de energía	2	0	1	<ul style="list-style-type: none"> Térmico: <ol style="list-style-type: none"> Conversión del residuo en energía útil Uso en co-combustión Químico: No aplica Biológico:

					1. Conversión del residuo en energía útil
	Empatía de la comunidad con la PTAR	4	1	5	<ul style="list-style-type: none"> • Térmico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Los lodos estabilizados ya no serán una amenaza para la comunidad 2. Reducción volumen/peso del residuo 3. Minimiza el olor del residuo. 4. Obtención de materiales para la construcción (Mejora la compactación del pavimento) • Químico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Los lodos estabilizados ya no serán una amenaza para la comunidad 2. Aporta a la descontaminación del agua • Biológico: <ol style="list-style-type: none"> 1. Los lodos estabilizados ya no serán una amenaza para la comunidad 2. Reducción de volumen 3. Bajo ruido en los procesos productivos 4. Permite disminuir la competencia con el uso de alimentos, ya que se emplea como materia prima un residuo. 5. Menor probabilidad de acidificación y salinización de los suelos
Total, beneficios sociales		9	3	9	

Tabla 12. Número de beneficios económicos, ambientales y sociales por alternativa de tratamiento

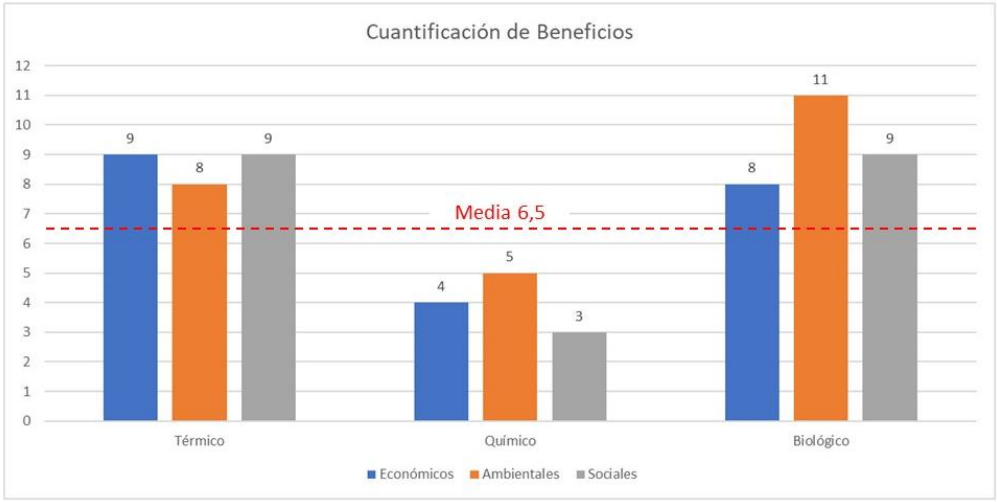


Ilustración 1. Número de beneficios económicos, ambientales y sociales por alternativa de tratamiento

Como se puede observar en la ilustración 1, tanto la alternativa térmica como la biológica muestran gran potencial para el aprovechamiento de lodos residuales de las PTAR, siendo la alternativa biológica aquella con mayor aplicación, teniendo en cuenta su facilidad de uso, en procesos como el compostaje y los beneficios ambientales que conlleva su aplicación.

Respecto a las hipótesis planteadas en la presente investigación, las tres vías de aprovechamiento o alternativas estudiadas para el empleo en los lodos generados por las PTAR reflejan ventajas significativas para la economía circular del sector analizado. Sin embargo, después de analizadas las necesidades económicas, sociales y ambientales de la empresa Gelco Manizales tal como se observa en la tabla 6, la vía biológica se considera la técnica de valoración de lodos más apropiada, puesto que dicho tratamiento presenta ventajas como la reducción de emisión GEI, reemplazo de los fertilizantes inorgánicos, aumento de la rapidez de germinación de las plantas, estabilización de los suelos, aunque posee tiempo de procesamiento prolongado, vías de tratamiento termoquímicas como la incineración, la pirólisis y la gasificación han mejorado la eficiencia con un procesamiento más rápido y aplicaciones finales versátiles, que sin embargo, consumen mucha energía para materias primas que contienen mucha humedad, como lodos húmedos, tal como lo mencionan diferentes autores expuestos en las tablas 7 y 8. Por lo cual, el tratamiento biológico, permite a la organización generar uno o más productos que representen beneficios económicos para la misma, también busca que genere beneficios sociales a la comunidad de Manizales, y a su vez que presente una reducción de la cantidad de lodos residuales que actualmente la compañía envía hacia el relleno sanitario local.

Productos como el compostaje permiten la reducción de patógenos, garantizando una buena maduración para el uso en la agricultura, debido a que aumenta la rapidez de germinación y estructura del cultivo, por ende, el compostaje resulta ser un método eficiente para estabilizar los residuos y reciclar la materia orgánica (Garibay, 2019), así como genera un aprovechamiento de

entre el 50 y 60% de los lodos, disminuyendo así la cantidad de lodos que Gelco lleva al relleno sanitario la Esmeralda de la ciudad de Manizales.

Conclusiones

Los métodos de aprovechamiento identificados en la presente investigación son el térmico, químico y biológico, los cuales han sido ampliamente estudiados y tienen diferentes metodologías y por lo tanto productos obtenidos. De acuerdo con esto, los beneficios y desventajas asociados dependerán de la metodología o producto en específico que se desee analizar.

Entre las principales desventajas de las alternativas de tratamiento estudiadas, se encontró que la térmica tiene altos costos de operación y se debe prestar puntual atención en los gases generados a la atmósfera; para el caso de la alternativa química, el exceso de químicos empleados genera un estigmatismo social importante, así como aumento en peso del residuo; por último la alternativa biológica presenta como principal desventaja su baja eficiencia, lentitud en los procesos, así como posibilidad de contaminación del suelo si no se realiza una previa destrucción de patógenos.

Gelco Manizales conoce sobre las alternativas de tratamientos disponibles para el aprovechamiento de sus lodos residuales, donde han seleccionado la alternativa biológica, como aquella que les puede generar mayores beneficios, lo cual está muy relacionado con los resultados obtenidos en la presente investigación, donde sobresalen los beneficios ambientales de dicha alternativa. De igual forma, se identificó que es posible tratar más del 50% de los lodos generados en la organización con este tipo de tecnologías.

Referencias

Salihoglu, G., & Mardani-Aghabaglou, A. (2021). Characterization of sewage sludge incineration ashes from multi-cyclones and baghouse dust filters as possible cement substitutes. *Environmental Science & Pollution Research*, 28(1), 645–663. <https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1007/s11356-020-10507-7>

Gherghel, A., Teodosiu, C., & Gisi, S. D. (2019). A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production*

Świerczek, L., Cieślík, B. M., & Konieczka, P. (2018). The potential of raw sewage sludge in construction industry-A. *Journal of Cleaner Production*.

Boguniewicz-Zablocka, J., Klosok-Bazan, I., & Capodaglio, A. G. (2021). Sustainable management of biological solids in small treatment plants: overview of strategies and reuse options for a solar drying facility in Poland. *Environmental Science & Pollution Research*, 28(19), 24680–24693. <https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1007/s11356-020-10200-9>

EUROSTAT, 2020. Sewage sludge production and disposal from urban wastewater. In: Commission, E. (Ed.). <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TEN00030/default/table>, Luxembourg
<https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TEN00030/default/table>

UN-HABITAT, 2008. Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global source. United Nations Human Settlements Programme, Nairobi 00100, Kenya

(European Commission), 2009. Fifth Commission summary on the implementation of the Urban Waste Water Treatment Directive, Commission Staff Working Document.

Araujo, L., Molina, S., & Noguera, L. (2018). Aprovechamiento de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales como materia prima en la industria de la construcción: revisión bibliográfica. *Revista Agunkuyâa*, 21-28.

Arias, L. M., & Restrepo, M. d. (2017). Valoración de lodos de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) como materia prima para la extracción de lípidos en la obtención de biodiésel. *Revista ION*, 71-79

Garibay, E. A. (2019). Aprovechamiento de lodos residuales provenientes de las PTAR para la reducción del impacto ambiental. Lima, Perú: Universidad Científica del Sur.

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

Arias, L. M., & Restrepo, M. d. (2018). Valoración de lodos de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) como materia prima para la extracción de lípidos en la obtención de biodiésel. *Revista ION*.

Albaladejo, M., & Mirazo, P. (2021). La economía circular: un modelo económico que lleva al crecimiento y al empleo sin comprometer el medio ambiente. Retrieved 10 February 2022, from <https://news.un.org/es/story/2021/03/1490082>

MUNOZ, Carlos Esteven Pulgarín; AMPARO, Beatriz and BETANCUR, Wills. Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual mediante pacas biodigestoras. *Rev. P+L*

[online]. 2019, vol.14, n.1, pp.33-45. ISSN 1909-0455.

<https://doi.org/10.22507/pml.v14n1a3>.

Echeverry, C. A. (2021). Estado del conocimiento de lodos residuales de PTAR aplicado en bases y subbases granulares para vías terciarias: Casos de estudio y su posible aplicación en Colombia. Recuperado de:

<http://hdl.handle.net/10654/39720>.

Gonzales, V. G., & Ydilbrando, M. Y. (2019, 16 abril). Efecto de las diferentes concentraciones de lodos secos del PTAR – COVICORTI para el mejoramiento de suelos áridos. Universidad César Vallejo.

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/31520?show=full>

Sánchez, G., Ramírez, J., James, A., Deago, E. y Villarreal, J. 2021. Evaluación del potencial de lodos orgánicos carbonizados de una planta de tratamiento de aguas residuales para el mejoramiento de suelos. Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC. (jun. 2021), 292-299.

COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1287 (10, julio, 2014), por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO – I.C.A. Resolución 00150 (21, enero, 2003), por la cual se adopta el reglamento técnico de fertilizantes y acondicionadores de suelos para Colombia.

Abdel Wahaab, R., Mahmoud, M., & van Lier, J. B. (2020). Toward achieving sustainable management of municipal wastewater sludge in Egypt: The current status and future prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109880. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109880>

- Andreoli, C. V., von Sperling, M., & Fernandes, F. (2007). *Sludge Treatment and Disposal*. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780402130>
- ARGIBAY, J. C. (2009). Muestra en investigación cuantitativa. Subjetividad y procesos cognitivos, 13(1), 13-29.
- Peccia, J., & Westerhoff, P. (2015). We Should Expect More out of Our Sewage Sludge. *Environmental Science & Technology*, 49(14), 8271-8276. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01931>
- Barrios Parejo, I. Á., Niebles Núñez, W. A., & Niebles Núñez, L. D. (2021). Inserción del análisis financiero en PyMes Colombianas como mecanismo para promover la sostenibilidad empresarial. *Desarrollo Gerencial*, 13(2), 1–19. <https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.17081/dege.13.2.4454>
- Djandja, O. S., Wang, Z.-C., Wang, F., Xu, Y.-P., & Duan, P.-G. (2020). Pyrolysis of Municipal Sewage Sludge for Biofuel Production: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(39), 16939-16956. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c01546>
- González, D., Colón, J., Gabriel, D., & Sánchez, A. (2019). The effect of the composting time on the gaseous emissions and the compost stability in a full-scale sewage sludge composting plant. *Science of The Total Environment*, 654, 311-323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.081>

Racek, J., Sevcik, J., Chorazy, T., Kucerik, J., & Hlavinec, P. (2020). Biochar – Recovery Material from Pyrolysis of Sewage Sludge: A Review. *Waste and Biomass Valorization*, 11(7), 3677-3709. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00679-w>

Hoang, S. A., Bolan, N., Madhubashani, A. M. P., Vithanage, M., Perera, V., Wijesekara, H., Wang, H., Srivastava, P., Kirkham, M. B., Mickan, B. S., Rinklebe, J., & Siddique, K. H. M. (2022). Treatment processes to eliminate potential environmental hazards and restore agronomic value of sewage sludge: A review. *Environmental Pollution*, 293, 118564. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118564>

Bahadori, H., & Hosseini, P. (2018). Developing green cement paste using binary and ternary cementitious blends of low pozzolanic sewage sludge ash and colloidal nanosilica (short-term properties). *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(4), 501-511. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0037-0>

Liew, C. S., Yunus, N. M., Chidi, B. S., Lam, M. K., Goh, P. S., Mohamad, M., Sin, J. C., Lam, S. M., Lim, J. W., & Lam, S. S. (2022). A review on recent disposal of hazardous sewage sludge via anaerobic digestion and novel composting. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 126995. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126995>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). Metodología de la investigación (5a ed). McGraw-Hill.

ORTEGA, N. R. (2020). Métodos para el manejo y la mitigación ambiental generada por lodos secundarios en las plantas de tratamiento de agua residual y posible aplicación en Colombia. casos de estudio Japón, México y suiza. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.

TOMALÁ, J. G. (2020). Uso de lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales para la elaboración de compost. Guayaquil: Universidad Laica Vicente Rocafuerte.

Casal, J., & Mateu, E. (2003). Tipos de muestreo. Rev. Epidem. Med. Prev, 1(1), 3-7.

Raheem, A., Sikarwar, V. S., He, J., Dastyar, W., Dionysiou, D. D., Wang, W., & Zhao, M. (2018). Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: A review. Chemical Engineering Journal, 337, 616-641. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.149>

Daneshgar, S., Buttafava, A., Capsoni, D., Callegari, A., & Capodaglio, A. G. (2018). Impact of pH and Ionic Molar Ratios on Phosphorous Forms Precipitation and Recovery from Different Wastewater Sludges. *Resources*, 7(4), 71. <https://doi.org/10.3390/resources7040071>

Valderrama, C., Granados, R., & Cortina, J. L. (2013). Stabilisation of dewatered domestic sewage sludge by lime addition as raw material for the cement industry: Understanding process and reactor performance. *Chemical Engineering Journal*, 232, 458-467. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.07.104>

Munir, M. T., Li, B., Mardon, I., Young, B. R., & Baroutian, S. (2019). Integrating wet oxidation and struvite precipitation for sewage sludge treatment and phosphorus recovery. *Journal of Cleaner Production*, 232, 1043-1052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.007>

Xu, H., He, P., Gu, W., Wang, G., & Shao, L. (2012). Recovery of phosphorus as struvite from sewage sludge ash. *Journal of Environmental Sciences*, 24(8), 1533-1538. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60969-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60969-8)

Gibbs, G. (2012). *El análisis de datos en investigación cualitativa*. Ediciones Morata.

Ascuña R., Víctor B., Zela O., Javier G., Bolaños S, Hector G, Mamani C., Pedro L., Huamani B, Roberto P, & Huanca Z., Paul K. (2018). Tratamiento de soluciones de cianuro y precipitación de metales cianicidas por reacción con peróxido de hidrógeno y soda caustica, el método perso; obtención de lodos económicamente utiles. *Revista Boliviana de Química*, 35(5), 155-161. Recuperado en 17 de mayo de 2022, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-54602018000500005&lng=es&tlng=es

Velázquez Machuca, M. A., J. R. Equihua Soriano, J. Venegas González, J. L. Montañez Soto, J. L. Pimentel Equihua, M. Muñoz Navia. 2019. Caracterización física y química de biochar de lodos residuales. *Terra Latinoamericana* 37: 243-251. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.409>

López-Gómez, Ernesto (2018). EL MÉTODO DELPHI EN LA INVESTIGACIÓN ACTUAL EN EDUCACIÓN: UNA REVISIÓN TEÓRICA Y METODOLÓGICA. *Educación XX1*, 21(1),17-40.[fecha de Consulta 18 de Mayo de 2022]. ISSN: 1139-613X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70653466002>

Lozano, S. M., & Castañeda, C. H. (2016). *Evaluación técnica, económica y ambiental de lodos pr aluación técnica, económica y ambiental de lodos*

provenientes de la PTAR de la compañía internacional de alimentos agropecuarios (Cialta S.A.S) como alternativa de aprovechamiento. Bogotá: Universidad de La Salle .

Montaña, m. a. (2015). *Fabricación de adoquín ecológico usando como materia prima biosólido de PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales)*. Tunja: Universidad Santo Tomas de Aquino.

Anexos

A. INSTRUMENTO RECOLECCIÓN DE DATOS, ENTREVISTAS EXPERTOS

Instrumento Gelco Manizales

A continuación, se presenta la siguiente encuesta con la finalidad de conocer la perspectiva de los expertos de Gelco Manizales acerca del aprovechamiento de los lodos residuales generados en la compañía.

1. Nombre: _____
Empresa: _____
País: _____
Ciudad: _____
Número de teléfono: _____

2. Tiene conocimiento, acerca de la cantidad de lodos que generar la PTAR de la compañía.

SI	NO
----	----

¿Cuánto?

3. ¿Qué disposición final tienen los lodos residuales generados?

4. Si Gelco Manizales, implementara un proyecto para aprovechar los lodos generados que se presentan en la PTAR, por medio de que tratamiento creería que podría realizarlo, según las necesidades de la compañía.

- a. Biológico
- b. Químico
- c. Térmico

5. ¿Cree usted que la compañía se encuentre interesada en realizar un aprovechamiento a los lodos residuales que genera su PTAR para la obtención de nuevos productos?

SI	NO
----	----

6. ¿Qué recursos cree usted que la compañía pueda brindar para el desarrollo de la presente propuesta de investigación?

7. Cree usted, es posible obtener un producto que genere beneficios sociales, ambientales y económicos a la comunidad manizaleña, por medio del aprovechamiento de los lodos residuales que actualmente se generan en Gelco Manizales.

SI	NO
----	----

¿Cuáles?

8. Cree usted, es posible obtener un producto que sea apto para la reincorporación en procesos productivos de Gelco Manizales.

SI	NO
----	----

¿Cuáles?

9. ¿Qué necesidades considera usted, debería suplir una alternativa o producto que le permita a Gelco tratar y aprovechar sus lodos residuales?

10. ¿Qué porcentaje de reducción esperaba para los lodos residuales de la PTAR que se envían al relleno sanitario la Esmeralda en caso de ser implementado este proyecto?

- a. Menor al 50%
- b. Igual al 50%
- c. Mayor al 50%

Instrumento de recolección de datos población experta (Método Delphi)

El cuestionario para la recolección de los datos realizado a la comunidad experta se desarrolla mediante un formulario de Google, el cual tiene el siguiente enlace:

<https://forms.gle/mt3PYdPRt63NLrcq8>

Los resultados obtenidos en ambos instrumentos de medición se adjuntan en el archivo adjunto llamado “Instrumento recolección de datos, entrevista expertos”.