

Potencial fertilizante del digerido obtenido a partir de la codigestión anaerobia de estiércol
bovino y lactosuero suplementada con biochar

Cirley Luzdari Borrero Alfaro y Yely Tatiana Cruz Castro

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Humberto Escalante Hernández
PhD en Ingeniería Química

Codirector

Liliana del Pilar Castro Molano
PhD en Ingeniería Química

Alexander Muñoz Muñoz
Ingeniero Químico

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Dedicatorias

A Dios y a la virgencita que me han iluminado para estar donde estoy y no desfallecer ante los obstáculos. A mis padres Luz Marina Alfaro y Oscar Borrero por su apoyo, sacrificios y consejos que me han llevado a lograr cada una de mis metas, son mi inspiración y motivación para seguir adelante.

A mis hermanos Anderson y Marlin que me han acompañado y siempre han estado ahí para darme una palabra de aliento.

A mi sobrina Saray que ha sido un motor para nuestras vidas, con su llegada nos ha brindado una luz de esperanza para seguir luchando por nuestros sueños. A mis tíos y primos que me brindaron su compañía y colaboración en muchas ocasiones.

Al profe Gustavo que ha sido como un ángel en mi carrera, brindándome su constante apoyo para salir adelante. A los profesores Liliana y Humberto por permitirme hacer parte de esta linda familia (digestión anaerobia), por su confianza, consejos y enseñanzas que me han permitido crecer como profesional y como persona.

A mis amigos Sthefany, Tatiana, Lidia, Claudia, Juli y Fabian por su amistad incondicional, su apoyo constante y consejos para mostrar siempre una mejor versión de mí.

A mi amiga y compañera de tesis, Yely, por su apoyo incondicional, por su paciencia y perseverancia para que este proyecto fuese un éxito.

Y finalmente me dedico este proyecto a mí por tener la fortaleza y determinación para enfrentar los nuevos retos y demostrarme que estoy hecha para grandes cosas.

Cirley Luzdari Borrero Alfaro

A Dios, por darme la sabiduría y fortaleza para afrontar todas las situaciones a lo largo de la carrera. A mi papá Juan, por enseñarme que con esfuerzo y dedicación todo es posible, por siempre creer en mí y brindarme su apoyo en todo momento. A mi mamá Rosa, quien me enseñó que la paciencia y el trabajo duro son la base para lograr lo que me proponga, por siempre estar a mí lado dándome ánimos y motivándome a seguir adelante. Sin duda alguna Dios me regaló los mejores padres, este logro se los dedico desde el fondo de mi corazón, porque sin ustedes nada hubiera sido posible.

A mis hermanos, Juan y Cristina por su compañía, consejos y apoyo durante este proceso. A mis sobrinos, Joel y Esthefany quienes fueron una motivación para no darme por vencida durante la carrera. A Cristian por sus palabras de ánimo, acompañamiento en esta etapa y por motivarme cuando más lo necesité.

A mis amigos, especialmente a Cirley que más allá de ser mi compañera de tesis fue un apoyo incondicional y una hermana que la carrera me regaló. A la profe Liliana y al profe Humberto por su acompañamiento y la confianza que depositaron en mí, por brindarme la oportunidad de crecer académicamente y como persona bajo sus enseñanzas, por ser mis padres adoptivos a lo largo de este bonito proceso de aprendizaje.

Por último, a esa niña que soñó con ser ingeniera química, se esforzó y dio lo mejor de ella para alcanzarlo, hoy le digo que con perseverancia y disciplina, lo logró.

Yely Tatiana Cruz Castro

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos la oportunidad y darnos las herramientas para formarnos como profesionales.

A la escuela de Ingeniería Química y a sus docentes por ser nuestros guías, compartirnos sus conocimientos y aportar en nuestra formación profesional.

A la Profe Liliana y al profe Humberto, quienes confiaron en nuestras capacidades para el desarrollo de este proyecto, por estar siempre presentes brindándonos apoyo y por sus palabras de motivación.

A Alex, por su acompañamiento y apoyo incondicional, sus sugerencias constructivas, su compromiso con nuestro crecimiento académico, su paciencia y generosidad al compartirnos sus conocimientos, tiempo y esfuerzo para guiarnos en el buen desarrollo de nuestro proyecto de grado.

A don Guillermo, Eduardo y Wilson, por facilitarnos los implementos y guiarnos con su conocimiento.

Al Profe Nelson y José, por abrirnos las puertas del invernadero para desarrollar la experimentación de nuestra tesis, su disposición para ayudarnos y por guiarnos en una disciplina nueva para nosotras como lo fue la biología.

A Eduard, Sebastián, Jesús y Joiner nuestros compañeros del laboratorio que cada vez que necesitamos de su ayuda estuvieron dispuestos a colaborarnos.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	13
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2. Estado del arte y marco conceptual.....	17
2.1. Biochar.....	17
2.2 Biochar en la Co-DA	17
2.3 Digeridos como fertilizantes.....	18
3. Metodología	20
3.1 Caracterización del digerido	20
<i>3.1.1 Caracterización fisicoquímica.</i>	<i>21</i>
<i>3.1.2 Caracterización bioquímica.</i>	<i>22</i>
<i>3.1.3 Caracterización microbiológica.</i>	<i>23</i>
3.2 Evaluación el desarrollo vegetal del cultivo	23
<i>3.2.1 Establecimiento del cultivo.....</i>	<i>24</i>
<i>3.2.2 Diseño del plan de fertilización.</i>	<i>24</i>
<i>3.2.3 Monitoreo de variables en el cultivo.....</i>	<i>27</i>
3.3 Estudio de caso para la valorización del digerido.	28
4. Resultados.....	28
4.1 Calidad del digerido.....	28

4.1.1	<i>Caracterización fisicoquímica y bioquímica del digerido</i>	28
4.1.2	<i>Caracterización Microbiológica del digerido.</i>	31
	<i>Matriz de evaluación del digerido</i>	32
4.2	Evaluación del desarrollo vegetal del cultivo	35
4.2.1	<i>Plan de fertilización</i>	36
4.2.2	<i>Monitoreo del cultivo</i>	37
4.3	Caso de estudio para la valorización del digerido	42
4.3.1	<i>Descripción del entorno</i>	42
4.3.2	<i>Proceso de digestión anaerobia en la finca</i>	43
4.3.3	<i>Estrategia de valorización del digerido</i>	43
4.3.4	<i>Impacto económico del modelo de economía circular</i>	51
	Referencias Bibliográficas	54
	Apéndices	66

Lista de Tablas

Tabla 1: Características del biodigestor	21
Tabla 2: Métodos analíticos para la determinación de nutrientes en el digerido.....	22
Tabla 3: Métodos analíticos para la determinación de metales pesados en el digerido	22
Tabla 4: Método y técnicas para la caracterización microbiológica del digerido.....	23
Tabla 5: Requerimientos nutricionales del cultivo de lechuga romana	26
Tabla 6: Metales pesados en el digerido obtenido de la DA de EB y LS suplementada con BC .	31
Tabla 7: Microbiología del digerido obtenido de la DA de EB y LS suplementada con BC	32
Tabla 8: Matriz de evaluación de calidad del digerido obtenido de la DA de EB y LS suplementada con BC	33
Tabla 9: Valorización económica de los nutrientes del digerido	51

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Índice de germinación.....	36
Figura 2. Evidencia fotográfica del monitoreo del desarrollo vegetal del cultivo de lechuga romana (Lactuca Sativa var. longifolia).....	37
Figura 3. Desarrollo vegetal cultivo de lechuga romana (Lactuca Sativa var. longifolia)	39
Figura 4. Clorofila total cultivo de lechuga romana (Lactuca Sativa var. longifolia).....	40
Figura 5. Propuesta de un modelo de economía circular para la gestión del digerido	44
Figura 6. Diagrama estabilización del digerido	45
Figura 7. Distribución del contenido de nutrientes del digerido luego de la separación sólido-líquido	48

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Diagrama de establecimiento del cultivo	66
Apéndice B. Certificados ponencia red colombiana de semilleros de investigación REDCOLSI	67
Apéndice C. Plan de fertilización cultivo de lechuga romana	71
Apéndice D. Resultados pruebas experimentales de sedimentación	72

Glosario

AME: Actividad metanogénica específica

BC: biochar

CE: Conductividad eléctrica

CoDA: Co-digestión anaerobia

DMSO: dimetilsulfóxido

DQO: demanda química de oxígeno

EB: estiércol bovino

GEI: gases de efecto invernadero

LS: lactosuero

PBMr: Potencial de biometanización residual

ST: solidos totales

SV: solidos volátiles

TRH: tiempo de residencia hidráulico

VCO: velocidad de carga orgánica

Resumen

Título: Potencial fertilizante del digerido obtenido a partir de la co-digestión anaerobia de estiércol bovino y lactosuero suplementada con biochar*

Autor: Cirley Luzdari Borrero Alfaro y Yely Tatiana Cruz Castro**

Palabras Clave: Digerido, Estiércol bovino, Lactosuero, Fertirriego, Lechuga.

Descripción: Los digeridos anaerobios se caracterizan por ser ricos en calcio, nitrógeno, fósforo, potasio y otros nutrientes. Por su composición suelen ser utilizados en la agricultura como enmienda o fertilizante. Sin embargo, su uso indiscriminado tiene impactos negativos sobre el medio ambiente. El objetivo de la investigación fue evaluar el potencial fertilizante del digerido obtenido a partir de la co-digestión anaerobia de estiércol bovino y lactosuero suplementada con biochar de madera de pino. El digerido se caracterizó de acuerdo con sus propiedades fisicoquímicas, bioquímicas y microbiológicas, y se evaluó su potencial uso como fertilizante. Adicionalmente, se determinó su potencial fertilizante en un cultivo de lechuga romana comparándolo con la urea. En las plantas de lechuga se evaluó la biomasa seca de las hojas, el área foliar y el contenido total de clorofila. Con estos resultados, se planteó un sistema para la gestión y valorización de un digerido producido en un biodigestor suplementado con biochar, instalado en una finca bajo condiciones psicófilas. El digerido se caracterizó por una baja concentración de nutrientes, ausencia de microorganismos patógenos y bajo contenido de metales. El digerido no clasifica como un fertilizante líquido, sin embargo, puede reemplazar parcialmente a los fertilizantes comerciales. Sin embargo, en el cultivo de lechuga, las plantas fertilizadas con el digerido presentaron rendimientos en biomasa seca (35%) similar al obtenido en las plantas fertilizadas con urea (39%). Se estima que el digerido obtenido en el biodigestor a escala rural puede fertilizar un área de 180 m² para el cultivo de lechuga. La estrategia planteada para la valorización del digerido obtenido a escala real puede garantizar su uso seguro e integral en la finca.

*Trabajo de Grado.

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Humberto Escalante Hernández, PhD en Ingeniería Química. Codirectora: Liliana del Pilar Castro Molano, PhD en Ingeniería Química. Codirector: Alexander Muñoz Muñoz, Ingeniero Químico.

Abstract

Title: Fertilizing potential of the digest obtained from the anaerobic co-digestion of bovine manure and whey supplemented with biochar*

Author(s): Cirley Luzdari Borrero Alfaro and Yely Tatiana Cruz Castro**

Key words: Digestate, Cattle manure, Cheese whey, Fertigation, Lettuce.

Description: Anaerobic digestates are rich in calcium, nitrogen, phosphorus, potassium and other nutrients. Due to their composition, they are often used in agriculture as an amendment or fertilizer. However, its indiscriminate use has negative impacts on the environment. The aim of this research was to evaluate the fertilizer potential of the digestate obtained from the anaerobic co-digestion of cattle manure and cheese whey supplemented with pine wood biochar. The digestate was characterized according to its physicochemical, biochemical and microbiological properties, and its potential use as a fertilizer was assessed in a romaine lettuce crop. In lettuce plants, dry leaf biomass, leaf area and total chlorophyll content were evaluated. With these results, a system was proposed for the management and valorization of a digestate produced in a biodigester supplemented with biochar, installed on a farm under psychrophilic conditions. The digestate was characterized by a low concentration of nutrients, absence of pathogenic microorganisms, and low metal content. Digestate does not qualify as a liquid fertilizer, however it can partially replace commercial fertilizers. In a lettuce crop, plants fertilized with the digestate showed yields in dry biomass weight (35%) similar to those obtained in plants fertilized with urea (39%). It is estimated that the digestate obtained in the biodigester on a rural scale can fertilize an area of 180 m² for lettuce crop. The strategy proposed for the valorization of the digestate obtained on a real scale can guarantee its safe and comprehensive use on the farm.

* Degree Work.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Humberto Escalante Hernández, PhD in Chemical Engineering. Codirector: Liliana del Pilar Castro Molano, PhD in Chemical Engineering. Codirector: Alexander Muñoz Muñoz, Chemical Engineer.

Introducción

En los últimos años los precios de los fertilizantes inorgánicos han aumentado un 162% comparado con el promedio pre-pandemia (2017-2019) (World Bank, 2021). Este incremento se relaciona con los altos precios del gas natural, fuente para la obtención de productos nitrogenados (Granados & González, 2022). Según datos del Banco Mundial, Colombia es uno de los países que más fertilizante aplica por hectárea. Para el año 2021 se reportó un consumo de 615.3 kg de fertilizante por hectárea de tierras cultivables, un valor aproximadamente 5 veces mayor que el promedio mundial (World Bank, 2021).

Los fertilizantes inorgánicos aumentan significativamente el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, el uso inadecuado de fertilizantes inorgánicos puede alterar los entornos naturales debido a: i) la lixiviación de nutrientes por exceso de fertilización, el nitrógeno disuelto en forma de nitrato (NO_3^-) se convierte en el contaminante más común de las aguas subterráneas ii) el agotamiento del suelo a causa de la acidificación, por el aumento de la pérdida de trazas de nutrientes y liberación de metales pesados (Germain & Lemieux, 2001) y iii) las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI); se estima que son aproximadamente el 2,4% de las emisiones las que se derivan del uso de fertilizantes nitrogenados (Mikula et al., 2023).

Como alternativas para reducir los altos costos en la producción agrícola y mitigar el efecto ambiental negativo del uso de fertilizantes inorgánicos, se ha estudiado la aplicación de fuentes de nitrógeno orgánico en busca de una agricultura sostenible (Ortiz-Liévana et al., 2023). Dentro de las diversas fuentes de nitrógeno orgánico utilizadas se encuentran el compost, el humus de lombriz, el estiércol animal, las harinas de origen animal y vegetal, las cenizas de materia orgánica, entre otros. La transición de nitrógeno inorgánico a orgánico permite la valorización de residuos,

como el digerido obtenido en procesos de digestión y co-digestión anaerobia (CoDA) que se convierte en una alternativa viable y disponible de nutrientes (Mikula et al., 2023).

Los digeridos anaerobios contienen un porcentaje de materia orgánica que no ha sido completamente degradada durante el proceso de CoDA y presentan una elevada carga microbiana (Guilayn et al., 2019). Debido a su composición rica en carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P) y otros nutrientes, los digeridos se utilizan en la agricultura para recuperar suelos estériles y aumentar el rendimiento de los cultivos. Los estudios realizados se han enfocado en determinar el potencial fertilizante de digeridos, tomando en cuenta su forma de liberación de nutrientes, aporte a las plantas, efectos sobre la estructura del suelo y el medio ambiente. En la mayoría de los casos, se ha determinado que es necesario estabilizar el digerido (Kovačić et al., 2022) y establecer un plan de fertilización que garantice su uso sostenible.

El uso del digerido en la agricultura debe ser controlado para evitar la sobrefertilización y la contaminación de los ecosistemas (Bernal Calderón, 2011). Esto se debe a que, en los sistemas agrícolas, su uso puede ocasionar distintos problemas. En los suelos provoca su agotamiento por la presencia de materia orgánica soluble a causa de la concentración de nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) y ácidos grasos volátiles (AGVs); en los sistemas acuáticos, causan eutrofización por la lixiviación de nutrientes (Haraldsen et al., 2011). Además, la acumulación de materia orgánica que no se degrada durante el proceso de CoDA puede aumentar las emisiones de metano hacia la atmósfera (Cucina et al., 2018).

Se han explorado alternativas del uso del digerido con otros materiales orgánicos, como el biochar (BC) para aumentar la eficiencia de su uso en sistemas agrícolas. Dentro de las alternativas exploradas se encuentra la mezcla del digerido con el BC antes de su aplicación al suelo. Se ha reportado que el potencial fertilizante incrementa con respecto a usar digerido o BC por separado

(Ronga et al., 2020), debido a que sus propiedades se complementan con las del BC mejorando la estructura del suelo, la estimulación de la actividad microbiana y la retención de nutrientes y agua (Vithanage et al., 2017). Otra alternativa es el uso de BC como soporte dentro los biodigestores anaerobios, con el fin de aumentar la eficiencia del proceso de digestión. Como caso particular, en el municipio Cáchira en Norte de Santander, se instaló un biodigestor tubular de bajo costo, que opera bajo condiciones psicrófilicas. El digestor trata una mezcla de EB y LS y se suplementó con BC de madera de pino. El digerido obtenido es usado de manera indiscriminada en cultivos y se desconoce su calidad y potencial fertilizante. Los estudios realizados sobre digeridos derivados de procesos de DA suplementada con BC han reportado el BC favorece la biodisponibilidad y el equilibrio de nutrientes y minerales traza en la matriz del digerido (Lee et al., 2021; Shen et al., 2015). Sin embargo, estos estudios son limitados y no existe información sobre el potencial fertilizante de los digeridos obtenidos de estos procesos. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar el potencial fertilizante del digerido obtenido de la CoDA de EB y LS suplementada con BC bajo condiciones psicrófilicas.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el potencial fertilizante del digerido obtenido a partir de la co-digestión anaeróbica de estiércol bovino y lactosuero suplementada con biochar de madera de pino.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar la calidad del digerido obtenido en la co-digestión anaerobia de estiércol bovino y lactosuero suplementada con biochar.

Evaluar el efecto del digerido obtenido de la co-digestión anaeróbica de estiércol bovino y lactosuero suplementada con biochar sobre el desarrollo vegetal del cultivo de lechuga romana (*Lactuca Sativa* var. *longifolia*).

Analizar un caso de estudio a escala rural real para el aprovechamiento del digerido obtenido en la co-digestión anaerobia de estiércol bovino y lactosuero suplementada con biochar como fertilizante.

2. Estado del arte y marco conceptual

2.1. Biochar

El biochar es un material carbonoso, poroso y estable al carbono, generado mediante la degradación térmica de material orgánico, en presencia de una cantidad parcial o total de oxígeno (Escalante Rebolledo et al., 2016). Entre sus propiedades más importantes se destacan su capacidad de adsorción, área de superficie activa, distribución uniforme de poros y estabilidad mecánica lo que lo hacen adecuado para su uso en catálisis, electroquímica, eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos, agricultura y producción de energía. (Akhil et al., 2021)

En la agricultura, el biochar disminuye la salinidad del suelo promoviendo la producción en los cultivos; además, tiene la capacidad de alterar sus propiedades fisiológicas y químicas del suelo, facilitando la adsorción de materia orgánica y nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio (Akhil et al., 2021). Plaimart et al., (2021) evaluaron los efectos del biochar de cáscara de coco en el suelo. Los resultados indicaron que el biochar inhibe la lixiviación de nitratos y reduce las bacterias nitrificantes en el suelo entre un 74 y 83% en la capa superior del suelo y un 73% en las capas más profundas del suelo. Por su parte, Ronga et al., (2020) evaluaron el efecto que tienen los tratamientos de digerido líquido (LD), digerido con biochar (LD+BC), digerido granulado (PD), biochar solo (BC) y el control (sin fertilizar) sobre un cultivo de tomate. Los resultados mostraron que las plantas fertilizadas con (LD +BC) alcanzaron un rendimiento máximo del 34% seguido por las plantas tratadas con BC (30%), PD (26%) y LD (20%) con respecto al control.

2.2 Biochar en la CoDA

La utilización del biochar en la CoDA aporta al mejoramiento de la tasa de recuperación del proceso debido a la inhibición inducida por el sustrato (Sunyoto et al., 2016) y fomenta la

biodisponibilidad de los nutrientes en la matriz del digerido (Lee et al., 2021) gracias a la interacción que ocurre entre los grupos funcionales del BC con los compuestos orgánicos e inorgánicos que se encuentran en el sustrato (Tan et al., 2015).

Shen et al., (2015) reportaron que la adición de biochar de rastrojo de maíz en biorreactores batch de 600 mL en condiciones termofílicas (55 °C) facilitó la eliminación del CO₂ hasta en un 86.3% y aumentó el contenido promedio de CH₄ en el biogás hasta en un 42.4% en comparación con el digestor de control. La adición de biochar mejoró el rendimiento de metano (7%), la tasa constante de biometanización (81%) y la tasa máxima de producción de metano (27.6%). En cuanto al digerido causó un incremento de Ca, Fe, Mg y K de hasta 134%, 95%, 183% y 4435%, respectivamente. Por otra parte, Johnravindar et al., (2021) estudiaron la adición de diferentes tipos de biochar y lodos de depuradora en reactores batch, a condiciones mesofílicas (35 °C) reportando que la suplementación con biochar de gránulos de paja de miscanthus generó un digerido enriquecido en K (14 450 mg/kg), Mg (24.87 mg/kg), Ca (208.7 mg/kg) y Fe (15 296 mg/kg), lo que representó un aumento aproximado del 100% respecto al control.

2.3 Digeridos como fertilizantes

El aprovechamiento del digerido como biofertilizante debido a su contenido de nutrientes es una de las aplicaciones más prometedoras para minimizar y evitar impactos directos en el medio ambiente y en la salud humana, además de mejorar la rentabilidad económica de los sistemas de producción de biogás (Lamolinará et al., 2022).

Rodriguez L et al., (2011), basándose en los resultados de su estudio sobre el rendimiento del digerido en un cultivo de maíz, encontraron un aumento en el crecimiento del follaje de maíz del 70% y peso de las raíces del 100%, respecto a aditivos como el biochar y un cultivo de

microorganismos nativos derivados de suelos fértiles. Sin embargo Cucina et al., (2021) refutan esta afirmación al reportar que el digerido de EB podría reemplazar solo parcialmente el fertilizante mineral, debido a su baja concentración de nutrientes. Por otro lado Iocoli et al., (2020) evaluaron el potencial fertilizante de un digerido obtenido de la CoDA de EB en un cultivo de lechuga; encontrando que la aplicación fraccionada del digerido tenía una mayor eficiencia en el uso del nitrógeno, obteniendo un rendimiento en peso del 74% en un suelo franco y del 86% en suelo franco arenoso.

Conocer el potencial fertilizante de los digeridos es importante para garantizar su uso eficiente en los cultivos, asegurando que las plantas reciban los nutrientes requeridos, mejorando la fertilidad del suelo y permitiendo una producción sostenible a mediano y largo plazo. Por ende, este trabajo contribuye a la determinación del potencial fertilizante del digerido obtenido de la CoDA de EB y LS suplementado con BC de madera de pino.

3. Metodología

El desarrollo de este trabajo se llevó a cabo en tres etapas metodológicas. En la primera, se operó un reactor tubular a escala laboratorio, operado bajo condiciones psicrofílicas, para obtener un digerido, cuya calidad se evaluó mediante la caracterización fisicoquímica, bioquímica y microbiológica, de acuerdo con las normas colombianas vigentes. En la segunda etapa, se evaluó el efecto del digerido obtenido de la DA de EB +LS suplementada con BC sobre el cultivo de lechuga romana (*Lactuca Sativa* var. *Longifolia*) y se comparó con un fertilizante comercial (Urea), analizando el desarrollo vegetal de las plantas. Por último, se realizó el análisis de un caso de estudio para el tratamiento y uso del efluente como fertilizante de un biodigestor (tubular a escala real en un sector rural), suplementado con biochar de madera de pino. Este estudio se llevó a cabo teniendo en cuenta los datos de entrada y salida de un biodigestor ubicado en una zona rural del departamento de Norte de Santander, para crear un modelo de economía circular.

3.1 Caracterización del digerido

El digerido se obtuvo de un reactor anaerobio a escala laboratorio que opera en semicontinuo y trata una mezcla de EB y LS, suplementado con 150 g de BC de madera de pino. Después de dos tiempos de retención hidráulico (TRH) en el biodigestor, se recolectó el digerido y se almacenó a una temperatura de 4 °C para su posterior análisis. Los parámetros operacionales y características del reactor se encuentran en la tabla 1.

Tabla 1*Parámetros operacionales y de diseño del biodigestor.*

Parámetro	Unidad	Valor
Longitud	m	1
Ancho	m	0,1
Volumen total	L	8
Volumen de operación	L	5
Tiempo de retención hidráulico (THR)	días	75
Temperatura	°C	25
Velocidad de carga orgánica (VCO)	kg SV/m ³ *día	1
Mezcla de EB y LS (3:7)	mL/día	66
Material del biodigestor		PVC

3.1.1 Caracterización fisicoquímica.

Se realizó la cuantificación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y la demanda química de oxígeno (DQO), según los protocolos 2540 A, 2540 E y 5220 D propuestos por la APHA, 2017, respectivamente. El pH y la conductividad eléctrica (CE) se midieron utilizando un electrodo de vidrio y una sonda de conductividad. El contenido de nutrientes y metales pesados se determinó de acuerdo con los métodos presentados en las tablas 2 y 3, respectivamente.

Tabla 2*Métodos analíticos para la determinación de nutrientes en el digerido*

Parámetro	Método
N total	Digestión Kjeldahl Titrimétrico/NTC370
P total	Espectrofotométrico/NTC 234
K total	Absorción atómica/NTC 5167

Tabla 3*Métodos analíticos para la determinación de metales pesados*

Parámetro	Método
Pb	SM 3111B
Cd	SM 3111B
As	SM 3114C
Ni	SM 3111B
Hg	SM 3112B
Cu	SM 3111B
Zn	SM 3111B
Se	SM 3114C

3.1.2 Caracterización bioquímica.

La actividad metanogénica específica (AME) y el potencial de biometanización residual (PBMr) del digerido se determinaron usando la técnica de desplazamiento alcalino con una solución de NaOH (0,5 M) según los protocolos reportados por Holliger et al. (2016) y Astals et al. (2015), respectivamente.

3.1.3 Caracterización microbiológica.

La caracterización en términos microbiológicos incluyo *Salmonella Spp*, Huevos de Helminto, Coliformes fecales y totales. La tabla 4 muestra los métodos utilizados para la caracterización microbiológica.

Tabla 4

Método y técnicas para la caracterización microbiológica del digerido

Parámetro	Método
Coliformes totales	NTC 4458
Coliformes fecales	NTC 4458
<i>E. coli</i>	NTC 4458
<i>Salmonella Spp</i>	NTC 4574
<i>Pseudomonas Spp</i>	NTC 4574
Huevos de helminto totales	NTC 4574

La caracterización del digerido se evaluó en una matriz para establecer su calidad, tomando como referencia los valores establecidos por la NTC 5167 (2004), los estándares de calidad para la reutilización de aguas residuales, establecidos por la organización mundial de la salud (OMS, 2015) y los requisitos para el uso como agua de riego(Resolucion 1207, 2014) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente).

3.2 Evaluación del desarrollo vegetal del cultivo

El efecto del digerido sobre el desarrollo vegetal se evaluó en el cultivo de lechuga romana (*Lactuca Sativa* var. *longifolia*). La lechuga es una planta herbácea anual, rica en vitaminas y minerales (calcio, hierro, vitamina A, ácido ascórbico, entre otras). Dentro de las condiciones agroecológicas del cultivo, los suelos ideales son de tipo franco, franco arenoso o franco arcilloso. Se recomienda mantener una humedad relativa del 60-80% debido al sistema radicular, que es

reducido en comparación con la biomasa área, resultando en baja tolerancia a los periodos de sequía. Además, para asegurar un óptimo desarrollo del follaje en cuanto a volumen, peso y calidad, es necesario contar con una alta luminosidad (Jaramillo et al., 2014).

3.2.1 Establecimiento del cultivo.

Las plantas de lechuga romana (*Lactuca Sativa* var. *longifolia*) se cultivaron en la Unidad de Crecimiento y Ecofisiología Vegetal- UCEV de la Escuela de Biología, en la Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga, Santander (7°7'31.4" N 73°7.188' O, 960 msnm, 17 – 27.6 °C). Inicialmente, se germinaron las semillas de origen orgánico (ANASAC, resolución ICA No. 003974 de 19 oct de 2011), en semilleros de plástico con alveolos de 4 cm de profundidad. La germinación tuvo una duración de 10 días, luego las plántulas tuvieron 14 días de crecimiento en los semilleros, se trasplantaron a macetas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. En el apéndice A, se ilustra el proceso de establecimiento de cultivo que se realizó para esta experimentación.

Para evaluar el efecto del digerido sobre el desarrollo vegetal, se usaron un total de 54 unidades experimentales. Se establecieron 3 tratamientos, cada uno con 18 réplicas. Los tratamientos usados fueron: T1 (digerido de la co-digestión anaerobia de EB y LS suplementada con biochar), T2 (Urea) y T3 (agua de riego sin adición de fertilizante).

3.2.2 Diseño del plan de fertilización.

Para aplicar el digerido en el cultivo se usó el principio de la fertiirrigación, que consiste en aplicar los fertilizantes disueltos en el agua de riego mediante un sistema de riego localizado (goteo o microaspersión) (Ferreya et al., 2005). En este estudio, se realizó de forma intermitente y sin uso de aspersores, debido a que el contenido de sólidos en la matriz del digerido causaba

obstrucción de los orificios. Por otra parte, el fertirriego permite contrarrestar la baja eficiencia del uso de fertilizantes, que se le atribuye a procesos como: volatilización, lixiviación y desnitrificación (Ramos-Lara et al., 2002).

Para evaluar el comportamiento fitotóxico del digerido con las semillas se realizó el análisis del índice de germinación (IG), siguiendo el protocolo descrito por Tiquia (2000). El objetivo del IG es establecer la mejor dilución del digerido para evitar efectos fitotóxicos sobre el cultivo. Adicionalmente, para determinar el rango de diluciones optimas se tomó como referencia la Resolución 1207 (2014) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente). La normativa establece los criterios de calidad que debe cumplir el agua de riego en cuanto a parámetros físicos, químicos, microbiológicos, iones, metales, metaloides, no metales, entre otros. Para este caso se hizo énfasis en los valores de la conductividad eléctrica (CE) permitidos por la norma para usar el digerido como agua de riego, para evitar problemas de exceso de sales que tienen efecto negativo tanto en el desarrollo vegetal de las plantas, como la actividad de los microorganismos del suelo (Cremona & Enríquez, 2020).

La dosificación del digerido en el cultivo se realizó mediante un plan de fertilización que permitiera satisfacer las necesidades nutricionales de las plantas y a su vez evitara los efectos negativos del digerido sobre el sistema suelo-planta. El cálculo de la dosis de aplicación se puede hacer en base a distintos criterios, como: balance de nutrientes, criterio de macronutrientes (nitrógeno (N), fósforo (P) o potasio (K)), contenido de materia orgánica o tomando como referencia los metales pesados (Bernal Calderón, 2011). Para este caso de estudio, se tomó como base el criterio del nitrógeno, debido a que este nutriente es el que presenta mayor influencia sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos hortícolas como la lechuga. Para establecer el plan de

fertilización bajo el criterio del nitrógeno se hace en función de los requerimientos nutricionales de la lechuga (Tabla 5) y la concentración de nutrientes que tiene el tratamiento (T1 o T2).

Tabla 5

Requerimientos nutricionales del cultivo de lechuga romana

Lechuga Romana (<i>Lactuca Sativa</i> var. <i>longifolia</i>)		
Nitrógeno (N)	Fósforo (P)	Potasio (K)
130 kg/ha	40 kg/ha	205 kg/ha

Nota. Adaptado de (Bernal Calderón, 2011)

A partir del requerimiento de nitrógeno en la lechuga y del contenido de este macronutriente en el digerido, con la Ec.1 se determinó la cantidad necesaria para cada planta a lo largo de todo el ciclo de cultivo.

$$V = \frac{R \cdot A}{C} \tag{Ec.1}$$

Donde,

V= Volumen de digerido por maceta $\left[\frac{\text{ml de digerido}}{\text{maceta}} \right]$

R= Requerimiento de nitrógeno $\left[\frac{\text{mg de N}}{\text{cm}^2} \right]$

A= Área de la maceta $\left[\frac{\text{cm}^2}{\text{maceta}} \right]$

C= Contenido de nitrógeno en el digerido $\left[\frac{\text{mg de N}}{\text{ml de digerido}} \right]$

Además de establecer la cantidad de digerido a aplicar por maceta, se tomó en cuenta la cantidad de N que absorbe la lechuga en sus diferentes etapas de desarrollo vegetal. Abu-Rayyan et al (2004) indican que la fertilización de lechuga debe realizarse en las siguientes proporciones: i) 25% del requerimiento total de nitrógeno a las 3 semanas después del trasplante, ii) 25% a las 5

semanas después del trasplante y iii) 50% a las 7 semanas después del trasplante. Con estos datos se estableció el plan de fertilización que se siguió a lo largo de los 60 días de experimentación.

3.2.3 Monitoreo de variables en el cultivo

Durante el ciclo del cultivo se realizaron 3 monitoreos con el fin de evaluar en distintas etapas el desarrollo vegetal de las plantas. Las variables que se monitorearon fueron: la masa fresca y seca de biomasa aérea (hojas), área foliar y contenido de clorofila. En cada monitoreo se seleccionaron 6 unidades experimentales por tratamiento para realizar las mediciones.

La masa fresca de las hojas se determinó por gravimetría usando una balanza. El área foliar se estimó usando el software de procesamiento de imágenes digitales *ImageJ*. Posteriormente las hojas se llevaban al horno durante 72 horas a 70°C, luego se pesaban y así se calculaba su masa seca.

La clorofila total (clorofila a + clorofila b) de las hojas se extrajo usando dimetilsulfóxido (DMSO) como solvente. Primero, se tomaron discos foliares de 1 cm de diámetro en cada planta y se agregaban a 7 ml de DMSO. La extracción se realizó durante dos horas en un baño termostático a 65 °C. El contenido de clorofila total se determinó mediante espectrofotometría a longitudes de onda de 665 nm y 649 nm. Tomando en cuenta que el solvente usado fue DMSO, para el cálculo de la clorofila total se usaron las siguientes ecuaciones:

Para Clorofila a expresada en unidades de µg/ml

$$Chla = 12,47 * Absorbancia(665nm) - 3,62 * Absorbancia(649nm) \quad (Ec.2)$$

Para Clorofila b expresada en unidades de µg/ml

$$Chlb = 25,06 * Absorbancia(649) - 6,50 * Absorbancia(665) \quad (Ec.3)$$

Nota. Adaptado de (Del Valle Tascón et al., 1994.)

3.3 Estudio de caso para la valorización del digerido.

Se realizó un estudio de caso para la valorización del digerido obtenido en un biodigestor tubular, instalado en la finca Santa Rosa, ubicada en el municipio de Cáchira, del Departamento de Norte de Santander (7°44'47"N 73°03'04"O). El biodigestor gestiona los residuos pecuarios y agroindustriales que se producen diariamente en la finca, es alimentado con una relación (en base a sólidos volátiles) de EB (30%), LS (70%) y suplementado con BC de madera de pino. El biodigestor produce aproximadamente 65 L/día de digerido, es aplicado de manera indiscriminada a cultivos y praderas sin tratamiento previo, lo que implica un riesgo de contaminación al suelo, liberación de GEI y propagación de patógenos.

Inicialmente, se planteó un sistema de estabilización para el digerido, con el fin de garantizar inocuidad y minimizar los impactos negativos. Además, se propuso la separación de fases del digerido para aprovechar de una manera eficiente sus nutrientes. El sistema de gestión y valorización del digerido tiene el propósito de cerrar el proceso y convertirlo en un modelo de economía circular, con el objetivo de aprovechar la totalidad de residuos de la finca, en busca de una granja sostenible.

4. Resultados

4.1 Calidad del digerido

4.1.1 Caracterización fisicoquímica y bioquímica del digerido

4.1.1.1 pH y CE. El digerido presentó un pH ligeramente alcalino (8.13), similar a valores reportados (7.5 – 8.7) para digeridos obtenidos en procesos de DA de estiércol animal (Albuquerque et al., 2012). La aplicación del digerido obtenido, ya sea como biofertilizante o enmienda, no alteraría el pH del suelo, dado que es compatible con los niveles de pH de suelos

agrícolas (Solé-Bundó et al., 2017). Sin embargo, la elevada conductividad eléctrica del digerido (11720 $\mu\text{S}/\text{cm}$) podría tener efectos negativos en el suelo como la salinización, dispersión de coloides y pérdida de su estructura; además de inhibir el crecimiento de las plantas (Daliakopoulos et al., 2016).

4.1.1.1.2 Materia orgánica. La concentración de materia orgánica en los digeridos es un indicador de su estabilidad y puede ser cuantificada por medio de la relación SV/ST y la concentración de DQO. La aplicación de digeridos con elevado contenido de materia orgánica podría tener efectos negativos sobre el suelo, como el desarrollo de condiciones anóxicas, provocando procesos de fermentación y efectos fitotóxicos. (Albuquerque et al., 2012; Cucina et al., 2018; Di Maria et al., 2014). Para digeridos obtenidos en condiciones mesofílicas, se han reportado relaciones SV/ST entre el 40% y 50% (Castro et al., 2017; Garfí et al., 2011; Lansing et al., 2008). El digerido de este estudio presentó una relación SV/ST de 69.6 %, que es similar a lo reportado por Cucina et al., 2021 para un digerido obtenido de la CoDA de EB y LS sin suplementación con biochar, bajo condiciones psicrófilicas. Respecto a la DQO, el digerido tiene una concentración de 29,278 g DQO/L. No obstante, el contenido de materia orgánica fácilmente biodegradable, expresada en términos de DQO soluble, representó aproximadamente el 2% de la DQO total. Lo anterior está relacionado con el bajo PBM_r del digerido (0,014 $\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$). Se infiere que el biochar, al favorecer la degradación de materia orgánica dentro del digestor para la producción de metano, permitió obtener un digerido estable (Jaimes-Estévez et al., 2023).

4.1.1.1.3 Actividad metanogénica específica (AME). La Actividad Metanogénica Específica (AME) permite cuantificar la máxima capacidad de producción de metano por el grupo de microorganismos presente en lodos anaerobios (Lozada & Pérez, 2010). El digerido obtenido de la CoDA de EB y LS suplementada con biochar se caracterizó por una alta actividad

metanogénica (0,04 g DQO/g SV*día). Por lo anterior, el digerido podría ser usado como inóculo o ser recirculado a otros procesos de DA, debido a su capacidad para promover la producción de biogás.

4.1.1.1.4 Nutrientes y metales pesados. El contenido de N total, P total (P_2O_5) y K total en el digerido fue de 1.19 g/L, 0.097 g/L y 0.81 g/L, respectivamente. Contenidos de nutrientes similares se reportaron para un digerido obtenido de la CoDA de EB y LS una concentración de N total de 0.68 g/L, P total (P_2O_5) de 0.67 g/L y K total de 1.2 g/L. Se infiere que el mayor contenido de nutrientes en el digerido se debe al aporte nutricional por parte del biochar. Se ha reportado que la suplementación de biochar en reactores tipo batch bajo condiciones mesófilas y termófilas favorece la obtención un digerido enriquecido en nutrientes como N, P y K con un gran potencial para ser utilizado en la agricultura (Shen et al., 2015).

La concentración de metales pesados en el digerido suplementado con biochar se presenta en la tabla 6. Los resultados muestran que la matriz de digerido se caracteriza por un bajo contenido de metales, similar a valores reportados para digeridos derivados de la DA de estiércol animal y cultivos energéticos (Tambone et al., 2017). Sin embargo, la concentración de Cu y Zn en el digerido fue elevada y al ser aplicado al suelo, podría provocar menores rendimientos en los procesos biogeoquímicos, pérdida de fertilidad de los suelos agrícolas y daños en el ecosistema, afectando el crecimiento y desarrollo de las plantas (De et al., 2010; Prieto Méndez et al., 2009).

Tabla 6

Metales pesados en el digerido obtenido de la DA de EB y LS suplementada con BC.

Parámetro	Unidad	Valor
As	ppm	0.012
Cd	ppm	0.05
Hg	ppm	0.004
Ni	ppm	< 0.1
Pb	ppm	0.44
Zn	ppm	8.61
Cu	ppm	2.12
Se	ppm	0.01

4.1.2 Caracterización Microbiológica del digerido.

El contenido de microorganismos patógenos en un digerido está relacionado principalmente con el sustrato alimentado al digestor, además de parámetros de operación como la temperatura y el TRH. La tabla 7 presenta la caracterización microbiológica del digerido. El digerido se caracterizó por la ausencia de coliformes totales, coliformes fecales, *Salmonella spp.*, *E. coli* y huevos de helmintos. Se infiere que, debido al alto TRH del digestor y a la naturaleza del sustrato, los patógenos se inactivaron. Por lo anterior, el digerido se puede considerar higiénicamente seguro, y puede ser aplicado en cultivos, sin representar un riesgo para la transferencia de patógenos a la cadena alimenticia.

Tabla 7*Microbiología del digerido obtenido de la DA de EB y LS suplementada con BC*

Parámetro	Unidad	Valor
Coliformes totales	UFC/mL	<1*
Coliformes fecales	UFC/mL	<1*
<i>Salmonella sp</i>	Salmonella/25 g	Ausencia
<i>E.coli</i>	UFC/mL	Ausencia
Huevos de Helminto	Huevos/4 mL	<1*
<i>Pseudomonas spp</i>	UFC/mL	4,90E+05

*Límite de detección del método

Matriz de evaluación del digerido

En la tabla 8 se presenta la matriz de calidad del digerido para su uso en la agricultura, teniendo en cuenta parámetros fisicoquímicos, macronutrientes y metales pesados.

Tabla 8

Matriz de evaluación de calidad del digerido obtenido de la DA de EB y LS suplementada con BC

Parámetro	Unidad	Valor	Limite recomendado NTC 5167*	Limite recomendado OMS**	Limite recomendado resolución 1207***	Comentarios	
Fisicoquímicos	SV/ST	%	69.6	-	-	-	El digerido representaría un riesgo para su uso en la agricultura debido a la elevada concentración de DQO y CE. Se recomienda diluirlo antes de su aplicación para evitar efectos fitotóxicos.
	DQO	g/L	29,278	-	-	<200	
	pH	-	8.14	-	-	6.0-9.0	
	CE	μS/cm	11,720	-	-	<1500	
Microbiológicos	Coliformes totales	UFC/mL	<1	>1000	-	<1	El digerido no representa un riesgo de contaminación en la cadena alimenticia, ni problemas de salud pública.
	Coliformes fecales	UFC/mL	<1	Ausente	-	<1	
	<i>Salmonella sp</i>	Salmonella/25 g	Ausencia	Ausente/25 g	-	-	
	<i>E.coli</i>	UFC/mL	Ausencia	Ausente	10 ³ UFC/100 mL	-	

	Huevos de Helminto	Huevos/4 mL	<1	< 1	<1	<1	
Macronutrientes	N total	g/L	1.19	>15	-	-	
	P total (P ₂ O ₅)	g/L	0.097	>15	-	-	El digerido solo puede reemplazar parcialmente a los fertilizantes inorgánicos.
	K total (K ₂ O)	g/L	0.81	>15	-	-	
Metales pesados	As	ppm	0.012	41	<0.1	<0.1	El digerido no excede los límites de metales establecidos para su uso como fertilizante. Sin embargo, presenta un alto contenido de Cu y Zn. Se recomienda diluirlo antes de su aplicación para evitar efectos negativos en el suelo.
	Cd	ppm	0.05	39	<0.1	<0.05	
	Hg	ppm	0.004	17	<0.002	<0.02	
	Ni	ppm	< 0.1	420	<0.2	<0.2	
	Pb	ppm	0.44	300	<5	<5	
	Cu	ppm	2.12	-	<0.2	<1	
	Zn	ppm	8.61	-	<2	<3	
	Se	ppm	0.01	-	<0.02	<0.02	

*Requisitos para considerar un producto como fertilizante líquido (NTC 5167, 2004)

**Requisitos para el uso de aguas residuales en la agricultura, organización mundial de la salud (OMS, 2015)

*** Requisitos para el uso de aguas residuales como agua de riego (Resolución 1207, 2014)

La calidad del digerido se evaluó según los requerimientos establecidos por la normativa colombiana para el uso de productos orgánicos en la agricultura (NTC 5167 y resolución 1207 de MinAmbiente) y los estándares de calidad para la reutilización de aguas residuales en la agricultura establecidos por la organización mundial de la salud (OMS, 2015). De acuerdo con la NTC 5167, el digerido no puede clasificarse como fertilizante debido a su baja concentración de nutrientes. Sin embargo, puede sustituir de manera parcial a los fertilizantes convencionales. Desde el punto de vista microbiológico el digerido se considera higiénicamente seguro de acuerdo con la normativa para su uso como fertilizante o agua de riego.

El contenido de metales no excede los límites establecidos para su uso como fertilizante. No obstante, el alto contenido de Cu y Zn en el digerido podría causar efectos tóxicos en las plantas. Adicionalmente, la CE es elevada con el valor recomendado para su uso como agua de riego, debido a que la altas concentración de sales causan alteraciones fisiológicas en los cultivos. El digerido presenta ciertas características que lo hacen apto para su aplicación en la agricultura, como su bajo nivel de metales pesados y ausencia de microorganismos patógenos, sin embargo, su uso se ve limitado por la alta CE y elevada concentración de Cu y Zn. Estos resultados sugieren la importancia de analizar cuidadosamente las características del digerido y garantizar su calidad para su uso sostenible y seguro en la agricultura.

Los resultados de esta matriz fueron presentados en la red colombiana de semilleros de investigación (REDCOLSI) XVIII encuentro departamental de semilleros, logrando una calificación de 99/100 en la fase departamental. Este puntaje nos permitió clasificar a la fase nacional (XXVI encuentro nacional y XX encuentro internacional de semilleros de investigación de semilleros de investigación ENISI 2023) realizada en la ciudad de Cartagena. En el apéndice B se encuentran los certificados de las ponencias realizadas en estos encuentros.

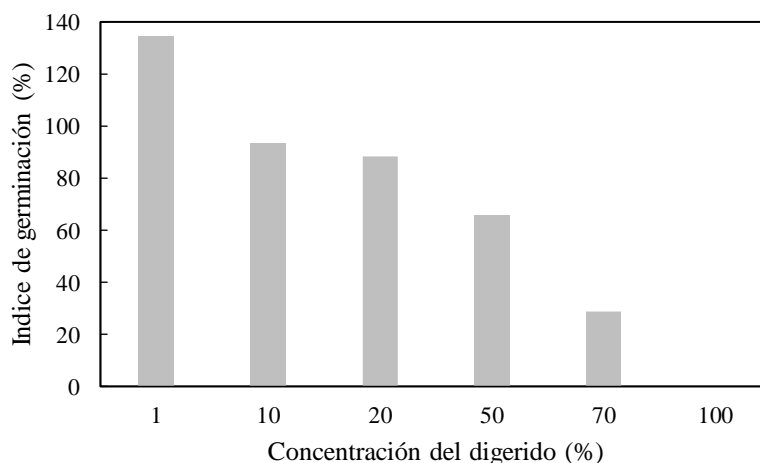
4.2 Evaluación del desarrollo vegetal del cultivo

4.2.1 Plan de fertilización

Generalmente, los digeridos deben ser diluidos antes de su aplicación al cultivo para evitar efectos fitotóxicos. La dilución de los digeridos se evalúa mediante la fitotoxicidad en ensayos de germinación. Zuconi (1981) estableció que valores de IG $\geq 80\%$ indican que no hay sustancias fitotóxicas o que están en baja concentración y no ocasionan efectos negativos sobre el desarrollo de las semillas. La figura 1 ilustra los resultados de IG para diferentes diluciones del digerido.

Figura 11.

Índice de germinación



De acuerdo con los resultados presentados en la figura 2, las diluciones de digerido superiores al 50% causaron efectos negativos en la germinación y desarrollo radicular de las semillas. Por lo tanto, el digerido fue diluido en concentraciones entre 9-13 %, para evitar problemas de desarrollo vegetal en el cultivo de lechuga. Estas diluciones garantizaron que la CE del digerido estuviera dentro de los límites establecidos ($< 1500 \mu\text{S}/\text{cm.}$) por la Resolución 1207 (2014) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) para el uso como agua de riego en la agricultura.

Según la concentración de nitrógeno en el digerido y los requerimientos nutricionales de la lechuga, se calculó la cantidad total necesaria de digerido por cada maceta. Adicionalmente, se determinó la cantidad a aplicar de acuerdo con las diluciones viables para su uso y el porcentaje de nitrógeno que la planta absorbe en cada etapa de crecimiento. En el apéndice C se presenta el plan de fertilización donde se establecen los volúmenes de digerido y agua que se usaron en cada fertirriego, que se realizó aproximadamente cada tres días. Para el caso de T3 (control) se consideró solamente agua de riego.

4.2.2 Monitoreo del cultivo

Luego de realizar el trasplante se iniciaron los 60 días de ciclo de cultivo, en las siguientes imágenes se evidencia el desarrollo vegetal a nivel general en cada uno de los muestreos realizados:

Figura 2.

Evidencia fotográfica del monitoreo del desarrollo vegetal del cultivo de lechuga romana (Lactuca Sativa var. longifolia). (a) 25 días después del trasplante (b) 40 días después del trasplante (c) 60 días después del trasplante

a.



b.

T1 (Digerido)



T2 (Urea)



T3 (Blanco)

**c.**

T1 (Digerido)



T2 (Urea)



T3 (Blanco)



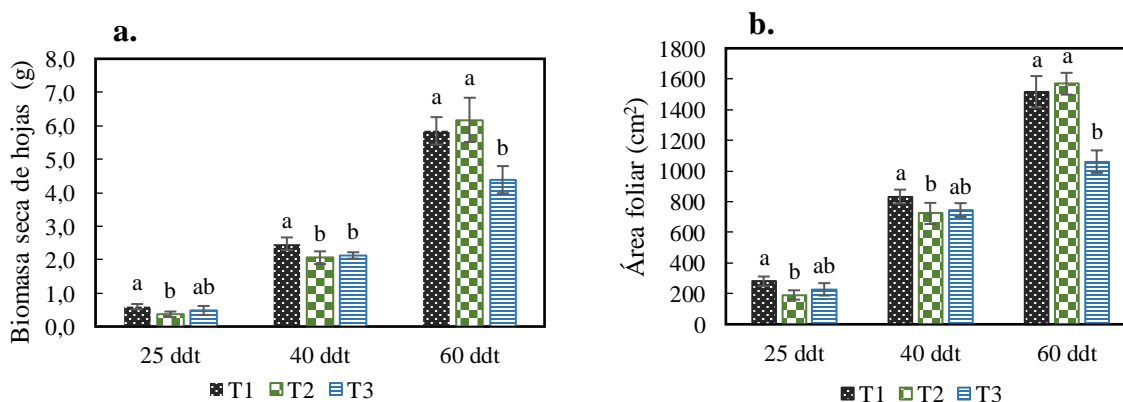
4.2.2.1 Masa seca y área foliar de la biomasa aérea. La masa seca de las plantas relaciona la actividad fotosintética y las cualidades estructurales en su interior (Sánchez, 2010). Por otra parte, el área foliar es la superficie en la que se intercambia energía y materia entre una planta y la atmósfera. Estas dos variables son clave para monitorear el crecimiento de las plantas y están relacionadas directamente con la tasa fotosintética, la evapotranspiración, el desarrollo vegetativo, la absorción de agua y nutrientes como el nitrógeno (Valverde & Arias, 2020). El nitrógeno

desempeña un papel importante en el crecimiento de las plantas, debido a que participa de manera activa en procesos como la división y elongación celular, (Marín et al., 2018) además estimula la fotosíntesis y favorece el crecimiento vegetativo, por lo que tiene incidencia directa en el cambio de la biomasa seca de las plantas, mostrando cambios significativos en las distintas etapas de desarrollo del cultivo (Britto & Kronzucker, 2002).

En la figura 3 se presenta la variación del peso seco y área foliar de la biomasa aérea en las diferentes etapas del cultivo de lechuga romana (*Lactuca Sativa* var. *longifolia*).

Figura 3

Desarrollo vegetal cultivo de lechuga romana (Lactuca Sativa var. longifolia). (a) Biomasa seca de hojas (b) Área foliar cultivo de lechuga. T1: digerido (EB+LS+BC), T2: urea, T3: control (agua)



Durante las primeras dos etapas del cultivo se observaron diferencias significativas en la biomasa seca ($p > 0.05$) entre los tratamientos T1 y T2, siendo mayor la biomasa seca en T1. Una tendencia similar se observó con respecto al área foliar de las plantas para los tratamientos analizados. Debido a la naturaleza del digerido, la disponibilidad de los nutrientes (especialmente

nitrógeno, fosforo y potasio) favoreció el rápido crecimiento de las plantas (Laird et al., 2010). Lo anterior, se traduce en un mayor proceso de fotosíntesis de las plantas, permitiendo que la sabia se transformara en hoja de una manera eficiente (Andrada & Di Barbaro, 2018), por lo tanto, se estimuló su crecimiento y acumulación de biomasa. Por otro lado, la urea al ser un fertilizante de mineralización lenta retarda la disponibilidad inmediata de nutrientes para la planta (Andreu et al., 2006). Lo anterior se evidencia al final del ciclo del cultivo, al observar que no existe una diferencia significativa tanto para la biomasa seca como para el área foliar entre el rendimiento del digerido (T1) y el de la urea (T2).

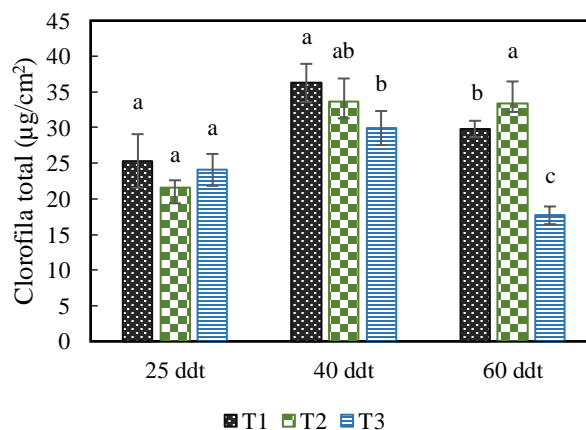
El digerido presentó un rendimiento en biomasa seca (35%), superior a los reportados para fertilizantes orgánicos foliares tradicionales en un cultivo de lechuga, como el té de compost (25.3%) y el té de lombricompost (19.5%); además, el rendimiento del área foliar también fue superior al del té de compost (2.2%) y té de lombricompost del (11%) (Bonillo et al., 2015). Estos resultados sugieren que el digerido es una opción viable para usar en la agricultura, debido a su eficiencia, tanto de producción de biomasa seca como en el desarrollo del área foliar, destacando el buen desarrollo y crecimiento de la planta.

4.2.2.2 clorofila total. La clorofila es un pigmento sensible a las condiciones de crecimiento de las plantas (Caldwell & Britz, 2006) y es la responsable de la absorción de la luz que impulsa la fotosíntesis (Yan et al., 2021). El contenido de clorofila refleja el estado nutricional de la planta y está relacionado principalmente con el nitrógeno, que es necesario para su síntesis y está involucrado en el proceso de fotosíntesis (Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 2010).

En la figura 4 se muestran las variaciones de clorofila a lo largo del ciclo de cultivo.

Figura 4

Clorofila total cultivo de lechuga romana (Lactuca Sativa var. longifolia).



Durante la primera etapa del cultivo de lechuga no se evidenciaron diferencias significativas en el contenido de clorofila total para todos los tratamientos ($P>0.05$). A lo largo de la segunda etapa del cultivo, las plantas no fertilizadas presentaron el menor contenido de clorofila comparadas con las fertilizadas con digerido (T1) y urea (T2). Aunque el contenido de clorofila en las plantas del tratamiento control aumentó un 20% debido al crecimiento propio de la planta y al aporte nutricional del suelo, este incremento fue significativamente menor comparado con el digerido ($P>0.05$). El nitrógeno aportado por el digerido permitió que las plantas mejoraran su actividad fotosintética y, por ende, su capacidad para aprovechar la luz solar y convertirla en clorofila. Como resultado, el contenido de clorofila en las plantas fertilizadas con digerido (T1) aumentó, permitiéndoles un buen desarrollo fisiológico (Lara-Herrera et al., 2023).

El bajo contenido de clorofila en la fase final del cultivo se debió a que el cultivo finalizó su ciclo de crecimiento vegetativo y entró en el proceso reproductivo (floración) y de senescencia (envejecimiento), ocasionando una disminución en el metabolismo de la planta. Cuando la planta entró en esta etapa, el mecanismo fotosintético se redujo, debido a que la absorción de nitrógeno por parte de la planta se destinó para la producción de biomasa y no para la producción de

pigmentos (De Lima Vasconcelos et al., 2014). Sin embargo, el contenido de clorofila en el tratamiento T2 no disminuyó en comparación con los tratamientos T1 y T3. Lo anterior, se atribuye a la naturaleza de la urea, permitiendo que las plantas absorban nitrógeno por una mayor cantidad de tiempo. (Morales-Morales et al., 2019)

El contenido de clorofila total en el cultivo de lechuga tratado con digerido (T2) fue de 30 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 1.5 veces mayor que los reportados para abonos orgánicos aplicados a un cultivo de lechuga Batavia como purines de cerdo (19 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$), fango de depuradora (20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) y compost (19 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) (Alvarado Anddy et al., 2020). Este resultado indica que el digerido potenció el proceso de fotosíntesis en el cultivo de lechuga, manifestándose en una elevada tasa de crecimiento y un mejor desarrollo vegetal, obteniendo un mayor rendimiento y calidad del cultivo.

4.3 Caso de estudio para la valorización del digerido

4.3.1 Descripción del entorno

El caso de estudio se llevó a cabo en la finca Santa Rosa, ubicada en el municipio de CÁCHIRA, Norte de Santander ($7^{\circ}44'47''\text{N}$ $73^{\circ}03'04''\text{O}$). Debido al relieve del municipio, se pueden encontrar diversos pisos térmicos que abarcan desde el clima cálido hasta el páramo, con temperaturas que oscilan entre los 3°C y los 35°C , con valores medios de 18°C . La agricultura es la actividad económica más importante, con una amplia variedad de cultivos como el café, maíz, frijol, tomate, cacao, plátano, yuca, caña panelera, frutas y legumbres. En cuanto a la producción pecuaria, se destaca la cría de bovinos, porcinos, ovinos y caprinos. Además, en los últimos años la producción agroindustrial se ha desarrollado en torno a la producción de queso y yogur (Alcaldía de CÁCHIRA de Norte de Santander, 2018).

La finca Santa Rosa tiene como base de su economía el cultivo de hortalizas y la explotación bovina, destinando una y siete hectáreas para cada actividad, respectivamente. La finca

cuenta con 13 cabezas de ganado bovino, doble propósito, que se alimentan en praderas de pasto estrella y guinea mombasa. Los bovinos realizan rotaciones periódicas para permitir la recuperación de la pradera entre cada ciclo de pastoreo. En la hectárea destinada a la producción agrícola se cultivan hortalizas, dentro de ellas la lechuga, que es el cultivo seleccionado para el caso de estudio.

4.3.2 Proceso de digestión anaerobia en la finca

Diariamente en la finca Santa Rosa se producen 80 litros de leche, que se destinan a la producción de queso (1.5 ton/año). De este proceso se obtienen, como residuo, alrededor de 120 m³ de lactosuero anualmente. El lactosuero es un residuo que la finca gestiona a través del proceso de DA junto con el estiércol que producen diariamente los bovinos (221 kg).

El proceso de DA se lleva a cabo en un biodigestor a escala doméstica (8 m³), suplementado al inicio de su operación con BC de madera de pino. El biodigestor se alimenta diariamente con 69 L de una mezcla de EB:LS, en proporción 30:70 en base sólidos volátiles. La producción específica de metano del biodigestor es de 0,37 Nm³CH₄/kgSV*d. El biogás es usado para la cocción de alimentos y calefacción en la finca. Por otra parte, se producen aproximadamente 65 L/día de digerido, que es aplicado al suelo de manera indiscriminada, sin tener un plan para su gestión que permita mitigar los efectos negativos causados al medio ambiente.

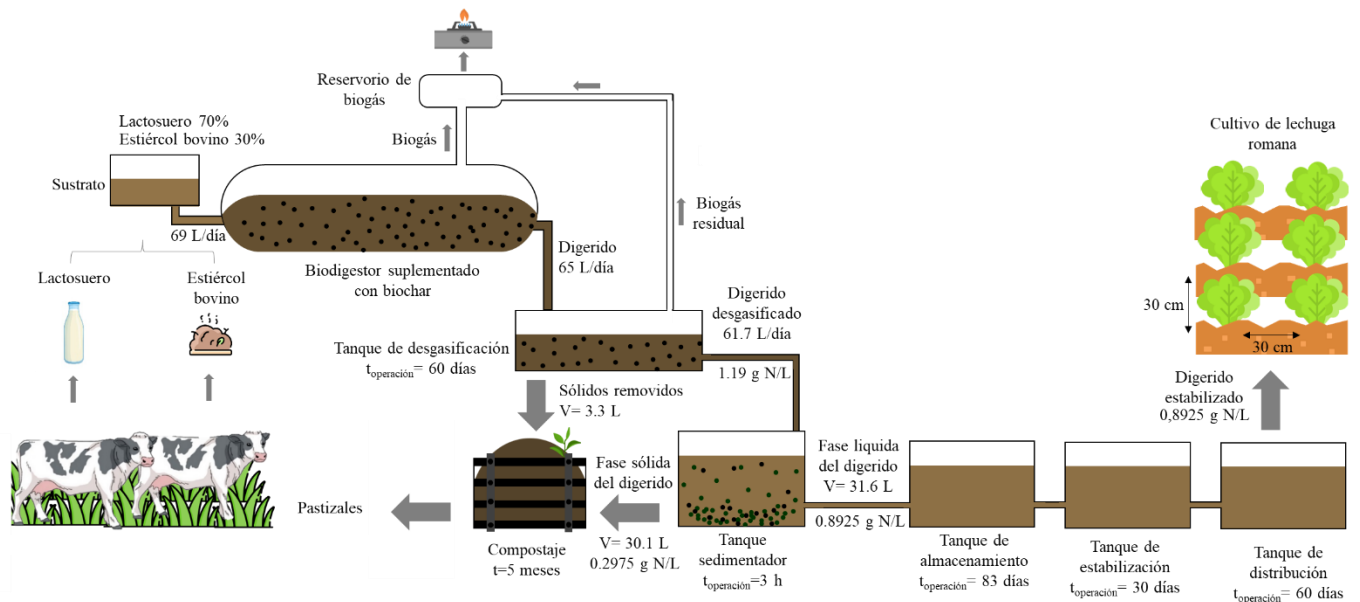
4.3.3 Estrategia de valorización del digerido

En la finca Santa Rosa, actualmente el digerido es aplicado sin una estrategia para su valorización. En la figura 5 se ilustra una propuesta modelo de economía circular para aprovechar la totalidad del digerido de una manera sostenible. En el modelo planteado, el digerido pasaría por un proceso de estabilización, destinando una parte como fertirriego para cultivos hortícolas y la otra como compost para praderas de pastoreo. La estrategia no solo busca una gestión más eficiente

del digerido, sino que también promueve prácticas agrícolas sostenibles y contribuye a cerrar el ciclo de generación de residuos en la finca.

Figura 5

Propuesta de un modelo de economía circular para la gestión del digerido



La lechuga, al ser un producto de consumo directo y fresco puede presentar riesgos para la salud pública, debido a que actúa como portador de bacterias patógenas, teniendo la capacidad de ocasionar enfermedades transmitidas por alimentos (ETA) (Sobol, 2011). Por lo general, los riesgos microbiológicos tienden a aumentar debido a prácticas inadecuadas a lo largo de la cadena de producción en los sistemas agrícolas. Uno de los factores más críticos es la falta de cumplimiento de las normas de calidad del agua destinada para riego (León & Arce, 2011). En este sentido, si el digerido producido en el biodigestor de la finca Santa Rosa se usa en cultivos, es necesario estabilizarlo a antes de su aplicación.

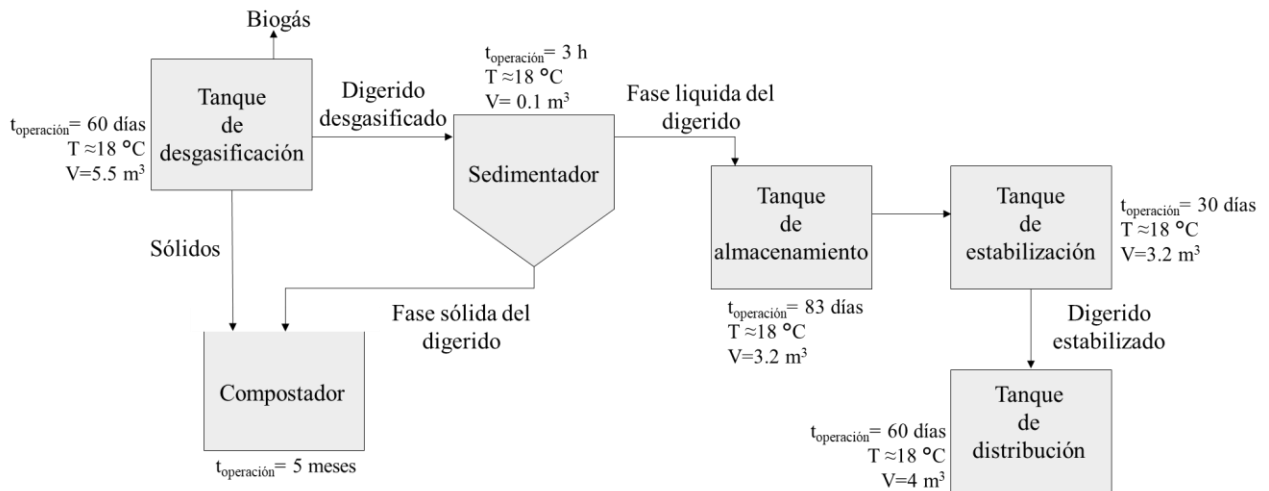
En los objetivos previos, el enfoque se hizo únicamente en determinar el potencial fertilizante del digerido, cultivando las lechugas con propósitos experimentales y sin considerar

ningún post tratamiento el digerido. No obstante, en la finca Santa Rosa, las lechugas son destinadas al consumo humano, lo que implica la necesidad de garantizar su inocuidad y calidad.

En la figura 6, se ilustra el proceso de tratamiento sugerido para el digerido.

Figura 6

Diagrama para la estabilización del digerido



El proceso de acondicionamiento del digerido estaría constituido por las siguientes etapas:

4.3.3.1 Tanque de desgasificación

El tanque de desgasificación sería la primera etapa del proceso de estabilización y su objetivo sería evitar la producción continua de biogás por parte del digerido en las fases posteriores. La importancia de esta fase se relaciona con el metano residual y su potencial de calentamiento global 23 veces mayor que el dióxido de carbono (Hansen et al., 2006). Generalmente, los biodigestores solo degradan aproximadamente entre el 75% y el 85% de la materia orgánica alimentada, por lo que el residual del sustrato (alrededor del 15% al 25%) podría seguir degradándose durante el proceso de estabilización y almacenamiento (Davidsson et al., 2007).

La desgasificación consiste en almacenar el digerido en un sistema cerrado, manteniendo las condiciones anaeróbicas, para la producción del biogás residual. El tanque de desgasificación actuaría como un biodigestor secundario con un tiempo de retención hidráulica de 60 días, donde ingresaría el efluente diario del biodigestor (65 L). Inicialmente, la unidad de desgasificación se llenaría hasta el 60% del volumen de operación, aproximadamente 3900 L, luego arrancaría la operación en continuo. Se asume que al igual que en un biodigestor el efluente del desgasificador contine alrededor del 95 % del afluente que ingresó (Lamolinara et al., 2022b). En este caso, cuando la operación esté en fase continua, entrarían 65 L /día de digerido y se obtendrían 61.7 L/día de digerido desgasificado que pasaría a la unidad de separación de fases.

La fracción sólida que se sedimenta sería llevada a la unidad de compostaje para continuar con su tratamiento, mientras que el biogás residual se transportaría por tubería hacia el reservorio, donde se mezclaría con la corriente de salida de biogás del biodigestor, para luego ser destinado a calefacción y cocción de alimentos en la finca.

4.3.3.2 Sedimentador

En la etapa de sedimentación, el objetivo sería retirar sólidos que aún se encuentran en el digerido. Diversos estudios han demostrado que la separación sólido-líquido del digerido mejora la eficiencia en la utilización de nutrientes después de su aplicación en sistemas agrícolas (Möller & Müller, 2012). Luego de la separación líquido-sólido, el contenido en nutrientes se distribuye en cada una de las fases. La fase sólida resultante comparte similitudes con el estiércol de animales, pero con contenidos altamente disponibles de nitrógeno orgánico y fósforo. Integrar esta fase sólida en los suelos promueve la producción de humus y sustituye las cantidades de fósforo extraídas por la biomasa cultivada. Por otro lado, la fase líquida del digerido, caracterizada por bajos contenidos de materia seca, puede emplearse mediante fertirriego. Esta fase líquida es un

fertilizante con elevado contenido de nitrógeno inorgánico y potasio, comparable con los fertilizantes minerales comerciales (Döhler et al., 2010; Fernández, 2016; Möller & Müller, 2012; Pascual et al., 2011).

Existen diversas alternativas usadas para la separación de las fases líquida y sólida de digeridos como filtración lenta de arena, la sedimentación, la centrifugación y el uso de tamices estáticos y prensas de tornillo. Para el caso de estudio se tiene como requisito que sea un mecanismo de fácil instalación, dado que la finca se encuentra ubicada en una zona rural de difícil acceso. Además, debe ser una tecnología económica, pues se busca que al igual que el biodigestor, el sistema de post tratamiento para la estabilización cumpla con la especificación de bajo costo. De acuerdo con lo anterior, se propone usar sedimentación por gravedad para la separación de fases, debido a que es la opción más económica en cuanto a su instalación y operación (Bernal Calderón, 2011).

El principio de funcionamiento de esta unidad se basaría en el ingreso de la corriente de digerido desgasificado al sedimentador, con el fin de separar las fracciones líquida y sólida del digerido, por efecto gravitacional. Después de transcurrido el tiempo de retención se obtendría un fluido clarificado (fase líquida), que se transportaría al tanque de almacenamiento. Por otra parte, la suspensión concentrada (fase sólida) se extraería por la zona de depósito de lodos y se llevaría a la unidad de compostaje.

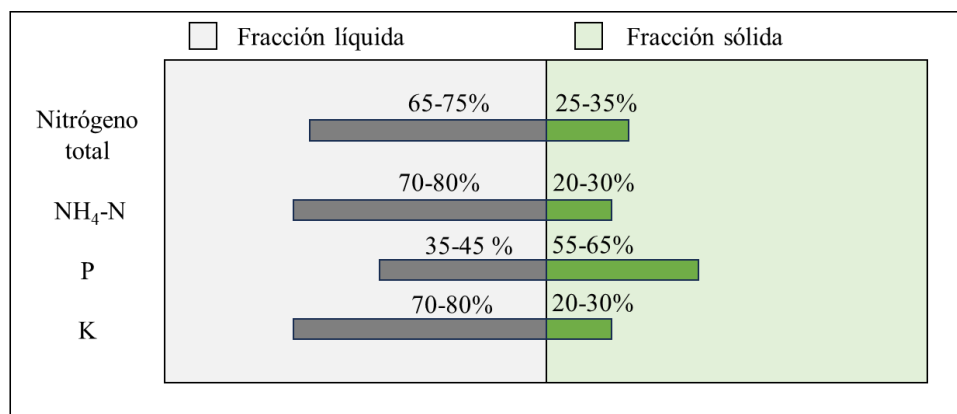
En el anexo C se tienen los resultados del ensayo que se hizo para establecer las variables de operación del proceso de sedimentación de manera experimental. Las pruebas se realizaron en el laboratorio de biotecnología de la escuela de Ingeniería Química UIS. Con base a los datos obtenidos, se seleccionó el tiempo de operación. Se realizaron ensayos con 3 tiempos de retención (3, 6 y 15 horas). Los resultados mostraron que la eficiencia en la remoción de sólidos entre los

distintos tiempos no es significativa. Por ende, se estableció que el tiempo de retención del digerido en el sedimentador sería el menor (3 horas).

Luego de la separación se obtendría la corriente de la fase líquida y sólida del digerido, con un volumen de 31.6 L y 30.1 L, respectivamente. Estos valores se calculan teniendo en cuenta los ensayos experimentales realizados en el laboratorio. En la figura 7, se ilustra la distribución de los nutrientes del digerido después de la separación sólido-líquido.

Figura 7

Distribución del contenido de nutrientes del digerido luego de la separación sólido-líquido.



Adaptado de Bauer et al. (2009) y Drosch et al. (2015)

4.3.3.3 Tanque de almacenamiento

En el tanque de almacenamiento se recolectaría la cantidad de fase líquida del digerido necesaria para cubrir el requerimiento nutricional de un ciclo de cultivo de lechuga romana. La finca destina a la producción agrícola una hectárea. En el caso de la lechuga, se dispone de un lote de 180 m², que equivale al 1.8% de la hectárea. Para cubrir las necesidades del cultivo se necesitarían aproximadamente 2622 L de digerido estabilizado, tomando en cuenta la

disponibilidad de nitrógeno en la fase líquida del digerido y el requerimiento de las 2000 plantas de lechuga que se siembra en el área de cultivo.

La recolección de la fase líquida del digerido necesaria para un ciclo de cultivo, se llevaría a cabo durante 83 días en el tanque de almacenamiento. El principio de operación de esta unidad sería controlar la actividad biológica cuando se pasa de un estado anaerobio a uno aerobio, por lo tanto, el tanque de almacenamiento no debería ser cerrado. La presencia de oxígeno en el medio inactivaría a los microorganismos que producen el biogás, pues la formación de metano ocurre en la etapa de metanogénesis por acción de las archaeas anaerobias estrictas (Aguilar, 2016).

El tanque de almacenamiento debería ser construido con materiales que eviten el riesgo de filtración y la contaminación de aguas tanto superficiales como subterráneas (Bernal Calderón, 2011; Fernández, 2016). Los tanques elaborados en hormigón y acero son los más usados, debido a su practicidad y durabilidad (Fernández, 2016). Luego de los 83 días, el volumen acumulado se llevaría al tanque de estabilización, que correspondería a la etapa final de estabilización de la fracción líquida del digerido.

4.3.3.4 Tanque de estabilización

El tanque de estabilización tendría el mismo principio de operación, características y materiales de fabricación que el tanque de almacenamiento. El objetivo en esta etapa del proceso sería inactivar a los microorganismos para la estabilización de la fase líquida del digerido. El tiempo de residencia del digerido en el del tanque sería de 30 días, para asegurar que todos los lotes que ingresarían al tanque de almacenamiento a lo largo de los 83 días tendrían como mínimo un mes de estabilización.

4.3.3.5 Tanque de distribución

La corriente de la fase líquida del digerido estabilizado se almacenaría en el tanque de distribución, para fraccionarla mediante fertirriego a lo largo del ciclo de cultivo.

4.3.3.6 Compostador

Los sólidos retirados en el tanque de desgasificación y en el sedimentador se llevarían a una unidad de compostaje, con la finalidad de aprovechar el 100% del digerido. El compostaje consiste en descomponer de manera biológica y aerobia los residuos (Flores & Carranza, 2006). Con el objetivo de estabilizar los componentes orgánicos, inactivar microorganismos patógenos y eliminar los compuestos que desprenden malos olores (Döhler et al., 2010). El compostaje debe ser aireado para mantener las condiciones aeróbicas. En el caso de la finca Santa Rosa la aireación se realizaría por volteo de la pila de compostaje, dado que metodologías como la aireación forzada son más complejas y costosas. La aireación es una variable que depende de la porosidad del medio, debido a la estructura de la matriz sólida del digerido, se recomendaría la adición de materiales estructurales (restos de poda, paja, tamo de arroz, entre otros) que favorezcan la porosidad al interior de la pila de compostaje (Bernal Calderón, 2011; Döhler et al., 2010).

En la finca Santa Rosa, se propone usar el compost en las praderas, debido a que normalmente en la finca no se fertilizan estas zonas de pastoreo. Además, la incorporación de compost, como fuente de materia orgánica estabilizada tiene un impacto positivo en la fertilidad química y física del suelo (Mosquera-Losada et al., 2007). Adicionalmente, la aplicación de fuentes de nitrógeno orgánico en suelos poco fértiles puede incrementar el rendimiento del pasto hasta tres veces (Jurgutis et al., 2021). El incremento en la producción de pasto se relaciona con la capacidad de enriquecer el suelo con materia orgánica, mejorando la retención de nutrientes y agua en comparación con los fertilizantes inorgánicos convencionales (Walsh et al., 2018). A nivel

general, se pretende aprovechar las propiedades del compost para mejorar la calidad tanto del suelo como de los pastizales, y así tener una fuente de alimento de mayor calidad para el ganado bovino.

4.3.4 Impacto económico del modelo de economía circular

Es posible establecer un precio a los nutrientes presentes en el digerido, para estimar un precio promedio. En la tabla 9 se valoriza económicamente cada uno de los componentes del digerido en su estado original, sin hacer separación sólido-líquido. Debido a que, los nutrientes se reparten entre las fases, pero manteniendo la misma concentración inicial. Los precios fueron tomados del sistema de información de precios y abastecimiento del sector agropecuario -SIPSA, para el mes de octubre del 2023 (DANE, 2023).

Tabla 9

Valorización económica de los nutrientes del digerido

Nutriente	Contenido por cada L de digerido	Precio [\$/g]	Valor económico [\$/L]
Nitrógeno (g N)	1.19	14.419	17.1586
Fósforo (g P ₂ O ₅)	0.097	3.38	0.3279
Potasio (g K ₂ O)	0.81	18.35	14.8635
Total (\$/L)			32.35
Total (\$/60 días)			126 165

Según los datos obtenidos, el digerido obtenido en el proceso de DA en la finca Santa Rosa durante 60 días tiene un precio de \$126 165. Además, la finca tendría una estrategia para la gestión del digerido, que permite mitigar los problemas medioambientales que trae su uso indiscriminado. Por otra parte, como el digerido es una fuente de nitrógeno orgánica, aporta una cantidad

significativa de materia orgánica al suelo; permitiendo enriquecer su estructura y mejorar su calidad para ciclos de cultivo posteriores. Esta estrategia forma parte de un sistema de economía circular, donde la finca consigue eliminar la generación de residuos en el proceso de digestión anaeróbica (DA). El biogás y el digerido se utilizan de manera integral para potenciar la productividad de la finca de manera sostenible.

Conclusiones

El digerido obtenido de la DA de estiércol bovino y lactosuero suplementado con biochar no cumplió con los criterios para ser clasificado como fertilizante, debido su baja concentración de nutrientes. No obstante, podría utilizarse en las diferentes actividades agrícolas, reemplazando parcialmente a los fertilizantes comerciales.

El desarrollo vegetal de las plantas de lechuga romana fertilizadas con digerido fue similar al obtenido de las fertilizadas con urea. Se obtuvieron rendimientos en biomasa (masa seca aérea) del 35% para el digerido y del 39% para la urea. Por lo tanto, el digerido se puede considerar como un sustituto de fertilizantes comerciales para cultivos hortícolas como la lechuga.

El modelo de economía circular planteado es viable en términos ambientales, dado que facilita la gestión y valorización del digerido obtenido en el proceso de DA. Este enfoque fomenta la producción sostenible cerrando ciclos productivos, para ser implementado en el marco de una granja integral autosuficiente.

Referencias Bibliográficas

- Abu-Rayyan, A., Kharawish, B. H., & Al-Ismail, K. (2004). Nitrate content in lettuce (*Lactuca sativa* L) heads in relations to plant spacing, nitrogen form and irrigation level. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(9), 931–936. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1733>
- Aguilar, G. (2016). Seguimiento en el cambio de poblaciones de microorganismos durante el tratamiento biológico combinado, anaerobio-anóxico-aerobio al tratar compuestos fenólicos. *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*.
- Akhil, D., Lakshmi, D., Kartik, A., Vo, D. V. N., Arun, J., & Gopinath, K. P. (2021). Production, characterization, activation and environmental applications of engineered biochar: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 3, pp. 2261–2297). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01167-7>
- Alburquerque, J. A., de la Fuente, C., Ferrer-Costa, A., Carrasco, L., Cegarra, J., Abad, M., & Bernal, M. P. (2012). Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. *Biomass and Bioenergy*, 40, 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.02.018>
- Alcaldía de CÁCHIRA de Norte de Santander. (2018). *Nuestro Municipio*. <https://www.cachira-nortedesantander.gov.co/Municipio/Nuestro-Municipio>.
- Alejandro Iocoli, G., María Celina Zabaloy Dra Jessica Basualdo, D., & Belen Blazquez, A. (n.d.). *UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR DIGERIDO ANAEROBICO DE ESTIERCOL BOVINO COMO SUSTITUTO DE LA FERTILIZACION SINTETICA: SU EFECTO SOBRE EL CULTIVO DE LECHUGA (Lactuca sativa L.) Docente tutor*.
- Alvarado Anddy, Carazo Nuria, & Blanco Mónica. (n.d.). *Trabajo final de grado Ingeniería Agrícola [UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH]*.

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/178013/memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Andreu J, Beltrán J, & Delgado I. (2006). *Coordinación: Fernando Orús Pueyo (Centro de Técnicas Agrarias)*.

Astals, S., Batstone, D. J., Tait, S., & Jensen, P. D. (2015). Development and validation of a rapid test for anaerobic inhibition and toxicity. *Water Research*, 81, 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.063>

Bauer, A., Mayr, H., Hopfner-Sixt, K., & Amon, T. (2009). Detailed monitoring of two biogas plants and mechanical solid–liquid separation of fermentation residues. *Journal of Biotechnology*, 142(1), 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2009.01.016>

Bernal Calderón, M. Pilar. (2011). *Guía de utilización agrícola de los materiales digeridos por biometanización*. CSIC.

Bonillo, M., Filippini M, & Lipinski V. (2015). *Rendimiento biomasa seca*. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/52669/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Britto, D. T., & Kronzucker, H. J. (2002). Review NH 4 + toxicity in higher plants: a critical review. In *J. Plant Physiol* (Vol. 159). <http://www.urbanfischer.de/journals/jpp>

Caldwell, C. R., & Britz, S. J. (2006). Effect of supplemental ultraviolet radiation on the carotenoid and chlorophyll composition of green house-grown leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(6–7), 637–644. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2005.12.016>

Castro, L., Escalante, H., Jaimes-Estévez, J., Díaz, L. J., Vecino, K., Rojas, G., & Mantilla, L. (2017). Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and

digestate quality. *Bioresource Technology*, 239, 311–317.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.035>

Corpoica. Ciencia y Tecnología Agorpecuaria. (2010).
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=449945029003>

Cremona, M., & Enriquez, A. (2020). ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO QUE CONDICIONAN SU COMPORTAMIENTO: El pH y la conductividad eléctrica. *EEA Bariloche*.

Cucina, M., Castro, L., Escalante, H., Ferrer, I., & Garfí, M. (2021). Benefits and risks of agricultural reuse of digestates from plastic tubular digesters in Colombia. *Waste Management*, 135, 220–228. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.003>

Cucina, M., Tacconi, C., Ricci, A., Pezzolla, D., Sordi, S., Zadra, C., & Gigliotti, G. (2018a). Evaluation of benefits and risks associated with the agricultural use of organic wastes of pharmaceutical origin. *Science of the Total Environment*, 613–614, 773–782.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.154>

Cucina, M., Tacconi, C., Ricci, A., Pezzolla, D., Sordi, S., Zadra, C., & Gigliotti, G. (2018b). Evaluation of benefits and risks associated with the agricultural use of organic wastes of pharmaceutical origin. *Science of the Total Environment*, 613–614, 773–782.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.154>

Daliakopoulos, I. N., Tsanis, I. K., Koutroulis, A., Kourgialas, N. N., Varouchakis, A. E., Karatzas, G. P., & Ritsema, C. J. (2016). The threat of soil salinity: A European scale review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 573, pp. 727–739). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177>

- Davidsson, Å., Gruvberger, C., Christensen, T. H., Hansen, T. L., & Jansen, J. la C. (2007). Methane yield in source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management*, 27(3), 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.02.013>
- De Lima Vasconcelos, R., De Mello Prado, R., Reyes Hernández, A., & Caione, G. (2014). *position and portion of leaf in the of chlorophyll in potato index* (Vol. 32).
- Del Valle Tascón, S., Sanz, M., Calatayud, A., & Barreno, E. (1994). COEFICIENTES DE EXTINCIÓN DE CLOROFILAS Y FEOFITINAS (a y b) EN DMSO Y ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE SUS CONCENTRACIONES. *Studia Botanica*, 13, 115–121.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE. (2023). *Sistema de información de precios (SIPSA)*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/sistema-de-informacion-de-precios-sipsa/componente-insumos-1>.
- Di Maria, F., Sordi, A., Cirulli, G., Gigliotti, G., Massaccesi, L., & Cucina, M. (2014). Co-treatment of fruit and vegetable waste in sludge digesters. An analysis of the relationship among bio-methane generation, process stability and digestate phytotoxicity. *Waste Management*, 34(9), 1603–1608. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.017>
- Döhler, H., Wulf, S., Grebe, S., Roth, S., Klages, S., & Amon, T. (2010). Calidad y utilización de digestato. In Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Ed.), *Guía sobre el Biogás Desde la producción hasta el uso* (pp. 204–219).
- Drosg, B., Fuchs, W., Al Seadi, T., Madsen, M., & Linke, B. (2015). *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing* (D. Baxter, Ed.). IEA bioenergy.
- Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., Etchevers Barra, J. D., Rebolledo, E., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., & Valtierra Pacheco D Etchevers Barra, E.

- J. (n.d.). *Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo Biocarbon (biochar) I: Nature, history, manufacture and use in soil* Autora responsable (hidalgo@colpos.mx).
- Fernández, L. (2016). Selección y dimensionado de un sistema de generación de biogás mediante digestión anaerobia de purines codigeridos con glicerina. *Universidad de Cádiz*.
- Ferreya, R., Sellés, G., Ahumada, R., Maldonado, P., Gil, P., & Barrera, C. (2005). Manejo del riego localizado y fertirrigación. *Boletín INIA*, 126, 56.
- Flores, M., & Carranza, C. (2006). Estudio comparativo para la elaboración de compost por técnica manual. *Revista Del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, 9(17), 75–84.
- Garfí, M., Gelman, P., Comas, J., Carrasco, W., & Ferrer, I. (2011). Agricultural reuse of the digestate from low-cost tubular digesters in rural Andean communities. *Waste Management*, 31(12), 2584–2589. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.08.007>
- Germain, D., & Lemieux, G. (2001). *Ramial Chipped Wood: the Clue to a Sustainable Fertile Soil East-Sullivan Mine Site View project*. <http://forestgeomat.ffg.ulaval.ca/brf/>
- Granados, L., & González, J. (2022). Situación actual y perspectivas del mercado de fertilizantes en el mundo. *Boletín El Palmicultor*, 605, 8–9.
- Group, P., & Bank, W. (2021). *Commodity Markets Outlook. October 2021*.
- Guilayn, F., Jimenez, J., Martel, J. L., Rouez, M., Crest, M., & Patureau, D. (2019). First fertilizing-value typology of digestates: A decision-making tool for regulation. *Waste Management*, 86, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.032>
- Hansen, T. L., Sommer, S. G., Gabriel, S., & Christensen, T. H. (2006). Methane Production during Storage of Anaerobically Digested Municipal Organic Waste. *Journal of Environmental Quality*, 35(3), 830–836. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0239>

- Haraldsen, T. K., Andersen, U., Krogstad, T., & Sørheim, R. (2011). Liquid digestate from anaerobic treatment of source-separated household waste as fertilizer to barley. *Waste Management and Research*, 29(12), 1271–1276. <https://doi.org/10.1177/0734242X11411975>
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., de Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J.-C., de Laclos, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515–2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- Jaimes-Estévez, J., Martí-Herrero, J., Poggio, D., Zafra, G., Gómez, K., Escalante, H., & Castro, L. (2023). The role of biochar in the psychrophilic anaerobic digestion: Effects on kinetics, acids metabolism, and microbial population. *Bioresource Technology Reports*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101566>
- Jaramillo, J., Aguilar, P., Espitia, E., Tamayo, P., Argüello, O., & Guzmán, M. (2014). Modelo tecnológico para el cultivo de lechuga en el Oriente Antioqueño. *Corpoica*.
- Johnravindar, D., Wong, J. W. C., Chakraborty, D., Bodedla, G., & Kaur, G. (2021). Food waste and sewage sludge co-digestion amended with different biochars: VFA kinetics, methane yield and digestate quality assessment. *Journal of Environmental Management*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112457>
- Jurgutis, L., Šlepetienė, A., Šlepetys, J., & Cesevičienė, J. (2021). Towards a full circular economy in biogas plants: Sustainable management of digestate for growing biomass feedstocks and use as biofertilizer. *Energies*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/en14144272>

- Kovačić, Đ., Lončarić, Z., Jović, J., Samac, D., Popović, B., & Tišma, M. (2022). Digestate Management and Processing Practices: A Review. *Applied Sciences*, *12*(18), 9216. <https://doi.org/10.3390/app12189216>
- Lamolinará, B., Pérez-Martínez, A., Guardado-Yordi, E., Guillén Fiallos, C., Diéguez-Santana, K., & Ruiz-Mercado, G. J. (2022a). Anaerobic digestate management, environmental impacts, and techno-economic challenges. In *Waste Management* (Vol. 140, pp. 14–30). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.035>
- Lamolinará, B., Pérez-Martínez, A., Guardado-Yordi, E., Guillén Fiallos, C., Diéguez-Santana, K., & Ruiz-Mercado, G. J. (2022b). Anaerobic digestate management, environmental impacts, and techno-economic challenges. In *Waste Management* (Vol. 140, pp. 14–30). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.035>
- Lansing, S., Viquez, J., Martínez, H., Botero, R., & Martin, J. (2008). Quantifying electricity generation and waste transformations in a low-cost, plug-flow anaerobic digestion system. *Ecological Engineering*, *34*(4), 332–348. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.09.002>
- Lara-Herrera, A., de la Rosa-Rodríguez, R., & Trejo-Téllez, L. I. (2023). Lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and yield under five proportions of macronutrients in nutrient solution. *Bioagro*, *35*(2), 113–122. <https://doi.org/10.51372/bioagro352.4>
- Lee, M. S., Urgan-Demirtas, M., Shen, Y., Zumpf, C., Anderson, E. K., Rayburn, A. L., & Lee, D. K. (2021a). Effect of digestate and digestate supplemented with biochar on switchgrass growth and chemical composition. *Biomass and Bioenergy*, *144*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105928>
- Lee, M. S., Urgan-Demirtas, M., Shen, Y., Zumpf, C., Anderson, E. K., Rayburn, A. L., & Lee, D. K. (2021b). Effect of digestate and digestate supplemented with biochar on switchgrass

growth and chemical composition. *Biomass and Bioenergy*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105928>

León, G., & Arce, B. (2011). RIESGOS MICROBIOLÓGICOS EN LA PRODUCCIÓN DE HORTALIZAS EN ÁREAS URBANAS Y PERIURBANAS EN COLOMBIA. In J. Peña & E. Fernández (Eds.), *RIESGOS MICROBIANOS EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS FRESCOS EN ÁREAS URBANAS Y PERIURBANAS DE AMÉRICA LATINA* (pp. 31–54).

Lozada, P. T., & Pérez, A. (n.d.). 5 *Facultad de Ingeniería «EIDENAR» pp. ACTIVIDAD METANOGENICA ESPECÍFICA: UNA HERRAMIENTA DE CONTROL Y OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES.*

Mikula, K., Trzaska, K., Skrzypczak, D., Izydorczyk, G., Mironiuk, M., Gil, F., Samoraj, M., Witek-Krowiak, A., & Chojnacka, K. (2023). Efficient anaerobic digestate valorization: Nutrient recovery strategy for enhancing soil fertility in arid agricultural regions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110522>

Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), 242–257. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100085>

Morales-Morales, E. J., Rubí-Arriaga, M., Antonio López-Sandoval, J., Roberto Martínez-Campos, Á., & Jesús Morales-Rosales, E. (2019). Urea (NBPT) an alternative in the nitrogen fertilization of annual crops. In *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas* (Vol. 10).

NTC 5167 Apartes 1.1 Norma Para Abonos Organicos y Fertilizantes _ TOAZ.INFO. (n.d.).

OMS. (2015). *Estandares de calidad para la reutilización de aguas residuales establecidos por la organización mundial de la salud.*

- Ortiz-Liébana, N., Zotti, M., Barquero, M., & González-Andrés, F. (2023). Biochar + AD exerts a biostimulant effect in the yield of horticultural crops and improves bacterial biodiversity and species richness in the rhizosphere. *Scientia Horticulturae*, 321, 112277. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112277>
- Pascual, A., Ruiz, B., Gómez, P., Flotats, X., & Fernández, B. (2011). *Situación y potencial de generación de biogás. Estudio Técnico PER 2011-2020*.
- Plaimart, J., Acharya, K., Mroziak, W., Davenport, R. J., Vinitnantharat, S., & Werner, D. (2021). Coconut husk biochar amendment enhances nutrient retention by suppressing nitrification in agricultural soil following anaerobic digestate application. *Environmental Pollution*, 268. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115684>
- Productividad, A., & Agroproductividad. (n.d.). *UN CICLO ANUAL VARIATIONS IN THE FOLIAR AREA AND CONCENTRATIONS OF CHLOROPHYLLS AND ESSENTIAL NUTRIENTS IN LEAVES OF ROBUSTA COFFEE (Coffea canephora P.) DURING AN ANNUAL CYCLE* (Vol. 11).
- Ramos-Lara, C., Alcántar-González, G., Galvis-Spinola, A., Peña-Lomelí, A., & Martínez-Garza, A. (n.d.). *Nitrogen Use Efficiency in Husk Tomato Under Fertigation*.
- Resolucion 1207, Resolución 1207 (2014).
- Rodriguez L, Salazar P, & Preston T R. (2011). *Effect of a culture of “native” micro-organisms, biochar and biodigester effluent on the growth of maize in acid soils*.
- Ronga, D., Caradonia, F., Parisi, M., Bezzi, G., Parisi, B., Allesina, G., Pedrazzi, S., & Francia, E. (2020a). Using digestate and biochar as fertilizers to improve processing tomato production sustainability. *Agronomy*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy10010138>

- Ronga, D., Caradonia, F., Parisi, M., Bezzi, G., Parisi, B., Allesina, G., Pedrazzi, S., & Francia, E. (2020b). Using digestate and biochar as fertilizers to improve processing tomato production sustainability. *Agronomy*, *10*(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy10010138>
- Rosa Mosquera-Losada, M., Javier Santiago-Freijanes, J., & Fernández-Núñez Antonio Rigueiro-Rodríguez, E. (2007). *EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN CON LODOS DE DEPURADORA URBANA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE PASTO Y EL CRECIMIENTO DEL ARBOLADO EN SISTEMAS SILVOPASTORALES ESTABLECIDOS BAJO EUCAYPYUS NITENS (H. DEANE & MAIDEN) MAIDEN*.
- Shen, Y., Linville, J. L., Urgun-Demirtas, M., Schoene, R. P., & Snyder, S. W. (2015). Producing pipeline-quality biomethane via anaerobic digestion of sludge amended with corn stover biochar with in-situ CO₂ removal. *Applied Energy*, *158*, 300–309. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.016>
- Sobol, R. (2011). CONSIDERACIONES PARA EL CUIDADO DE LA SALUD PÚBLICA EN EL CONSUMO DE HORTALIZAS FRESCAS. In J. Peña & E. Fernández (Eds.), *RIESGOS MICROBIANOS EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS FRESCOS EN ÁREAS URBANAS Y PERIURBANAS DE AMÉRICA LATINA* (pp. 155–184).
- Solé-Bundó, M., Cucina, M., Folch, M., Tàpias, J., Gigliotti, G., Garfí, M., & Ferrer, I. (2017). Assessing the agricultural reuse of the digestate from microalgae anaerobic digestion and co-digestion with sewage sludge. *Science of the Total Environment*, *586*, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.006>
- Sunyoto, N. M. S., Zhu, M., Zhang, Z., & Zhang, D. (2016). Effect of biochar addition on hydrogen and methane production in two-phase anaerobic digestion of aqueous carbohydrates food waste. *Bioresource Technology*, *219*, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.089>

- Tambone, F., Orzi, V., D'Imporzano, G., & Adani, F. (2017). Solid and liquid fractionation of digestate: Mass balance, chemical characterization, and agronomic and environmental value. *Bioresource Technology*, *243*, 1251–1256. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.130>
- Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., & Yang, Z. (2015). Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. In *Chemosphere* (Vol. 125, pp. 70–85). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>
- Tiquia, S. M. (2000). Evaluating phytotoxicity of pig manure from the pig on litter system. *Proceedings of the International Composting Symposium*, 625–647.
- Valverde, J. C., & Arias, D. (2020). Evaluación del índice de área foliar con método indirecto y directo en distintas condiciones ambientales en plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus tereticornis* Sm. *Madera y Bosques*, *26*(2). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621953>
- Vithanage, M., Herath, I., Almaroai, Y. A., Rajapaksha, A. U., Huang, L., Sung, J.-K., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2017). Effects of carbon nanotube and biochar on bioavailability of Pb, Cu and Sb in multi-metal contaminated soil. *Environmental Geochemistry and Health*, *39*(6), 1409–1420. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9941-6>
- Walsh, J. J., Jones, D. L., Chadwick, D. R., & Williams, A. P. (2018). Repeated application of anaerobic digestate, undigested cattle slurry and inorganic fertilizer N: Impacts on pasture yield and quality. *Grass and Forage Science*, *73*(3), 758–763. <https://doi.org/10.1111/gfs.12354>
- World Bank. (2021). *Fertilizer consumption (kilograms per hectare of arable land)*. <https://Data.Worldbank.Org/Indicator/AG.CON.FERT.ZS?End=2021&start=1961&view=map>.

- Yan, Z., Ma, T., Guo, S., Liu, R., & Li, M. (2021). Leaf anatomy, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of lettuce as influenced by arbuscular mycorrhizal fungi under high temperature stress. *Scientia Horticulturae*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109933>
- Zuconi, F. (1981). Evaluating toxicity of immature compost. *Biocycle*, 54–57.

Apéndices

Apéndice A. Diagrama de establecimiento del cultivo

Para la etapa metodológica de establecimiento del cultivo, se desarrollaron las siguientes fases:

Germinación de semillas



Tiempo: 10 días

El tiempo de germinación corresponde a los días que necesita la semilla para abrirse y para que la plántula emerja del suelo.

Crecimiento de las plántulas



Tiempo: 14 días

El tiempo de crecimiento es los días que tardan las plántulas en desarrollar dos hojas verdaderas, para poder ser trasplantadas.

Trasplante de las plántulas



Luego de que las plántulas desarrollaron dos hojas verdaderas, se trasplantaron a las macetas, para que cumplieran su ciclo de cultivo de 60 días.

Apéndice B. Certificados ponencia red colombiana de semilleros de investigación REDCOLSI, XVIII encuentro departamental de semilleros, y XXVI encuentro nacional de semilleros de investigación de semilleros de investigación ENISI 2023







XXVI Encuentro Nacional y
XX Encuentro Internacional de
Semilleros
 DE INVESTIGACIÓN REDCOLSI
ENISI 2023

La Fundación Red Colombiana de Semilleros de Investigación
 con NIT 900014966-5

Hace constar que,

YELY TATIANA CRUZ CASTRO

Con identificación número 1005544213

Participó en calidad de **PONENTE**

Durante la realización del XXVI Encuentro Nacional Y XX Encuentro Internacional de Semilleros de Investigación ENISI 2023 – realizado los días 11, 12, 13 y 14 de octubre de 2023, en el Nodo Bolívar en la Ciudad de Cartagena, con una intensidad de 8 horas diarias.

Del proyecto: Evaluación de la calidad del digerido obtenido a partir de la co-digestión anaerobia de estiércol bovino y lactosuero.



Universidad
de Cartagena
Fundada en 1827


LUZ MERY HERRERA GALEANO
 Coordinación Nacional


FERNANDO GUZMAN
 Coordinación Nodo Bolívar

WID. JSD0001.DIG
 Fecha 14/10/2023

 **RedCOLSI**
 Nodo Bolívar



XXVI Encuentro Nacional y
XX Encuentro Internacional de
Semilleros
DE INVESTIGACIÓN REDCOLSI
ENISI 2023

La Fundación Red Colombiana de Semilleros de Investigación
con NIT 900014966-5

Hace constar que,

CIRLEY LUZ DAY BORRERO ALFARO

Con identificación número 1096957640

Participó en calidad de **PONENTE**

Durante la realización del XXVI Encuentro Nacional Y XX Encuentro Internacional de Semilleros de Investigación ENISI 2023 – realizado los días 11, 12, 13 y 14 de octubre de 2023, en el Nodo Bolívar en la Ciudad de Cartagena, con una intensidad de 8 horas diarias.

Del proyecto: Evaluación de la calidad del digerido obtenido a partir de la co-digestión anaerobia de estiércol bovino y lactosuero.



Universidad
de Cartagena
Fundada en 1621


LUZ MERY HERRERA GALEANO
Coordinación Nacional


FERNANDO GUZMAN
Coordinación Nodo Bolívar



www.redcolsi.org
Fecha 14/10/2023

Apéndice C. Plan de fertilización cultivo de lechuga romana

Día después del trasplante	T1 (Digerido)		T2 (Urea)		T3 (Agua)	
	Fertilizante [ml]	Agua [ml]	Fertilizante [ml]	Agua [ml]	Fertilizante [ml]	Agua [ml]
3	3,57	46,43	4,64	45,36	0,00	50,00
6	3,57	46,43	4,64	45,36	0,00	50,00
9	3,57	46,43	4,64	45,36	0,00	50,00
12	3,57	46,43	4,64	45,36	0,00	50,00
15	3,57	46,43	4,64	45,36	0,00	50,00
18	3,57	46,43	4,64	45,36	0,00	50,00
21	3,57	46,43	4,64	45,36	0,00	50,00
24	3,57	46,43	4,64	45,36	0,00	50,00
27	5,00	45,00	6,50	43,50	0,00	50,00
30	5,00	45,00	6,50	43,50	0,00	50,00
33	5,00	45,00	6,50	43,50	0,00	50,00
36	5,00	45,00	6,50	43,50	0,00	50,00
39	5,00	45,00	6,50	43,50	0,00	50,00
42	10,01	89,99	13,00	87,00	0,00	100,00
45	10,01	89,99	13,00	87,00	0,00	100,00
48	10,01	89,99	13,00	87,00	0,00	100,00
51	10,01	89,99	13,00	87,00	0,00	100,00
54	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
57	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00
60	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00

Apéndice D. Resultados pruebas experimentales de sedimentación

Para establecer el tiempo de retención al interior del sedimentador se realizaron ensayos experimentales en el laboratorio de Biotecnología de la escuela de Ingeniería Química-UIS. Se tomó una muestra de digerido de la finca Santa Rosa, con un 13,2 %ST y se probaron tres tiempos de retención (3,6,15 horas). Luego del tiempo dado a cada experimentación se tomaron las dos fases (liquido-sólido) y se le midió el contenido de sólidos totales.

Finalmente se obtuvieron las siguientes eficiencias de remoción, usadas para la formulación de la estrategia de valorización del digerido.

