

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE EFICIENCIA DE LOS EFLUENTES LÍQUIDOS
GENERADOS POR EL BIODIGESTOR DE LA RESERVA COSMOPOLITANA COMO
ACONDICIONADORES DEL SUELO



LAURENT JULIETH ACOSTA DUEÑAS
MARÍA FERNANDA CARRILLO MALPICA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2020

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE EFICIENCIA DE LOS EFLUENTES LÍQUIDOS
GENERADOS POR EL BIODIGESTOR DE LA RESERVA COSMOPOLITANA COMO
ACONDICIONADORES DEL SUELO

LAURENT JULIETH ACOSTA DUEÑAS
MARÍA FERNANDA CARRILLO MALPICA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director (a)

CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

PhD, Msc, Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

INGENIERÍA AMBIENTAL

VILLAVICENCIO

2020

Autoridades Académicas

P. José Gabriel MESA ANGULO, O. P.

Rector General

P. Eduardo GONZÁLEZ GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Admr. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decano Facultad de Ingeniería Ambiental

Nota de Aceptación

YÉSICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de Facultad

CHRISTIAN JOSÉ ROJAS REINA

Director Trabajo de Grado

IBETH ELIANA CALDAS LUJÁN

Jurado

ÁNGELA MARÍA ZAPATA MARÍN

Jurado

Villavicencio, Abril de 2020

Agradecimientos

En primer lugar, queremos agradecer a Dios por brindarnos salud, paciencia, fortaleza, sabiduría y entendimiento durante todo el proceso de nuestra formación profesional, para así poder culminar con éxito tan anhelada meta propuesta que representa el primero de muchos logros en nuestras vidas.

También agradecemos a nuestras familias y en especial a nuestros padres por brindarnos su amor, apoyo y comprensión en todos los peldaños de nuestras vidas, tanto en el trayecto profesional como en el personal, quienes son nuestra mayor inspiración y motor de vida.

A la facultad de Ingeniería Ambiental y toda su planta docente en particular a nuestro director de tesis al Doctor en ingeniería química Christian José Rojas Reina quien con su experiencia y conocimiento nos guio en el proceso investigativo para cumplir a cabalidad los objetivos planteados, por esto, lo apreciamos y admiramos grandemente.

Finalmente, un agradecimiento a toda la organización de la Reserva la Cosmopolitana, en concreto a las personas que fueron de apoyo o ayuda cuando mayormente lo necesitábamos, por darnos el espacio, creer en nosotras y brindarnos la confianza para poder llevar a cabo todo el proceso de campo del presente proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	10
Abstract.....	11
1. Introducción.....	12
2. Planteamiento del problema.....	13
3. Objetivos.....	15
3.1. Objetivo general.....	15
3.2. Objetivos específicos.....	15
4. Justificación.....	16
5. Alcance del proyecto.....	18
6. Antecedentes.....	19
7. Marco de referencia.....	22
7.1. Marco teórico.....	22
7.2. Marco conceptual.....	24
7.3. Marco legal.....	27
8. Metodología.....	29
8.1. Fase 1. Identificación de las propiedades físico-químicas.....	29
8.2. Fase 2. Aplicación de los bioensayos.....	32
8.3. Fase 3. Evaluación de rendimiento.....	34
9. Resultados y análisis.....	36
9.1. Fase 1. Identificación de las propiedades físico-químicas.....	36
9.2. Fase 2. Aplicación de los bioensayos.....	43
9.3. Fase 3. Evaluación del rendimiento.....	46
10. Discusión.....	62
11. Conclusiones.....	64
12. Recomendaciones.....	65
Referencias.....	66
13. Anexos.....	78

Lista de Tablas

Tabla 1. Marco legal vigente	27
Tabla 1. Marco legal vigente (continuación)	28
Tabla 2. Parámetros físico-químicos examinados en el suelo	29
Tabla 2. Parámetros físico-químicos examinados en el suelo (continuación)	30
Tabla 3. Parámetros físico-químicos evaluados en el efluente líquido.....	31
Tabla 3. Parámetros físico-químicos evaluados en el efluente líquido (continuación)	32
Tabla 4. Relación de concentraciones y combinaciones aplicadas	33
Tabla 5. Condiciones iniciales del suelo de estudio	36
Tabla 6. Composición físico-química del efluente	40
Tabla 7. Longitud y ancho de hoja del pasto en el primer M y S en cm	46
Tabla 8. Longitud y ancho de hoja del pasto en el segundo M y S en cm.....	47
Tabla 9. Longitud y ancho de hoja del pasto en el tercer M y S en cm	48
Tabla 10. Longitud y ancho de hoja del pasto en el cuarto M y S en cm	49
Tabla 11. Longitud y ancho de hoja del pasto en el quinto M y S en cm.....	50
Tabla 12. Longitud y ancho de hoja del pasto en el sexto M y S en cm.....	51
Tabla 13. Peso del pasto en su crecimiento total en g	52
Tabla 14. Longitud de raíz del pasto en su crecimiento total en cm.....	53
Tabla 15. Tabla de frecuencia de peso del ultimo S y M.....	54
Tabla 16. Tabla de frecuencia de longitud del ultimo S y M.....	54
Tabla 17. Media de longitudes de bioensayos significativos.....	55
Tabla 18. Datos para análisis de coeficiente de correlación	58
Tabla 19. Coeficiente de correlación de Pearson por variables	58
Tabla 20. Variación de condiciones del suelo en el bioensayo 11.....	60

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación de la Reserva Natural Cosmopolitana. Elaborado en el software de sistemas de información geográfica ArcGIS.....	18
Figura 2. Consumo per cápita de carne de cerdo en Colombia.	22
Figura 3. Diseño de bloques con dimensiones.....	34
Figura 4. Pozo séptico de la Reserva Cosmopolitana.....	38
Figura 5. Almacenamiento temporal del efluente.....	39
Figura 6. Biodigestor de la Reserva Cosmopolitana.....	43
Figura 7. Pozo séptico de la Reserva Cosmopolitana.....	43
Figura 8. Casa abonera de la Reserva Cosmopolitana.....	44
Figura 9. Limpieza del terreno.....	45
Figura 10. Adecuación del área de estudio.....	44
Figura 11. Zona de estudio compuesta por los tres bloques.	45
Figura 12. Aplicación de los bioensayos en cada maceta.....	45
Figura 13. Macetas cubiertas con hojas secas.....	45
Figura 14. Primer M y S del cultivo de <i>Brachiaria brizantha</i>	47
Figura 15. Segundo M y S del cultivo de <i>Brachiaria brizantha</i>	48
Figura 16. Tercer M y S del cultivo de <i>Brachiaria brizantha</i>	49
Figura 17. Cuarto M y S del cultivo de <i>Brachiaria brizantha</i>	50
Figura 18. Quinto M y S del cultivo de <i>Brachiaria brizantha</i>	51
Figura 19. Sexto M y S del cultivo de <i>Brachiaria brizantha</i>	52
Figura 20. Relación Bioensayo 11 y 16.....	56
Figura 21. Curva Sigmoide del crecimiento de las plantas.....	57

Lista de Anexos

Anexo 1. Reserva Natural Cosmopolitana-lugar de estudio	78
Anexo 2. Línea de tiempo respecto a los antecedentes.....	79
Anexo 3. Curvas patrón.	80

Resumen

El presente trabajo de investigación evaluó el potencial de eficiencia de los efluentes líquidos generados por el biodigestor de la Reserva Cosmopolitana con el fin de conocer una nueva alternativa para el acondicionamiento del suelo y así ser utilizado como bioabono. Para lograr el objetivo se estableció una metodología desarrollada en tres fases: la primera, la identificación de las propiedades físico-químicas del suelo y el efluente, la segunda, la aplicación de los bioensayos y la tercera, la evaluación del rendimiento del pasto *Brachiaria brizantha* junto con el coeficiente de correlación de Pearson y las variaciones de las condiciones del suelo.

El pH, los ST, los SV, el N total, los NO₂ y NO₃ y la CE, presentaron concentraciones características según referentes que estudiaban el mismo tipo de efluente porcino, debido a que los datos obtenidos se encontraban entre rangos o valores cercanos establecidos, sin embargo, la DQO y el P no estuvieron incluidos por sus bajas concentraciones. Estas concentraciones del efluente generaron variaciones en las condiciones del suelo, como se evidenció en los aumentos de la CE, Dr, P y disminuciones en la Da, aunque se presentó estabilidad en el pH y el humus. Por otro lado, el bioensayo 11, el cual contenía 150 ml efluente / 375 g abono orgánico, fue el que presentó el mejor crecimiento del pasto *Brachiaria brizantha* en sus características foliares de largo y peso, lo que se debió a la concentración aplicada y a los procesos fisiológicos complejos. Además, el coeficiente de correlación de Pearson no presentó una asociación lineal directa entre las concentraciones del efluente y la longitud, ancho, peso y raíz, mientras que el abono orgánico, si presentó una asociación directa, pero de muy baja magnitud.

Palabras claves: Efluente, Suelo, Bioensayo, Biodigestor.

Abstract

The present research evaluated the efficiency potential of the liquid effluents generated by the biodigester of the Cosmopolitan Reserve in order to discover a new alternative for soil conditioning and to be used as a bio-fertilizer. To achieve the objective, a methodology developed in three phases was established: the first one, the identification of the physical-chemical properties of the soil and the effluent, the second one, the application of bioassays, and the third one, the evaluation of the performance of *Brachiaria brizantha* grass with Pearson's correlation coefficient and variations in soil conditions.

The pH, TS, VS, N total, NO₂ and NO₃ and CE presented characteristic concentrations according to referents that studied the same type of pig effluent, because the data obtained were between established ranges or close values, however, COD and P were not included due to their low concentrations. These effluent concentrations generated variations in soil conditions, as evidenced by increases in CE, Dr, P, and decreases in Da, although stability in pH and humus was found. On the other hand, bioassay 11, which contained 150 ml effluent / 375 g organic fertilizer, was the one that presented the best growth of *Brachiaria brizantha* grass in its foliar characteristics of length and weight, which was due to the concentration already applied and them complex physiological processes. Furthermore, the Pearson's correlation coefficient did not present a direct linear association between the effluent concentrations and the length, width, weight and root, while organic fertilizer did present a direct association, but of low magnitude.

Key words: Effluent, Soil, Bioassay, Biodigester.

1. Introducción

Los altos costos y la poca disponibilidad de fuentes de energía convencionales, junto con la dificultad de su obtención en comunidades rurales y la búsqueda de la estabilización y remediación de desechos orgánicos, hace que surja la implementación de tecnologías sostenibles y económicas como lo es la digestión anaerobia por medio de biodigestores, que ha ganado gran atención en los últimos años debido a la generación de productos de gran valor (Kumar & Nguyen, 2018, pág. 1), como el biogás y el efluente líquido de salida, como biofertilizante. El efluente, representa una alternativa sustentable a utilizar en medios de cultivos, ya que permite mitigar los altos costos económicos y ambientales asociados al uso de fertilizantes químicos y además mejora la inadecuada disposición que se les da, aunque esto, se ve afectado debido a que no hay estudios a nivel regional que permitan obtener información acerca de ello.

En el departamento la implementación de biofertilizantes puede ser una excelente opción para sustituir el uso de fertilizantes químicos ya que la actividad principal de la región es la agricultura, la cual se basa en la siembra cultivos de arroz, plátano, maíz, entre otros (González H. , 2004, pág. 5). Para la Reserva Cosmopolitana, la aplicación de bioabonos, permite mejorar el rendimiento de los cultivos, presentando características foliares sobresalientes y mayores concentraciones de frutos, por medio de la adición de nutrientes y la estabilización de propiedades físico-químicas del suelo.

Por esto, el presente trabajo se realiza, ya que se evalúa el potencial de eficiencia de los efluentes líquidos generados a partir del biodigestor de la Reserva Cosmopolitana como acondicionadores para el suelo, mediante la aplicación de este en el área de estudio, donde se identifica el rendimiento del pasto *Brachiaria brizantha*, las propiedades físico-químicas del efluente y su influencia en las variaciones de las propiedades físico-químicas del suelo, además de la asociación entre las variables mediante el coeficiente de correlación de Pearson.

2. Planteamiento del problema

Los efluentes líquidos son el resultado de la descomposición de la materia orgánica que proviene de residuos vegetales y/o excretas fecales de ganado bovino y porcino que alimentan un biodigestor (Muños, y otros, 2018, pág. 2). Estos son distinguidos como el subproducto del proceso de digestión anaeróbica, puesto que el propósito de un biodigestor es la producción de biogás (metano). Estos efluentes son considerados como un problema ambiental que surge a raíz del modo en cómo son dispuestos al medio ambiente por parte de la comunidad rural que utiliza biodigestores, ya que frecuentemente se desconocen los posibles usos que se les puede dar. Además, los escasos estudios científicos a nivel regional limitan la información, lo cual dificulta que se generen cambios en la forma en como disponen los efluentes. Por otro lado, el país no cuenta con un marco normativo que permita regular el manejo o la disposición de los efluentes líquidos producidos por digestores, tan solo se cuenta con la norma para vertimientos puntuales en diferentes tipos de industrias, excluyendo por completo la actividad de la transformación de la materia orgánica por medio de la digestión anaerobia.

En la Reserva Cosmopolitana los efluentes líquidos que se originan en el biodigestor son desechados en algunos pastizales y pequeñas proporciones en cultivos. La desinformación por parte de la entidad hace que los efluentes sean dispuestos de la forma anteriormente mencionada o donde crean pertinente. La Reserva no cuenta con un estudio investigativo que les proporcione información acerca de las características de los efluentes, de tal manera que desconocen si estos podrían ser nocivos para las zonas donde son vertidos debido a las altas concentraciones que pueden contener.

De manera general la disposición que se le da a los efluentes líquidos producidos por los biodigestores puede repercutir de manera directa sobre el agua y el suelo puesto que originan una serie de alteraciones en las propiedades físico-químicas y microbiológicas que llegan a ser de gran magnitud, debido a la carga contaminante que pueden presentar (Tobón, 2017, pág. 10). Las altas concentraciones de DBO, DQO, ST, microorganismos, entre otros, que contienen estos vertimientos, pueden causar una disminución de la calidad del agua (Arévalo & Zambrano, 2007, pág. 35), esto repercute en la reducción del recurso hídrico, el deterioro de las especies que habitan allí y la proliferación de enfermedades producidas por el consumo del líquido ya que muchas

localidades toman algunas fuentes hídricas como suministro de abastecimiento. Por otro lado, el suelo puede presentar una alteración en el pH (principal variable en los suelos debido a su función de controlar procesos químicos), a causa de la disminución del grado de concentración de iones hidrógeno, que convierten al suelo a fuertemente ácido, provocando condiciones desfavorables e incluso causando deficiencias de macronutrientes (Ca, K, Mg, N, P, S, Mo) así como exceso de micronutrientes (Cu, Fe, Mn, Zn, Co) y escasa actividad bacteriana (Pérez, Peña, & Lago, 2017, pág. 5). Además, la adherencia de sales minerales a causa de adición de altas concentraciones de conductividad eléctrica puede repercutir en la actividad microbiana del suelo y en la asimilación de nutrientes para las plantas, lo cual genera una afectación en su desarrollo, manifestándose en su crecimiento (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2020).

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Evaluar el potencial de eficiencia de los efluentes líquidos como acondicionadores para el suelo generados a partir del biodigestor de la Reserva Natural Cosmopolitana.

3.2. Objetivos específicos

- Identificar las propiedades físico-químicas tanto del efluente líquido como del suelo antes de la aplicación de los bioensayos.
- Evaluar el desarrollo de la especie vegetal cultivada por medio de mediciones de características foliares.
- Analizar la relación entre las proporciones de los bioensayos establecidos y el desarrollo de la especie vegetal por medio del coeficiente de correlación de Pearson.

4. Justificación

El uso de biodigestores como medio para tratar los desechos orgánicos es una eficiente alternativa para evitar la contaminación ambiental, y aprovechar los residuos agroindustriales, agropecuarios, entre otros como materia prima secundaria (Tobón, 2017, pág. 2). Los biodigestores suministran energía renovable, que se manifiesta como biogás y también generan un efluente de salida que está compuesto por una parte líquida y otra sólida (Aparcana & Jasen, 2008, pág. 2). El efluente líquido del biodigestor es considerado como un residuo sin valor alguno, puesto que es visto como un lixiviado no deseado, derivado de la producción del metano.

Los efluentes líquidos a causa de su inadecuada disposición pueden ocasionar impactos ambientales que se ven reflejados en las fuentes de aguas superficiales, debido a la presencia y altas concentraciones en algunos parámetros físico-químicos (DBO, DQO, ST) que influyen en las alteraciones de la fauna acuática y en la salud humana (Bogotá, Díaz, & Ramos, 2009, pág. 34); y en el suelo, el contenido excesivo o la ausencia de minerales, así como la presencia de microorganismos son capaces de alterar y deteriorar el componente natural causando deficiencias en la obtención y asimilación de nutrientes.

La Reserva Cosmopolitana cuenta con un biodigestor que genera efluentes líquidos que son considerados como un subproducto de la digestión anaerobia, estos efluentes son depositados en un pozo de manera periódica; de allí se extraen para ser desechados en pastizales donde se encuentra el ganado o algunas pequeñas cantidades las adicionan a cultivos. La entidad desconoce las características de su descomposición lo cual genera dudas acerca de su inocuidad. Pese a que el proceso de digestión anaerobia tiene como función expulsar estos líquidos con la menor proporción de carga contaminante (Rojas & Ñañes, 2018, pág. 13) no se tiene un estudio en donde se examine su uso desde el punto de vista agrícola.

Es por esto que se evaluó el potencial de eficiencia de los efluentes líquidos como acondicionadores del suelo, puesto que, al ser favorables, se aprovechan todos los beneficios que traen consigo, como lo son: el mejoramiento de la disponibilidad de nutrientes del suelo, el aumento en la disponibilidad hídrica, y la creación de un microclima adecuado para las plantas; así mismo, debido a su contenido de Fitoreguladores promueve actividades fisiológicas y estimula el desarrollo de las plantas, favorece su enraizamiento, alarga la fase de crecimiento de hojas

(quienes serán las encargadas de la fotosíntesis), mejora la floración, activa el vigor y el poder germinativo de las semillas (Sistema Biobolsa, 2015, pág. 4).

Para poder llevar a cabo esta evaluación se tomó en consideración la identificación de las propiedades físico-químicas de la zona en donde se adaptó el estudio ya que el conocer el estado de estas características en los suelos es de suma importancia para entender las reacciones que se realizan en él y cómo ello influye en la deficiencia o exceso de los nutrimentos para las plantas (Owen, 1995, pág. 2). Del mismo modo, se tomó en cuenta la identificación de las propiedades físico-químicas del efluente para así comprender su incidencia en el suelo.

5. Alcance del proyecto

El presente trabajo correspondió a una investigación cuantitativa que tuvo como alcance evaluar el potencial de eficiencia de los efluentes líquidos generados en la Reserva Cosmopolitana como acondicionadores del suelo, esto se llevó a cabo mediante un análisis inicial de las propiedades físico-químicas del suelo y el efluente, el cual duró un mes, también, se identificó el rendimiento, en el crecimiento de la especie plantada *Brachiaria brizantha*, en tres meses, por último, durante dos meses se realizaron los análisis de las propiedades físico-químicas del suelo después de la aplicación de los bioensayos y el análisis de los resultados.

El desarrollo del trabajo se llevó a cabo en la Reserva Natural Cosmopolitana (ver Anexo 1), la cual cuenta con un biodigestor que es alimentado por excretas porcinas, que mediante un proceso de digestión anaerobia produce gas metano y un efluente líquido. La Reserva está ubicada en el Kilómetro 7.5 vía hacia la vereda de San Nicolás a 10 minutos del área urbana del municipio de Restrepo y a 30 minutos de la capital del Meta, Villavicencio. Sus coordenadas son: Latitud $4^{\circ}13'29.91''$ N y Longitud $73^{\circ}29'31.83''$ S (ver Figura 1).

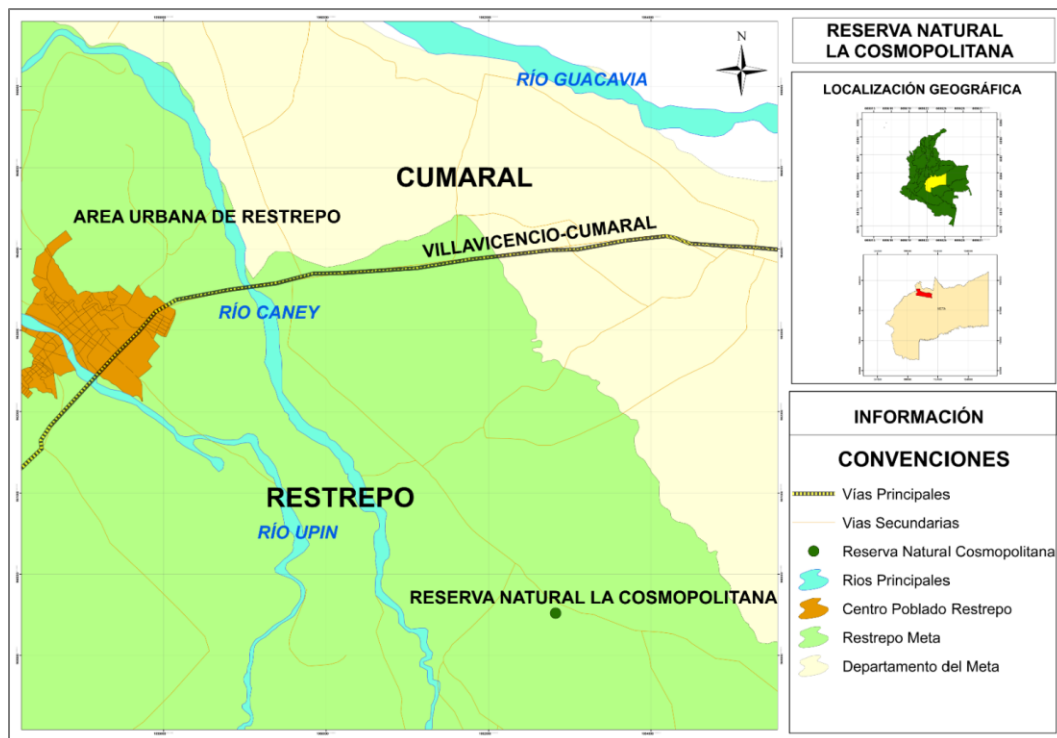


Figura 1. Ubicación de la Reserva Natural Cosmopolitana. Elaborado en el software de sistemas de información geográfica ArcGIS. Por Acosta & Carrillo, 2020.

6. Antecedentes

La digestión anaerobia es una tecnología empleada para la estabilización y remediación de desechos, esta ha ganado gran atención en los últimos años debido a que se ha utilizado para generar productos de gran valor (Kumar & Nguyen, 2018, pág. 1). Inicialmente esta tecnología fue implementada en las plantas de tratamiento de aguas con el fin de tratar los residuos lodosos con alta carga orgánica, donde se buscaba la degradación de materia orgánica. Al surgir dicha implementación se identifica que en estos sistemas se obtiene una alta producción de gas metano y otros subproductos (Rodríguez, 2019, pág. 13), por ello el sistema es mejorado para tratar diferentes desechos orgánicos como lo son desechos vegetales, desechos de animales y otros, y así aumentar la cantidad de producción de biogás.

A nivel mundial

En vista del potencial energético que brinda la digestión anaerobia en India se creó el primer biodigestor para la producción de biogás y bioabono, ubicado en zonas rurales a mediados del siglo XX. Luego en China se adoptó esta nueva tecnología con el fin de obtener todos los beneficios del sistema a un bajo costo; expandiéndose cada vez más en la segunda mitad del siglo XX. Por otro lado, en Europa y Estados Unidos esta tecnología fue implementada de forma más industrializada, alcanzando gran potencial de producción en países europeos, donde figuraba un porcentaje importante de la matriz energética (Coviello, 2003, pág. 8).

Latinoamérica

En Latinoamérica esta tecnología fue introducida en los años 80, tomando como modelo los biodigestores que se habían diseñado en China y la India, los cuales fueron modificados acorde a las condiciones tropicales y bajo presupuesto para su construcción (Herrero, 2019, pág. 4). A continuación, se presentan algunos casos relevantes, donde se comienza a introducir estudios no solo de los biodigestores para la producción de metano si no, para la producción del efluente y todo lo relacionado con su calidad y posibles usos.

En Costa Rica se realizó un estudio acerca de la cantidad adecuada de efluente (generado por un biodigestor) a utilizar como mejorador del suelo acompañado de un tratamiento previo para disminuir el contenido de coliformes y garantizar su inocuidad para cultivos de consumo directo,

con el efluente diluido al 50%. Además, se estableció una alternativa más económica para obtener un efluente de mejor calidad como fertilizante, la cual consistió en aumentar el tiempo de retención de la materia orgánica dentro de los biodigestores (Vargas & Rivas, 2012, pág. 2).

Estudios realizados en Cuba, como lo fue el diseño y construcción de un biodigestor para la generación de biogás y fertilizante orgánico, determinaron que se producía 0,405 m³/día de efluente con el cual se obtenía 0,77 kg/mes de nitrógeno, 0,14 kg/mes de fósforo y 1,42 kg/mes de potasio, además se definió que con el abono orgánico producido cada mes se podía fertilizar 600 m² de tierra cultivable con lo cual podían proteger los suelos y restituir la fertilidad a los mismos (Núñez, 2016, pág. 5). También, en el mismo país, se llevó a cabo una evaluación acerca la producción de biol (otro nombre dado al efluente líquido) y la determinación de sus características físico-químicas por medio de los estiércoles utilizados (cunícula, ovino y vacuno). Se identificó que los tres bioles no presentaron uniformidad en cuanto a pH, conductividad, contenido de macro y micronutrientes. Se destacaron los bioles ovinos, los cuales presentaron mayores contenidos de potasio y de amonio. Además, los bioles de estiércol cunícula y ovino presentaron valores de pH menos ácidos que los de estiércol vacuno, por lo tanto, estos resultaron ser más eficientes para la aplicación a las plantas (Pérez, et al, 2007, pág. 1).

En Ecuador se realizó una evaluación acerca de la eficiencia y funcionamiento del biodigestor anaeróbico de flujo continuo, el cual permitió comparar a través del TULSMA (texto unificado de legislación ambiental, secundaria del Ministerio de Ambiente) que la eficiencia del efluente generado por el biodigestor alimentado con estiércol de ganado porcino, si cumplía con los límites permisibles para ser utilizados con fines agrícolas; los cuales fueron la conductividad eléctrica con un valor de 5,14 ms/cm, el potencial de hidrógeno con un valor de 7,82 y los sólidos disueltos totales con un valor de 1656 mg/L (Bustillos, 2017, pág. 90).

En México debido a la alta producción de excretas porcinas se diseñó un biodigestor tipo FAO, con el objetivo de darle utilidad a las excretas líquidas y transformarlas de aguas contaminantes a biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo, el biodigestor presentó como resultado un efluente con una concentración de 210 mg/L para sólidos sedimentables, 0 coliformes, 7,05 pH, 4,08 dS/m⁻¹ CE, 1399 mg/L DQO y 172 mg/L DBO. Por lo anterior, establecieron que el bioabono producido era apto para ser aplicado en sistemas de fertigación o en cultivos de manera foliar ya que no deja residuos tóxicos en el suelo, eleva la calidad del mismo y puede considerarse

como un buen fertilizante que puede competir con los fertilizantes químicos (Soria, y otros, 2001, pág. 9).

Colombia

En el territorio nacional se han realizado diferentes estudios para la producción del biogás y la aplicación de los efluentes, por ejemplo:

En el Norte de Santander, se llevó a cabo un diseño de un biodigestor de canecas en serie para la obtención de gas metano y fertilizante a partir de la fermentación de excrementos de cerdo. En este lograron evidenciar la calidad del efluente resultante del biodigestor; la cual variaba de acuerdo con la cantidad de sólidos sedimentables totales contenidos, de manera que entre mayor fuera la concentración de sólidos totales mayor era el contenido de nutrientes en el efluente. Por esto determinaron que podían ser utilizados para la recuperación del suelo o para la aplicación directa a las plantaciones de pastos (Ramón, Romero, & Simanca, 2006, pág. 8).

En Timaná, Huila se efectuó la implementación de un Biodigestor como estrategia de aprovechamiento de los residuos generados para la fertilización de pasturas y la generación de biogás, en el cual se identificó impactos positivos ya que se reducen los vertimientos a las fuentes hídricas y al suelo y se reduce la carga contaminante del estiércol por medio del proceso de digestión anaerobia. Por un lado, el biogás obtenido sirvió como fuente de energía para consumo de las familias que habitan en la finca, además el lixiviado resultante del biodigestor se aprovechó para aplicarlo en parcelas donde se identificó un aumento de fósforo y hierro en el suelo (Rojas & Ñaños, 2018, págs. 45-48).

En Urabá, Antioquia se realizó un estudio sobre el efecto que tienen los abonos orgánicos en el crecimiento y la producción del plátano hartón por medio de un análisis dividido en dos ciclos (2006-2007 y 2008-2009). Los abonos utilizados para la aplicación fueron: Micorrizas, Bocashi y Biol. Se identificó que en el primer ciclo no influyeron en las variables de crecimiento y desarrollo, sin embargo, en el segundo ciclo el biol incidió positivamente en estas variables y adicional en la producción de la planta cultivada (Combatt, Barrera, & Ramírez, 2011, págs. 1-8).

7. Marco de referencia

7.1. Marco teórico

Actualmente, a nivel mundial se han estado estudiando y desarrollando diferentes formas alternas de energía, especialmente limpias y de bajo costo (Lozano, 2015, pág. 4). Los costos crecientes y la disponibilidad limitada de las fuentes minerales de energía, junto a la dificultad de su distribución en el medio rural y los altos costos económicos y ambientales de los fertilizantes químicos hacen necesario el desarrollo de tecnologías más eficientes para la producción de combustibles y fertilizantes en sistemas agropecuarios a partir de excretas de ganado porcino (Botero & Preston, 1987, pág. 3). Los productos residuales de origen animal, pueden ser aprovechados en su etapa final antes de cerrar el ciclo del carbono, extrayendo energía primaria de ellos, como biocombustibles líquidos (biodiesel) o gaseosos (biogás) (Lozano, 2015, pág. 4).

Las excretas de cerdo, las cuales se clasifican como un producto residual, son generadas en gran cantidad en Colombia ya que el consumo de esta proteína cárnica (cerdo) ha aumentado como se puede ver en la Figura 2 (González O. , 2019, pág. 34). Su composición química depende principalmente del alimento suministrado al cerdo en relación con la cantidad, composición, calidad y estado (Domínguez, Galindo, Salazar, Barrera, & Sánchez, 2014, págs. 20-21), ya que el animal no utiliza el 100% de los nutrientes contenidos en el alimento. Según (Castellanos, Salazar, Hernández, Domínguez, & Barrera, 2010, págs. 17-18) se excreta aproximadamente del 45% al 60% de nitrógeno, de 50 a 80 % del calcio y fósforo, y de 70 a 95 % del potasio, sodio, magnesio, cobre, zinc, manganeso y hierro.

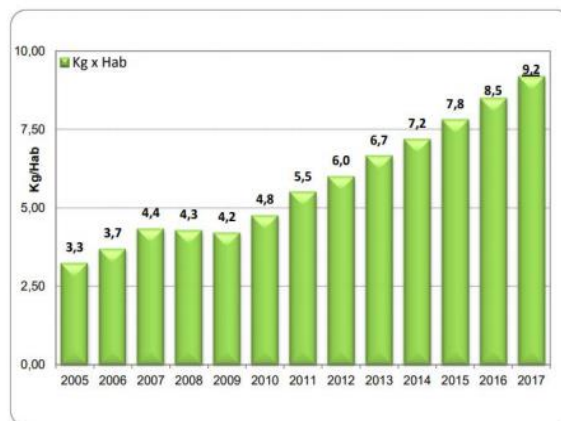


Figura 2. Consumo per cápita de carne cerdo en Colombia. Por (González O. , 2019, pág. 35).

Estas excretas son de fácil degradabilidad y sirven para la producción de abono (Ochoa & Gutiérrez, 2019, pág. 29) trayendo consigo nutrimentos que son indispensables para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Morales, Trejo, Santos, & Bacad, 2012, pág. 3). Sin embargo, de no realizar ningún tratamiento se considera que pueden representar un problema ambiental, dado por su potencial contaminante (Castellanos, et al, 2010, pág. 9). Por lo tanto, es necesario implementar alternativas y llevar a cabo un manejo adecuado de las excretas porcinas, lo cual ayuda a controlar y minimizar el impacto ambiental generado por las mismas.

La digestión anaerobia es una alternativa eficiente que produce biogás y se efectúa dentro de un biodigestor (Magaña, Torres, Martínez, Sandoval, & Hernández, 2006, pág. 2); este proceso está compuesto por cuatro etapas principales las cuales son: la hidrólisis donde los compuestos orgánicos son solubilizados (Acosta & Obaya, 2005, pág. 4); la fermentativa en la cual se da la fermentación de moléculas orgánicas solubles en compuestos, que pueden ser aprovechados (Ortega, 2006, pág. 9); la acetogénica donde los productos correspondientes son transformados en ácido acético, hidrógeno y CO₂ (Acosta & Obaya, 2005, pág. 4) y la metanogénesis, la cual es la reacción bioquímica más lenta del proceso, donde se da producción de metano y dióxido de carbono (Parra, 2015, pág. 4). Aunque el propósito de un biodigestor es producir metano, el proceso de digestión anaerobia también genera una descarga de un efluente líquido cuya composición varía dependiendo del contenido de la materia orgánica utilizada para alimentar el biodigestor, así como del tiempo de retención (Vargas & Rivas, 2012, pág. 3). La composición de este efluente comprende una fase líquida conocida como “Biol”, que corresponde al 90% y una fase sólida conocida como “Biosol” con un 10% (Aparcana & Jasen, 2008, págs. 2-3). Comúnmente la disposición que se le da al efluente se realiza de manera conjunta.

En la Reserva Cosmopolitana se encuentra un biodigestor que es alimentado por excretas porcinas, este genera un efluente líquido que provisionalmente es dispuesto en un tanque de salida que se comunica por medio de una tubería a un pozo séptico donde se almacena de manera permanente. La entidad dispone algunas proporciones del efluente en zonas de pastizales donde se encuentra el ganado, cultivos alimenticios y plantas ornamentales, desconociendo su composición físico-química, que podría ser perjudicial debido a su carga o beneficio por los nutrimentos que contenga.

Los efluentes pueden ser nocivos para el suelo debido a sus altas concentraciones en algunos componentes. El que se presenten en forma líquida, al aplicarse a suelos permeables hace que haya una pérdida por lixiviación, además en algunas ocasiones es necesario que el suelo se encuentre en condiciones húmedas para que no exista una pérdida de nitrógeno o algunos de sus otros componentes debido a la volatilización que puede presentar el efluente (Ramón, et al, 2006, pág. 4). Sin embargo, también pueden ser una excelente alternativa como fertilizantes orgánicos ya que traen consigo una gran cantidad de nutrientes tanto en su forma líquida como en la sólida, lo cual permite el desarrollo de las plantas y favorece la recuperación, crecimiento y producción de estas, alcanzando una resistencia eficiente contra ataques de plagas, enfermedades y los efectos adversos del clima (Aparcana & Jasen, 2008, págs. 2-8). Además, para la productividad de los cultivos y generación de material vegetal resultan ser de gran utilidad para ser implementado en siembras de maíz, tomate, durazno entre otros, teniendo en cuenta las características de los suelos en los cuales se va a realizar la actividad (Sistema Biobolsa, 2015, págs. 4-15).

7.2. Marco conceptual

Biodigestor: Es un dispositivo que por medio de la fermentación anaerobia permite la transformación de la materia orgánica en productos aprovechables como el gas metano y efluentes líquidos que pueden ser utilizados como fertilizante (Vargas & Rivas, 2012, pág. 3).

Digestión anaerobia: Es un proceso biológico de degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno, este proceso es realizado por bacterias anaerobias que actúan en el interior de un biodigestor para obtener como resultado gas metano (biogás) y además un efluente de salida (Rojas & Ñaños, 2018, pág. 24). Este proceso está compuesto por cuatro etapas principales, las cuales son: la hidrólisis, la fermentativa o acidogénica, la acetogénica y la metanogénica (Lozano, 2015, pág. 6).

Efluentes Líquidos: Son el resultado de la descomposición de la materia orgánica que proviene de residuos vegetales y/o excretas fecales de ganado bovino y porcino que alimentan un biodigestor (Muños, y otros, 2018, pág. 3). Está compuesto por una parte líquida, conocida como “Biol” y una parte sólida denominada “Biosol” (Aparcana & Jasen, 2008, pág. 2).

Excreta de cerdo: Es una combinación de material fecal y alimento rechazado que contiene orina, material piloso y de descamación. Las excretas se consideran como un simple desecho de los animales o como materia prima para procesos de reciclaje (Ninabanda, 2012, pág. 11).

Acondicionador del suelo: Son sustancias cuya acción fundamental es mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Blanco, 2020, pág. 19). La utilización de los acondicionadores de suelos, evita la mala disposición de los mismos, disminuyendo la contaminación del agua, suelo y aire, ahorrando recursos naturales (Puerta, 2014, pág. 8).

Brachiaria brizantha: Es un pasto que alcanza alturas entre 1.5 a 2 metros, presenta buen comportamiento en suelos de buena fertilidad, tolera la acidez, aunque ésta no debe ser extrema, además requiere de suelos bien drenados, no soporta las heladas, encharcamientos, ni saturaciones prolongadas de humedad en el suelo. Esta gramínea se identifica, por su buena tasa de crecimiento y por su vigor durante la época de sequía (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2012, pág. 1).

Materia orgánica: Se encuentra constituida por compuestos orgánicos que provienen de restos vegetales y animales descompuestos por microorganismos, insectos, lombrices y elementos ambientales; la descomposición de estos restos hace que se convierta una parte en nutrientes minerales y la otra se transforma en humus (García, 2008, pág. 2).

Potencial de hidrógeno (pH): Es una magnitud cuantitativa que permite identificar soluciones de tres tipos: ácidas, básicas o neutras y alcalinas. Las soluciones con $\text{pH} > 7$ son alcalinas, las que tienen valores del $\text{pH} < 7$ son ácidas y para una disolución neutra o para el agua pura, a 25°C , el $\text{pH} = 7$ (Jiménez, Torres, Gonzáles, & Salinas, 2000, pág. 2).

Conductividad eléctrica (CE): Se encarga de medir la concentración de sales en un medio, sea líquido o sólido, entre más sales tenga el medio mayor será su conductividad (Gallo & Gallo, 2016, pág. 19). Se basa en la velocidad con la que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en un medio (Aguirre, 2009, pág. 9).

Fosforo (P): Es un elemento que no se encuentra en la naturaleza en estado puro, por lo general está vinculado fuertemente al oxígeno y a otros elementos químicos formando fosfatos. Los fosfatos cumplen un papel muy importante para los procesos biológicos y por lo tanto para la vida.

Es decir que cuando se habla de fósforo, se sintetiza para referirse a todas las sustancias que lo contienen (Barrios, Sandoval, Camacaro, & Borges, 2010, pág. 1).

Nitrógeno (N): Corresponde a la relación entre los valores de nitratos, nitritos, nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal. El nitrógeno es un elemento indispensable en el metabolismo de los microorganismos debido a que es incorporado en las células bacterianas con el objetivo de producir aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos (Acuña, Pucci, & Pucci, 2008, pág. 2).

Nitritos y Nitratos (NO_2 y NO_3): Son compuestos iónicos que están presentes en la naturaleza, formando parte del ciclo del nitrógeno. El nitrato es la forma permanente de las estructuras oxidadas del nitrógeno, aunque cuenta con una baja reactividad química que puede ser reducida por acción microbiológica. El nitrito es oxidado por procesos químicos o biológicos a nitrato, o también puede ser reducido originando diversos compuestos (Almudena & Lizaso, 2001, pág. 1).

Demanda química de oxígeno (DQO): Es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de la materia orgánica que se encuentra en la muestra líquida y oxidable por agente químico oxidante fuerte. Representa el contenido orgánico total de la muestra oxidable por dicromato en solución ácida (Argandoña & Macias, 2013, pág. 38).

Densidad aparente (D_a): Es una variable que se determina teniendo en cuenta el espacio ocupado por los poros, por esta razón depende de algunos factores tales como textura, estructura, materia orgánica, tipo de mecanización, lo que es opuesto a la densidad real, que es más constante. La densidad aparente es utilizada para identificar el grado de compactación del suelo y también el grado de deterioro del mismo (Recalde, 2017, pág. 25).

Densidad real (D_r): Es el peso de las partículas sólidas del suelo asociado con el volumen que ocupan, sin tener presente el espacio ocupado por los poros. Esta variable es importante ya que por medio de ella se evalúa la velocidad de sedimentación de las partículas de los líquidos o gases a través del suelo (Recalde, 2017, págs. 26-27).

Sólidos totales (ST): Se encargan de evaluar los contenidos de materias disueltas y suspendidas en el agua, este resultado depende de la temperatura y el tiempo de secado. Su determinación se basa en una medición cuantitativa de la variación de peso que experimente una cápsula luego de la evaporación de la muestra y un proceso de secado (Argandoña & Macias, 2013, pág. 35).

Sólidos volátiles (SV): Su determinación va dirigida a obtener una medida de la cantidad de materia orgánica presente. Los sólidos volátiles se interpretan en términos de materia orgánica, teniendo en cuenta que a 500°C esta materia se oxida a una velocidad razonable en forma de gas, quedando la fracción inorgánica en forma de cenizas (Argandoña & Macias, 2013, pág. 37).

Humus: Es la materia orgánica en descomposición presente en el suelo, es homogénea, amorfa, de color oscuro, los resultados finales de la descomposición del humus son sales minerales, dióxido de carbono y amoníaco, la cantidad de humus en el suelo depende de la incorporación de nuevos restos orgánicos y su velocidad de oxidación (Julca, Meneses, Blas, & Bello, 2006, pág. 2).

Coefficiente de correlación de Pearson: Es la medida que permite determinar la asociación lineal que puede haber entre dos variables. Se calcula dividiendo la covarianza de ambas entre el producto de las desviaciones típicas (Díaz & Fernández, 2002, pág. 1). Además, tiene dos aspectos, su magnitud y su signo, ya que el primero refleja la intensidad de asociación entre dos variables y el segundo, como están asociados los valores de ambas variables (Camacho, 2008, pág. 1).

7.3. Marco legal

Tabla 1. *Marco legal vigente*

Normas	Descripción
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.
Ley 9 de 1979	Regula las normas sanitarias relacionadas con la salud pública, adoptando medidas de control para la descarga de residuos sólidos y líquidos que puedan afectar el entorno. Artículos de aplicación 3, 4 y 10.
Decreto 1594 de 1984	Establece los usos del agua y residuos líquidos, regulando todo la destinación, concesión y obtención de permisos para vertimiento de aguas servidas de uso agrícola. Artículos de aplicación 29, 32, 52 y 120.
Decreto 3930 de 2010	Establece el requerimiento de permiso de vertimiento donde toda persona natural o jurídica cuya actividad o servicio genere vertimientos a las aguas superficiales, marinas, o al suelo, deberá solicitar y tramitar ante la autoridad ambiental competente, el respectivo permiso de vertimientos.
Resolución 00150 de 2003	Adopta el reglamento técnico de fertilizantes y acondicionadores de suelos para Colombia, determinando la aplicación eficaz de fertilizantes y acondicionadores de suelos, minimizando así los riesgos para la salud humana, la sanidad agropecuaria y el ambiente.

Tabla 2. *Marco legal vigente (continuación)*

Resolución 3079 de 1995	Reglamenta las disposiciones sobre la industria, comercio y aplicación de bioensayos, de abono o fertilizantes, enmiendas, acondicionadores del suelo y productos afines; plaguicidas químicos, reguladores fisiológicos, coadyuvantes de uso agrícola y productos afines.
Resolución 1207 del 2014	Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Artículo 6: Las aguas residuales tratadas se podrán utilizar para la parte agrícola e industrial. Artículo 7: Criterios de calidad, el uso de agua residual tratada deberá cumplir previamente con los criterios de calidad.
NTC 1927	Adopta los términos relacionados con fertilizantes y acondicionadores de suelos, fuentes de materias primas y su clasificación.
NTC 5167	Regula los productos para la industria agrícola; productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo, adoptando los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos los productos anteriormente nombrados.

Nota: Normatividad colombiana relacionada con el uso de los efluentes líquidos generados por biodigestores. Por Acosta & Carrillo, 2020.

8. Metodología

8.1. Fase 1. Identificación de las propiedades físico-químicas

8.1.1. Suelo

8.1.1.1. Toma de muestras

Para determinar las propiedades físico-químicas del suelo se tomó una muestra compuesta conformada por 16 muestras simples distribuidas de acuerdo al diseño de cuadrícula en el suelo dispuesto en la “Guía de toma de muestras de suelo de Corpoica”. Se realizaron excavaciones de acuerdo a la cantidad de las muestras establecidas, de las cuales se extrajo una pequeña muestra; estas fueron homogenizadas y de allí se obtuvo una muestra compuesta para el análisis.

8.1.1.2. Condiciones iniciales

Se examinaron los parámetros físico-químicos del suelo previamente a la aplicación de los bioensayos, esto con el fin de identificar las condiciones en las que se encontraba al inicio del estudio. En la Tabla 2, se presentan los parámetros que se analizaron junto su unidad, método y descripción de procedimiento.

Tabla 3. *Parámetros físico-químicos examinados en el suelo*

Parámetro	Descripción de procedimiento
Densidad aparente (g/cm ³)	<p>Terrón parafinado: Se retira la humedad de la muestra con el horno por 2 horas a 105°C, luego se filtra en una malla de 2 micras, de allí se selecciona un terrón, se determina su peso y luego se introduce en parafina hasta estar cubierto en su totalidad, de nuevo se mide su peso y por último se introduce en una probeta de 100 ml con 50 ml de agua y se registra el desplazamiento. Los datos obtenidos se reemplazan en la siguiente fórmula para obtener la densidad aparente:</p> $Da = \frac{PSS\ 105^{\circ}}{Vd - \left[\frac{(PSSP - PSS)}{0.9} \right]}$ <p>Donde: Da = Densidad aparente (g/cm³) PSS 105°C = Peso del terrón seco (g) Vd = Volumen desplazado (cm³) PSSP = Peso del terrón parafinado (g) 0.9 = Densidad de la parafina</p>

Tabla 4. *Parámetros físico-químicos examinados en el suelo (continuación)*

Densidad real (g/cm ³)	<p><i>Picnómetro:</i> Se pesa el picnómetro sólo, seguidamente se le agrega 10 g de muestra y se pesa de nuevo, luego se le adiciona agua destilada hasta la mitad de su volumen y este se lleva a una placa de calentamiento hasta llegar a punto de ebullición, posteriormente se deja enfriar, se llena por completo con agua y se registra su nuevo peso, por último, se retira todo el contenido del picnómetro y se vuelve a llenar con agua destilada, se toma la temperatura y su peso final. Los datos obtenidos se reemplazan en la siguiente fórmula para determinar la densidad real:</p> $Dr = \frac{dw(Ws - Wa)}{(Ws - Wa) - (Wsw - Ww)}$ <p>Donde: Dr= Densidad real (g/cm³) Dw=Densidad del agua a la temperatura observada (g/cm³) Ws=Peso del picnómetro más el suelo (g) Wa= Peso del picnómetro vacío (g) Wsw=Peso del picnómetro más suelo más agua (g) Ww= Peso del picnómetro más agua (g)</p>
pH (Unidad de pH)	<i>Multiparámetro:</i> Se utiliza una malla de 2 micras para filtrar la muestra, luego se depositan 50 g de ésta en un vaso precipitado con 100 ml de agua destilada, se mezcla hasta homogenizar y por último se registra el dato de medición con el multiparámetro.
Conductividad eléctrica (µS/cm)	<i>Multiparámetro:</i> Para hallar este parámetro se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente, tan solo ajusta el multiparámetro en las unidades requeridas para la conductividad eléctrica.
Humus (%)	<i>Kit LaMotte:</i> Se agregan 2 medidas de la muestra con el medidor (0819) a un tubo (0704), luego se llena con agua desmineralizada hasta la marca (14 ml) y se agita hasta homogenizar; se utiliza una cuchara de 0,5 g para agregar 2 medidas de Humus Screening Reagent Powder, posteriormente se le añaden 15 gotas de reactivo de floculación del suelo, se deja reposar por varios minutos y por último se filtra la muestra en un segundo tubo (0704) y se compara la tonalidad con la tabla indicadora.
Fósforo (lb/a)	<i>Kit LaMotte:</i> Inicialmente se prepara la muestra por medio de un procedimiento de extracción, el cual consta de 3 pasos: primero se llena un tubo (0704) con solución de extracción universal (5173PS), luego se agregan 2 medidas de suelo (0819) y se agita por 1 minuto, por último, se filtra la muestra en un segundo tubo (0704), el cual se utiliza para la adición de reactivos. Se llena un tubo de Phosphorous B, hasta la marca con el extracto del suelo, posterior a ello se le agregan 6 gotas de Phosphorous Reagent 2 y una pastilla de Phosphorous Reagent 3, se agita durante unos minutos y finalmente se compara la tonalidad con la tabla indicadora.

Nota: Tabla empleada para los parámetros físico-químicos del suelo examinados junto con los procedimientos de cada método. Elaborada a partir del Manual de prácticas de campo y del laboratorio de suelos del SENA y el manual de instrucción combination soil outfit de LaMotte. Por Acosta & Carrillo, 2020.

8.1.2. Efluente líquido

8.1.2.1. Toma de muestra

Para la identificación de la composición del efluente se tomó una muestra puntual del pozo séptico donde estos son almacenados, de allí se extrajo 1 litro del líquido, y posteriormente se determinó los parámetros físico-químicos descritos en la Tabla 3.

8.1.2.2. Composición de descarga

La determinación de las propiedades físico-químicas del efluente se llevó a cabo mediante la evaluación de algunos parámetros, con el fin de conocer la composición del líquido después de su salida del biodigestor. En la Tabla 3 se presentan los parámetros que fueron evaluados junto con su unidad, método y descripción de procedimiento.

Tabla 5. *Parámetros físico-químicos evaluados en el efluente líquido*

Parámetro	Método
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Electrométrico: Se agregan 500 ml de muestra a un vaso precipitado, luego se introduce una sonda al vaso y se registra el valor expresado en el multiparámetro.
pH (Unidad pH)	Electrométrico: Para hallar este parámetro se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente, tan solo se ajusta el multiparámetro para obtener el pH.
Sólidos Totales (%)	Gravimétrico: Se pesan las cápsulas (4) solas, se le agregan 50 ml de muestra líquida a cada una y se vuelven a pesar, luego se ingresan al horno a 105°C por 24 horas, pasado el tiempo se enfrían y se pesan. Los datos obtenidos se reemplazan en la siguiente fórmula para obtener los sólidos totales: $ST = \frac{(\text{Peso Capsula} + \text{Residuo}) - \text{Peso Capsula}}{(\text{Peso Capsula} + \text{Masa Humeda}) - \text{Peso Capsula}} * 100$
Sólidos volátiles (%)	Gravimétrico: De las muestras de sólidos totales se extrae muestra seca en crisoles de porcelana para llevar a ignición a 550°C por 2 h. Después del enfriamiento se pesa el residuo remanente (cenizas). Los datos obtenidos se reemplazan en la siguiente fórmula para obtener los sólidos volátiles: $SV = \frac{[\text{Pesocrisol} + \text{Masaseca}(105^{\circ}\text{c})] - [\text{Pesocrisol} + \text{Cenizas}]}{[\text{Masaseca}(105^{\circ}\text{c})]} * 100$

Tabla 6. *Parámetros físico-químicos evaluados en el efluente líquido (continuación)*

Nitrógeno Total (mg/L)	Nitrógeno-Kjeldahl: En un vaso se agregan 900 ml de agua destilada y 100 ml de muestra, en 2 tubos de ensayo con solución salina se añaden 0,5 ml de la solución anterior, estos se llevan al termoreactor durante 30 minutos a 120°C, luego a cada tubo se le agrega un sobre de reactivo A y a los 3 minutos el reactivo B; Por último, se introducen al espectrofotómetro para medirlos a 500 nm.
DQO (mg/L O ₂)	Espectrofotométrico: Se preparan 2 disoluciones cada una en un balón aforado de 500 ml, la 1 ^{ra} de 25 ml de muestra concentrada con 475 ml de agua destilada y la 2 ^{da} de 50 ml de muestra con 450 ml agua. De cada disolución se extrae 3 ml y se agregan en tubos (4 tubos, 2 de 25 ml y 2 de 50 ml) que contengan reactivo para DQO, estos se llevan al termoreactor a 148°C por 2 horas y por último se introducen en el espectrofotómetro para ser medidos a 500 nm.
Fósforo (mg/L)	Espectrofotométrico: De la disolución de 50 ml descrita en la DQO se aplican 10 ml a un vaso, luego se agrega un sachet con reactivo para fósforo, y se deja reposar por 20 minutos, finalmente esta solución se añade a un cuarzo y este se lleva al espectrofotómetro para obtener los datos a 800 nm.
Nitratos (mg/L)	Espectrofotométrico: Se realiza el mismo procedimiento anterior, con la variación de la adicción de un sachet de reactivo para nitratos y se obtienen los datos a 500 nm.
Nitritos (mg/L)	Colorimétrico: De la solución de 25 ml descrita en la DQO se extrae 10 ml en un vaso y se le añaden 90 ml de agua destilada, luego se le agrega un sachet de reactivo para nitrito y finalmente esta solución se incorpora al tubo medidor de colorímetro para obtener el dato.

Nota: Tabla empleada para los parámetros físico-químicos del efluente evaluados junto con los procedimientos de cada método. Elaborada a partir de la “guía metodológica para los análisis físico-químicos de aguas” del IDEAM y la “guía de métodos analíticos para la evaluación de la calidad físico-química del agua” de la Universidad Nacional de Colombia. Por Acosta & Carrillo, 2020.

8.2. Fase 2. Aplicación de los bioensayos

8.2.1. Composición de los bioensayos

Se tomaron dos productos para obtener los bioensayos; uno fue el efluente líquido generado por la digestión de excretas porcinas y el otro un abono orgánico compuesto por residuos vegetales de la Reserva Cosmopolitana, con esto se establecieron en total 16 bioensayos definidos por las concentraciones y combinaciones establecidas en la Tabla 4, donde se incluyó un testigo que fue

un bioensayo sin aplicación de ningún producto, conformando así, un bloque. Con el fin de evitar el error experimental se destinaron dos bloques adicionales, siendo estos las repeticiones. La aplicación de los bioensayos se realizó una única vez y fue el momento en el que se acondicionó la zona para la plantación de *Brachiaria brizantha*.

Tabla 7. *Relación de concentraciones y combinaciones aplicadas*

Bioensayo (#)	Efluente líquido (ml)	Abono orgánico (g)	Proporción (Efluente/Abono)
1	300	0	300/0
2	150	0	150/0
3	60	0	60/0
4	0	750	0/750
5	0	375	0/375
6	0	150	0/150
7	300	750	300/750
8	300	375	300/375
9	300	150	300/150
10	150	750	150/750
11	150	375	150/375
12	150	150	150/150
13	60	750	60/750
14	60	375	60/375
15	60	150	60/150
16	0	0	0/0
Total	2040	5100	-

Nota: Tabla empleada para establecer los bioensayos a través de la combinación del efluente y el abono orgánico aplicados en cada maceta. Por Acosta & Carrillo, 2019.

8.2.2. Adaptación de la zona de estudio

Se diseñó una zona compuesta por tres bloques, cada uno con 16 macetas las cuales contenían los bioensayos (b), estas contaron con 0,26m por lado, disponiendo así, un área de 0,0676m² cada una. Se ubicaron en una sección vertical y otra horizontal, de modo que se obtuvo una distribución de 4 macetas * 4 macetas. Se estableció un borde de 0,18 m entre sí, para el monitoreo del desarrollo del pasto. De esta manera cada bloque contó con 1,94 m por lado, proporcionando un área total de 3,763m² por bloque (Figura 3).

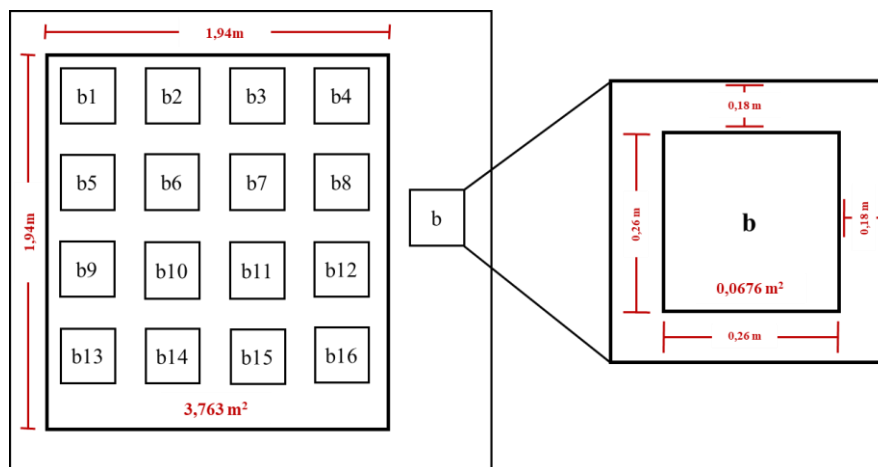


Figura 3. Diseño de bloques con dimensiones. Por Carrillo. M, 2019.

8.3. Fase 3. Evaluación de rendimiento

8.3.1. Desarrollo del pasto

El rendimiento de la *Brachiaria brizantha* se evaluó por medio de su desarrollo, al analizar su crecimiento en un tiempo de 3 meses, dentro de los cuales se llevaron a cabo monitoreos y seguimientos, en los que cada 15 días se midió la longitud y ancho de la hoja. Cuando la plantación completo el tiempo establecido, se levantaron los tres bloques y se llevaron a cabo evaluaciones de la longitud de la raíz y peso, junto con las anteriores.

Con los datos obtenidos se elaboró una tabla de frecuencia que permitió determinar cuáles fueron los bioensayos que presentaron una mayor frecuencia y un mejor crecimiento en cuanto a su longitud y peso, y a su vez, con esto, se identificó cuál fue el que tuvo el mejor rendimiento. El seleccionado como el mejor, se relacionó con el bioensayo que iba en blanco para establecer la causal de su buen crecimiento mediante una curva.

8.3.2. Correlación de Pearson

El coeficiente de correlación se estableció para llevar a cabo un análisis estadístico por medio del de las variables del desarrollo del pasto y las concentraciones establecidas, determinando cuál fue el grado de asociación entre el efluente y el abono con el largo, ancho, peso y raíz, y a sí mismo, la asociación entre sí de las últimas.

8.3.3. Variación de las condiciones del suelo

Para la identificación de las variaciones en las propiedades físico-químicas del suelo en el área de estudio, posterior a la aplicación de los bioensayos, se seleccionó el bioensayo que presentó el mejor rendimiento, en relación a sus características foliares, al cual se le evaluó y analizó nuevamente los parámetros expresados en la Tabla 2 del apartado 8.1.1.2, para así ver si las concentraciones de los bioensayos provocaron una alteración sobre este componente.

9. Resultados y análisis

9.1. Fase 1. Identificación de las propiedades físico-químicas

9.1.1. Suelo

9.1.1.1. Toma de muestras

Para la toma de muestras se realizaron 16 excavaciones con poca profundidad en el área de estudio, obteniendo así varias cavidades en el suelo; de cada una se extrajo una muestra de la pared con una espátula y estas fueron depositadas y homogenizadas en un balde de mezcla, con esto se consiguió una muestra compuesta de la cual, se retiró una porción para el análisis físico y otra para el análisis químico.

9.1.1.1. Condiciones iniciales

Fue necesario conocer las condiciones en las que se encontraba el suelo al inicio del estudio, es decir, previo a la aplicación de los bioensayos. Para ello, a la muestra compuesta que se obtuvo del procedimiento anterior, se le analizaron las propiedades físico-químicas del suelo que dieron como resultado lo expresado en la Tabla 5.

Tabla 8. *Condiciones iniciales del suelo de estudio*

Parámetro	Resultado
Densidad aparente	1,84 g/cm ³
Densidad real	2,01 g/cm ³
Conductividad eléctrica	0,12 ds/m
pH	4,92 a 26°C
Humus	1 unidades de color
Fósforo	12,5 ppm

Nota: Resultados obtenidos del análisis físico-químico del suelo antes de la aplicación de los bioensayos en la zona de estudio de La Reserva Cosmopolitana. Por Acosta & Carrillo, 2019.

La densidad aparente hallada fue de 1,84 g/cm³, la cual presentó una diferencia de 0,35 g/cm³ con (Recalde, 2017, pág. 56), quien realizó una caracterización de las propiedades físico-químicas del suelo de una Reserva ya que su densidad aparente fue de 1,49 g/cm³, esto indicó que el suelo donde se llevó a cabo el estudio es de textura franco arenoso-franco, el cual se caracteriza por ser compacto y poco poroso, con mala aireación e infiltración lenta, lo que puede provocar

anegamiento, anoxia y además de restringir el crecimiento y desarrollo de la planta; estas características se dan debido al efecto que tiene la resistencia y la porosidad del suelo sobre las raíces. En contraste de los suelos con valores bajos en la densidad aparente, estos se identifican por ser porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de raíces, lo que permite un buen desarrollo de las mismas. La densidad aparente es importante debido a que muestra el comportamiento de algunas propiedades del suelo tales como la porosidad, compactación, grado de aireación y la capacidad de infiltración, lo cual establece la circulación de agua y aire en el suelo (Rubio, 2010, pág. 17). Tomando en consideración lo citado por (Chávez, Gonzáles, & Gonzáles, 2016, pág. 1) la porosidad se encuentra relacionada con la densidad aparente y es importante de igual forma ya que determina los procesos de infiltración, escurrimiento y el transporte de agua en el suelo, además el flujo de agua y aire se lleva a cabo a través de la porosidad del suelo y está sujeta a la cantidad, tamaño y distribución de poros. La porosidad es la diferencia entre la densidad real y la aparente dividida en la densidad real, para un resultado en porcentaje, esto se multiplica por 100. Con esto, en el presente estudio arrojó un resultado de 8,45%.

Por su parte, el humus arrojó un valor de 1 unidad de color, lo cual indicó que su presencia en el suelo es baja, este resultado estuvo sujeto a las características que presenta un suelo de textura franco arenoso–franco, puesto que la cantidad del humus depende de diversos factores, entre ellos la aireación, incorporación de nuevos restos orgánicos al suelo y su velocidad de oxidación química y biológica, la velocidad de descomposición de la materia orgánica ya existente en el suelo, la textura del suelo, humedad y los factores climáticos (Julca, Meneses, Blas, & Bello, 2006, pág. 2). El humus tiene un efecto sobre las propiedades físicas del suelo, dando estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas, favoreciendo la penetración y retención del agua. En cuanto a las propiedades químicas, aumenta la capacidad de cambio del suelo, preserva los nutrientes para la vida vegetal y facilita su absorción a través de la membrana celular de las raíces. Por último, sobre las propiedades biológicas, ayuda a los procesos de mineralización, sirve como alimento para diferentes microorganismos y estimula el desarrollo de la planta en un sistema ecológico equilibrado (Julca, Meneses, Blas, & Bello, 2006, pág. 2). De acuerdo a lo citado por (Félix, Sañudo, Rojo, Martínez, & Olalde, 2008, pág. 6) es importante reconocer que el humus favorece el desarrollo normal de cadenas tróficas en el suelo y también es potencial para controlar poblaciones de patógenos del suelo.

La densidad real arrojó un valor de 2,01 g/cm³ dato inferior al obtenido por (Recalde, 2017, pág. 57), el cual fue de 2,07 g/cm³; estos valores manifestaron una similitud, porque solo presentaron una diferencia mínima de 0,06 g/cm³; lo cual indicó que los suelos son minerales, ya que de acuerdo con la clasificación general, los valores superiores a 2 g/cm³ hacen referencia a suelos de tipo mineral y los inferiores a 2 g/cm³ son suelos de tipo orgánico. Además, la densidad real, al ser un parámetro dependiente de los materiales sólidos en el suelo, no se ve afectado por el tamaño de partículas, la cantidad de poros presentes en el mismo, ni por la profundidad a la que se realice el muestreo (Recalde, 2017, pág. 79).

La conductividad eléctrica hallada fue de 0,12 ds/m, la cual tuvo una similitud con la de (Rengifo, 2009, pág. 94), que evaluó la variabilidad de algunas propiedades físicas y químicas del suelo sobre el rendimiento de un cultivo en la sabana de Bogotá y obtuvo como resultado 0,25 ds/m, ya que estos valores hicieron mención a suelos con salinidad muy baja, lo que permite mejorar el desarrollo de las plantas por medio de la asimilación de nutrientes y la actividad microbiana, lo que a su vez, indicó un aspecto positivo en el estudio. Por lo general, cuando existe un manejo agrícola de por medio, las mediciones de conductividad tienden a incrementarse, presentando afectaciones múltiples. Tomando en consideración lo dicho por (Navarro, 1992, pág. 29), los valores que se encuentren por encima de 4 ds/m restringen el rendimiento de cultivos y por lo general se debe recuperar el suelo.

El valor obtenido de pH fue de 4,9 que se encuentra en un rango de similitud con el de (Rojas & Ñañes, 2018, pág. 43) autores que diseñaron e implementaron un biodigestor, como estrategia de aprovechamiento de los residuos generados para la fertilización de pasturas y la generación de biogás, cuyo valor fue de 5,7. Esto indica que estos suelos son ácidos. Tomando en consideración los estudios de (Recalde, 2017, pág. 91) se concluyó que el valor de pH obtenido en el presente estudio es propio de regiones húmedas tropicales y surge por una serie de factores entre ellos la meteorización de minerales aluminosilicatos y la liberación de aluminio a la solución del suelo. Además, en consideración con (Osorio, 2012, pág. 2) este tipo de suelo es apto para la especie utilizada en el presente estudio (*Brachiaria brizantha*) debido a que se acopla y tolera muy bien los suelos ácidos.

Por otro lado, el contenido de fósforo arrojó un resultado de 12,5 ppm, el cual fue bajo de acuerdo a los valores de referencia reportados por (Andrades & Martínez, 2014, pág. 22). Cuando

los valores son menores a 15 ppm hacen referencia a concentraciones bajas que caracterizan a los suelos con textura franca, como lo fue en el presente estudio. Además, según (Osorio, 2012, pág. 3) el fósforo tuvo una relación directa con el pH ya que, este es un buen indicador de la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Así mismo, en consideración con (Navarro, 1992, pág. 27) cuando el suelo cuenta con un pH menor a 5,5 presenta una alta probabilidad de deficiencia en algunos elementos, entre ellos, el fósforo.

9.1.2. Efluente líquido

9.1.2.1. Toma de muestras

Con el fin de obtener una muestra puntual para determinar las propiedades físico-químicas del efluente, se extrajo el líquido de un pozo séptico donde son almacenados por parte de la entidad (Figura 4). De este lugar se sacaron 2 litros, los cuales se almacenaron temporalmente en dos jarras plásticas con tapa hasta realizar los diferentes análisis (Figura 5).



Figura 4. Pozo séptico de la Reserva Cosmopolitana. Por Carrillo, 2019.



Figura 5. Almacenamiento temporal del efluente Por Acosta & Carrillo, 2019.

9.1.2.2. Composición de descarga

Para la identificación de las propiedades físico-químicas del efluente se llevó a cabo el análisis de algunos parámetros fundamentales para determinar la calidad del líquido a la salida del biodigestor que fue alimentado diariamente por excretas de cerdos, el cual se encontraba situado cerca al corral de los animales en la Reserva. Los datos obtenidos se encuentran relacionados en la Tabla 6.

Tabla 9. Composición físico-química del efluente

Parámetro	Resultado
Conductividad Eléctrica	1.977 $\mu\text{S}/\text{cm}$
pH	7,44 unidad pH
Sólidos Totales	0,08%
Sólidos Volátiles	36,58%
DQO	307,85 mg/L*
Fósforo	25,59 mg/L*
Nitrógeno Total	1.350 mg/L*
Nitratos	1.268 mg/L*
Nitritos	6 mg/L

Nota: Resultados obtenidos del análisis físico-químico del efluente líquido generado por el biodigestor de excretas porcinas de la Reserva Cosmopolitana. Por Acosta & Carrillo, 2019.

*Estos valores fueron el resultado de la relación entre los valores obtenidos por la descripción del método presentado en la Tabla 3 y la curva patrón de cada parámetro expresado en los nm determinados que se encuentran en el Anexo 3.

En torno al análisis, las referencias relacionadas en cada una de las variables físico-químicas halladas, fueron de estudios enfocados generalmente a la evaluación de biodigestores, la obtención de biogás, y la producción de biofertilizantes. Considerando que los efluentes en cada uno fueron obtenidos por la digestión anaerobia de excretas de cerdo, es decir, originados con el mismo proceso y la misma materia orgánica, que el efluente del presente estudio.

La conductividad eléctrica dio como resultado 1.977 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual indicó una gran cantidad de sales minerales que pueden afectar al suelo, ya que esto inhibe la asimilación de nutrientes por las plantas y la actividad microbiana (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2020), característico de los productos generados a partir de procesos biológicos de degradación de materia orgánica (Sanabria, 2006, pág. 2). Sin embargo, de acuerdo con (Bastidas, 2019, pág. 52) en su evaluación de un proceso de fermentación con microorganismos de montaña, como post-tratamiento para un efluente, la conductividad eléctrica menor a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y particularmente menor a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ es corrosiva y provoca la lixiviación en el suelo lo que causa la pérdida de estructura del mismo, aunque relacionando el efluente del estudio, este no se encontró dentro del rango, por tanto, se determina que no es nocivo. Por su parte, el pH arrojó un resultado de 7,44, el cual, se encontró dentro del rango de la neutralidad y lo esperado por su origen (Bustillos, 2017, págs. 74-75). Además, el valor obtenido, se encontró muy cercano al promedio

establecido para los efluentes de este tipo (7,5), valor que indica la disponibilidad de los nutrimentos en estos líquidos (Botero & Preston, 1987, pág. 12).

Por otro lado, este tipo efluente cumplió con los límites permisibles de pH, pero no con los de conductividad, ya que conforme a la Resolución 1207 de 2014 el valor de pH se debe encontrar en un rango de 6 a 9 y la conductividad debe ser menor a 1.500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ para que el efluente líquido sea utilizado con el fin de uso agrícola para agua de riego en cultivos (Resolución 1207 de 2014, 2014, pág. 5).

Los sólidos totales presentaron un valor de 0,080 %, dato inferior al reportado por (Ochoa & Gutiérrez, 2019, pág. 47) en su determinación del potencial energético para la producción de biogás, el cual fue de 0,605 % y por el (Sistema Biobolsa, 2015, pág. 4) el cual, en su Manual del biol, presenta un valor de 0,48 %. Esto indicó que el valor del presente estudio y los otros dos tuvieron una relación ya que se encontraron en un rango inferior a siquiera al 1%, siendo una proporción muy pequeña en ST. El porcentaje de sólidos totales que se encuentran de manera general en efluentes de este tipo es de alrededor un 2% o menos (Varnero, 2011, pág. 72), lo que refiere a que la alimentación de excretas en el biodigestor está subestimada, pudiendo soportar una carga de sólidos totales mayor. Por otro lado, los sólidos volátiles dieron un valor de 36,58 %, análogo con lo reportado por (Ochoa & Gutiérrez, 2019, pág. 47) ya que obtuvieron 31,96 %. Asimismo, en comparación con lo citado por las mencionadas autoras los efluentes compuestos por combinaciones de excretas porcinas y diferentes sustratos aumenta el porcentaje de sólidos volátiles, rangos que se encuentra entre 60% al 76%. Se debe agregar que en consideración con (Zambrano & Macias, 2013, pág. 37), el contenido de sólidos volátiles se interpreta en términos de materia orgánica, teniendo en cuenta que esta se oxida a una velocidad razonable en forma de gas y agua que se volatilizan, quedando la fracción inorgánica en forma de cenizas.

La determinación de los sólidos en esta clase de efluentes es una de las características físicas más importantes puesto que, comúnmente son buenos indicadores de la cantidad de materia orgánica presente en estos líquidos (Zambrano & Macias, 2013, págs. 33-36).

La DQO mostró un resultado de 307,85 mg/L siendo este un valor inferior al compararse con otros estudios como por ejemplo: con (Cevallos & Hidalgo, 2013, pág. 25) en su estimación del potencial energético a partir de la producción de metano, ya que este fue de 1.087 mg/L, con (Bustillos, 2017, pág. 71) en su evaluación de la eficiencia y funcionamiento de un biodigestor

anaerobio, puesto que este fue de 1.250 mg/L, con (Soria, y otros, 2001, pág. 9) en su producción de biofertilizantes por medio de la biodigestión anaerobia, ya que este fue de 1.399 mg/L y con (Arévalo & Zambrano, 2007, pág. 105) en su implementación de un sistema autosostenible para el tratamiento de vertimientos, que reportó un valor de 2.878 mg/L. Sin embargo, los estudios citados fueron los valores más cercanos al mostrado en el presente estudio, lo que indicó que la concentración del líquido fue muy baja y esto era de esperarse ya que en la muestra su aspecto físico fue claro. Por lo general, las concentraciones de DQO son más altas ya que es un atributo propio de efluentes porcinos, aunque esto depende de las características del sustrato y la cantidad de excretas suministradas al biodigestor (Cevallos & Hidalgo, 2013, pág. 9).

El fósforo presentó un valor de 25,59 mg/L mayor al obtenido por (Soria, y otros, 2001, pág. 9) el cual fue de 17,2 mg/L, pero muy semejante ya que se pueden presentar valores más altos como el dado por (Arévalo & Zambrano, 2007, pág. 105) que fue 204 mg/L. Esto se debió a la disponibilidad del nutriente que contiene el efluente, que a su vez está sujeto de calidad y cantidad de materia prima que haya sido fermentada. Por otro lado, el Nitrógeno Total dio un resultado de 1.350 mg/L que figuró como la media al relacionarse con otros estudios como lo fueron: (Bustillos, 2017, pág. 71) con 436 mg/L, (Arévalo & Zambrano, 2007, pág. 105) con 709 mg/L, (Medina, Quipuzco, & Juscamaita, 2014, pág. 6) en su evaluación de la calidad de biol de segunda generación con 1.876 mg/L y (Alesso, y otros, 2014, pág. 3) en su rendimiento de maíz y cambios en propiedades edáficas por la aplicación de un efluente con 2.545 mg/L. Según (Bustillos, 2017, pág. 36) el Nitrógeno representa la concentración de la combinación del nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal, que confieren a los efluentes tratados buenas características como fertilizantes a bajo costo. Además, el nitrógeno amoniacal se absorbe por las raíces de las plantas en forma de nitrato y produce un buen crecimiento en las mismas (Pérez, et al, 2007, pág. 7-8).

Tomando en cuenta lo expresado por (Vargas & Rivas, 2012, pág. 5) el incremento de fósforo y nitrógeno, dos de los macronutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas, mejora la calidad del efluente, ya que la digestión anaerobia degrada componentes complejos a formas moleculares más simples como amonio, nitrato y pentóxido de fósforo, favoreciendo la asimilación de estos nutrientes por las plantas.

Los Nitratos arrojaron una concentración 1.268,83 mg/L, que fue baja al relacionarse con la registrada por (Alesso, y otros, 2014, pág. 3) ya que esta fue de 5.400 mg/L. Por otro lado, los

Nitritos presentaron una concentración de 6 mg/L la cual es alta, pero se encuentra con un rango de similitud al asociarse con la obtenida por (Lara & Torregrosa, 2009, pág. 90) en su diseño y evaluación de biodigestores utilizando diferentes excretas de ganado, reportando un valor de 1,98 mg/L. Los Nitratos y Nitritos son derivados del nitrógeno y la formación de estos compuestos tiene lugar como consecuencias de la combinación de nitrógeno y oxígeno molecular. Según (Ciro, González, & Osorio, 2007, pág. 4) el uso de los efluentes provenientes de biodigestores de excretas porcinas no ocasiona impactos negativos por lixiviación y escorrentía de nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3), ya que el tratamiento previo ayuda a mejorar las concentraciones para el suelo. Además, la presencia de nitrógeno en el efluente beneficia al suelo, ya que este es descompuesto para dar en un primer paso amonio (NH_4^+), que a su vez es oxidado a nitrito y nitrato. Parte de este nitrato es absorbido por las plantas, que lo emplean en la síntesis de proteínas vegetales (Almudena & Lizaso, 2001, pág. 1).

9.2. Fase 2. Aplicación de los bioensayos

9.2.1. Composición de los bioensayos

Para la obtención de los bioensayos, se realizaron combinaciones de dos productos; uno fue el efluente líquido generado por el biodigestor alimentado por excretas porcinas (Figura 6), el cual, se encontraba almacenado en un pozo séptico (Figura 7), y el otro, fue un abono orgánico compuesto por residuos vegetales que se encontraba localizado en la casa abonera de la Reserva Cosmopolitana (Figura 8). A partir de estos dos productos, se implementaron las combinaciones mostradas en la Tabla 4 en cada maceta, teniendo en cuenta que la maceta 16 era el blanco, es decir, no llevaba ningún producto.



Figura 6. Biodigestor de la Reserva Cosmopolitana. Por Acosta & Carrillo, 2019.



Figura 7. Pozo séptico de la Reserva Cosmopolitana. Por Acosta, 2019.



Figura 8. Casa abonera de la Reserva Cosmopolitana. Por Acosta & Carrillo, 2019.

9.2.2. Adaptación de la zona de estudio

Inicialmente se realizó una inspección del área con el fin de verificar que no se presentara ningún inconveniente (como lo pudo ser la presencia de animales o materiales de construcción) para desarrollar con éxito el estudio. Con esto, primeramente, se realizó una limpieza del terreno, debido a la presencia de basuras y gramíneas (Figura 9), una vez adecuado el suelo (Figura 10), se realizaron 16 excavaciones distribuidas de la siguiente manera: 4 verticales y 4 horizontales para un bloque, donde se tuvo en cuenta las dimensiones establecidas en el numeral 8.1.2. Esto se repitió para los dos bloques adicionales, consiguiendo una zona compuesta por los tres bloques establecidos (Figura 11). Se lograron obtener 16 macetas por bloque, que a cada una se les sembró 10 semillas de *Brachiaria brizantha*. Teniendo esto, se remojaron las semillas con agua y se procedió a la aplicación de las concentraciones establecidas en la Tabla 4 (Figura 12),

considerando que de acuerdo con (Soria, y otros, 2001, pág. 4), esto disminuye la pérdida de nutrientes. Y finalmente las macetas se cubrieron con hojas secas para evitar daños en la siembra (Figura 13).



Figura 9. Limpieza del terreno. Por Acosta & Carrillo, 2019.



Figura 10. Adecuación del área de estudio. Por Acosta & Carrillo, 2019.



Figura 11. Zona de estudio compuesta por los tres bloques. Por Acosta & Carrillo, 2019.



Figura 12. Aplicación de los bioensayos en cada maceta. Por Acosta & Carrillo, 2019.



Figura 13. Macetas cubiertas con hojas secas. Por Acosta & Carrillo, 2019.

9.3. Fase 3. Evaluación del rendimiento

9.3.1. Desarrollo del pasto

9.3.1.1. Mediciones de longitud, ancho, peso y raíz

El desarrollo del pasto se evidencio a través de su crecimiento el cual se expresó en la longitud (cm) y ancho (cm) de las hojas más representativas de la planta de cada bioensayo, reflejados en monitoreos (M) y seguimientos (S) establecidos cada 15 días durante 3 meses. En total se realizaron 6 M y S que comenzaron el 21 de marzo y terminaron el 18 de junio como se muestra en las Tablas de la 7 a la 12 y como se puede observar en las Figuras de las 14 a la 19.

Tabla 10. Longitud y ancho de hoja del pasto en el primer M y S en cm

21 de marzo - 4 de abril								
Bioensayo	Bloque #1		Bloque #2		Bloque #3		Media de largos	Media de anchos
	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho		
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	12,5	0,6	0	0	0	0	4,17	0,2
3	15,6	0,8	0	0	12,5	0,6	9,37	0,47
4	21	1,1	10,5	0,5	0	0	10,5	0,53
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	11	0,5	15	0,7	0	0	8,67	0,4
7	26,5	1,2	13,5	0,5	0	0	13,33	0,57
8	0	0	0	0	13,3	0,6	4,43	0,2
9	22	1,2	9,5	0,2	0	0	10,5	0,47
10	0	0	0	0	21,5	1,1	7,17	0,37
11	14	0,7	22,5	1	12	0,6	16,17	0,77
12	0	0	20	0,8	25,5	1,2	15,17	0,67
13	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	16,5	0,5	18,6	0,8	11,7	0,43
15	0	0	17	0,7	25,5	1,2	14,17	0,63
16	12	0,7	15,3	0,5	0	0	9,1	0,4

Nota: Tabla de relación de longitud y ancho de las hojas de la *Brachiaria brizantha* por bloques en el M y S del 4 de abril. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2019.



Figura 14. Primer M y S del cultivo de *Brachiaria brizantha*. Por Acosta & Carrillo, 2019.

Tabla 11. Longitud y ancho de hoja del pasto en el segundo M y S en cm

5 de abril - 19 de abril								
Bioensayo	Bloque #1		Bloque #2		Bloque #3		Media de largos	Media de anchos
	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho		
1	14	0,8	2,2	0,1	19,5	0,8	11,9	0,57
2	23,9	1	1,8	0,1	17,5	0,7	14,4	0,6
3	27,9	1,2	2,1	0,1	22,9	0,9	17,63	0,73
4	30,7	1,6	23,5	1,3	20	0,9	24,73	1,27
5	14,8	1,3	7,6	0,4	14,7	0,8	12,37	0,83
6	25,9	1,1	24,4	1	12,5	0,7	20,93	0,93
7	38,7	1,7	22,4	1,1	10,9	0,5	24	1,1
8	3,8	0,2	4,6	0,2	22,9	0,8	10,43	0,4
9	31,4	1,2	22,7	0,7	19,2	0,8	24,43	0,9
10	19,9	1	16,4	0,5	34	1,4	23,43	0,97
11	26	1,1	35,2	1,5	29,9	0,8	30,37	1,13
12	5,9	0,2	30,4	1,2	33,8	1,5	23,37	0,97
13	1,1	0,1	15,6	0,7	0	0	5,57	0,27
14	17,4	0,7	24,5	0,8	29,8	1	23,9	0,83
15	1,9	0,2	28,9	0,8	38,5	1,5	23,1	0,83
16	23,5	1	26,4	0,9	15,6	1,1	21,83	1

Nota: Tabla de relación de longitud y ancho de las hojas de la *Brachiaria brizantha* por bloques en el M y S del 19 de abril. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2019.



Figura 15. Segundo M y S del cultivo de *Brachiaria brizantha*. Por Acosta & Carrillo, 2019.

Tabla 12. Longitud y ancho de hoja del pasto en el tercer M y S en cm

20 de abril - 4 de mayo								
Bioensayo	Bloque #1		Bloque #2		Bloque #3		Media de largos	Media de anchos
	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho		
1	25	1	4,6	0,2	44,5	1,4	24,7	0,87
2	34,9	1,6	3,5	0,2	34,5	1,4	24,3	1,07
3	37,3	1,6	4,4	0,1	40,7	1,3	27,47	1
4	40	1,6	38,1	1,6	34	1,6	37,37	1,6
5	27,5	1,4	11,1	0,7	41	1,8	26,53	1,3
6	34,2	1,3	33,5	1,2	18	0,9	28,57	1,13
7	44,8	1,8	38,8	2	21,9	1	35,17	1,6
8	6	0,3	9,9	0,4	35,6	1,3	17,17	0,67
9	44,1	1,5	41,3	1,5	39	1,5	41,47	1,5
10	33,2	1,5	27,9	1	43,1	1,7	34,73	1,4
11	35,2	1,4	43,9	1,6	45,5	1,6	41,53	1,53
12	9	0,4	38	1,6	42,7	1,8	29,9	1,27
13	3,7	0,1	20,7	1,5	0	0	8,13	0,53
14	32,5	1	29,5	1,1	35,7	1,4	32,57	1,17
15	3,2	0,3	38	1,1	49,5	1,9	30,23	1,1
16	39,4	1,3	33,4	1,3	38,6	1,4	37,13	1,33

Nota: Tabla de relación de longitud y ancho de las hojas de la *Brachiaria brizantha* por bloques en el M y S del 4 de mayo. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2019.



Figura 16. Tercer M y S del cultivo de *Brachiaria brizantha*. Por Acosta & Carrillo, 2019.

Tabla 13. Longitud y ancho de hoja del pasto en el cuarto M y S en cm

5 de mayo - 19 de mayo								
Bioensayo	Bloque #1		Bloque #2		Bloque #3		Media de largos	Media de anchos
	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho		
1	35,7	1,9	0	0	52,2	2,1	29,3	1,33
2	61,2	2	7,9	0,2	41	2	36,7	1,4
3	55,5	2,1	0	0	54,3	1,9	36,6	1,33
4	61	2,3	56,9	2	57,3	1,9	58,4	2,07
5	53	2,2	19,2	1,1	54,3	1,8	42,17	1,7
6	55,4	1,7	44,5	2	32	1,7	43,97	1,8
7	57,8	2,3	51,5	2,3	33,7	1,6	47,67	2,07
8	10,5	0,3	14,5	2,3	56,7	2,1	27,23	1,57
9	63,6	2,2	48,9	2	50,9	1,9	54,47	2,03
10	57,1	2	35	1,3	61,5	2,1	51,2	1,8
11	53,7	2	58,2	2	53,9	2	55,27	2
12	9,3	0,5	60	2	66	2	45,1	1,5
13	5	0,3	50,5	2,2	3,5	0,1	19,67	0,87
14	41,6	2	42,1	1,8	51,9	2,1	45,2	1,97
15	5,5	0,3	50	2	60,5	2	38,67	1,43
16	46,2	2	49,1	1,8	52,6	1,7	49,3	1,83

Nota: Tabla de relación de longitud y ancho de las hojas de la *Brachiaria brizantha* por bloques en el M y S del 19 de mayo. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2019.



Figura 17. Cuarto M y S del cultivo de *Brachiaria brizantha*. Por Acosta & Carrillo, 2019.

Tabla 14. Longitud y ancho de hoja del pasto en el quinto M y S en cm

20 de mayo - 3 de junio								
Bioensayo	Bloque #1		Bloque #2		Bloque #3		Media de largos	Media de anchos
	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho		
1	58	2,2	0	0	76,5	2,4	44,83	1,53
2	77,3	2,4	10	0,5	67,2	2,3	51,5	1,73
3	76,2	2,5	0	0	73,9	2,3	50,03	1,6
4	76,2	2,5	68,3	2,3	70,1	2,4	71,53	2,4
5	71,1	2,6	28,5	1,4	69,5	2,2	56,37	2,07
6	69,5	2,3	59,2	2,6	58,4	2	62,37	2,3
7	77,5	2,7	68	2,7	56,2	2,2	67,23	2,53
8	22	0,5	18,5	2,4	76,2	2,6	38,9	1,83
9	78,3	2,6	65,7	2,4	70,1	2,3	71,37	2,43
10	76	2,5	59,3	2	76,1	2,5	70,47	2,33
11	72,4	2,4	73	2,5	70	2,4	71,8	2,43
12	12	0,6	77,2	2,5	77	2,5	55,4	1,87
13	8,5	0,5	67	2,6	8,5	0,3	28	1,13
14	59,5	2,4	61,3	2,3	69	2,4	63,27	2,37
15	0	0	65,9	2,4	74,4	2,1	46,77	1,5
16	69	2,5	68,2	2,3	70,1	2,2	69,1	2,33

Nota: Tabla de relación de longitud y ancho de las hojas de la *Brachiaria brizantha* por bloques en el M y S del 3 de junio. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2019.



Figura 18. Quinto M y S del cultivo de *Brachiaria brizantha*. Por Acosta & Carrillo, 2019.

Tabla 15. Longitud y ancho de hoja del pasto en el sexto M y S en cm

4 de junio - 18 de junio								
Bioensayo	Bloque #1		Bloque #2		Bloque #3		Media de largos	Media de anchos
	Largo	Ancho	Largo	Ancho	Largo	Ancho		
1	89	2,6	9	0,3	91,5	2,7	63,17	1,87
2	87,7	3	13,5	0,6	84,5	3	61,9	2,2
3	89,5	3,2	0	0	88,5	2,8	59,33	2
4	87	2,8	87	3	84	2,8	86	2,87
5	89	2,8	0	0	85,5	2,4	58,17	1,73
6	77,2	2,9	70,5	2,5	71	2,2	72,9	2,53
7	93,8	3	84,5	2,7	73	2,6	83,77	2,77
8	22	0,5	21	0,6	85	2,9	42,67	1,33
9	87	2,7	89	2,7	83,5	2,4	86,5	2,6
10	88,4	2,9	77	2,7	93	2,7	86,13	2,77
11	90	2,8	86,4	2,9	86	2,7	87,47	2,8
12	19	0,6	85	3	83	2,6	62,33	2,07
13	15,5	0,6	87,5	2,7	16	0,4	39,67	1,23
14	80,3	2,6	79	2,5	78,5	2,6	79,27	2,57
15	0	0	89	2,8	87,6	2,3	58,87	1,7
16	86,5	2,8	89,5	2,7	81,5	2,4	85,83	2,63

Nota: Tabla de relación de longitud y ancho de las hojas de la *Brachiaria brizantha* por bloques en el M y S del 18 de junio. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2019.



Figura 19. Sexto M y S del cultivo de *Brachiaria brizantha*. Por Acosta & Carrillo, 2019.

Al culminar los tres meses establecidos logrando el crecimiento total del pasto, en el M y S del 18 de junio se evaluaron adicionalmente las variables de peso (g) y longitud de raíz (cm) con el fin de obtener una caracterización del crecimiento más completa. En las Tablas 13 y 14 se muestran los datos obtenidos.

Tabla 16. *Peso del pasto en su crecimiento total en g*

Peso total del pasto en gramos				
Bioensayo	Bloque #1	Bloque #2	Bloque #3	Media peso
1	1380	15	1755	1050
2	2460	195	1675	1443
3	2317	0	1412	1243
4	3390	260	1950	1867
5	2115	0	620	912
6	1885	935	405	1075
7	1941	1190	685	1272
8	95	140	865	367
9	1641	1628	885	1385
10	1685	637	2350	1557
11	1821	1337	1724	1627
12	80	2045	1030	1052
13	145	1100	60	435
14	984	822	989	932
15	0	915	885	600
16	975	1033	841	950

Nota: Tabla de peso de la *Brachiaria brizantha* por bloques en el M y S del 18 de junio. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2019.

Tabla 17. Longitud de raíz del pasto en su crecimiento total en cm

Longitud raíz de la planta en centímetros				
Bioensayo	Bloque #1	Bloque #2	Bloque #3	Media raíz
1	29	15	31	25,0
2	33	9,5	45	29,2
3	31,5	0	28	19,8
4	36,5	31,5	32	33,3
5	20,5	0	31	17,2
6	29,5	25,5	27	27,3
7	26	30	28	28,0
8	9	3,5	28	13,5
9	29	28	32	29,7
10	27	38	29	31,3
11	31	34	30	31,7
12	7	43	33	27,7
13	16	23	8	15,7
14	26	31	28	28,3
15	0	27	30	19,0
16	23	35	29	29,0

Nota: Tabla de longitud de raíz de la *Brachiaria brizantha* por bloques en el M y S del 18 de junio. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2019.

En torno al análisis, el desarrollo de una planta se puede evaluar por medio de su de crecimiento que se expresa a través de cualquier variable válida. El análisis de crecimiento se aplica a plantas cultivadas o unidades de vegetación homogéneas como lo son los pastizales (Lallana & Lallana, 2004, pág. 8), el crecimiento de estas especies se refiere a una aproximación cuantitativa del incremento irreversible de materia seca o volumen, cambios en tamaño, masa, forma y/o número, como una función del genotipo y el complejo ambiental, dando como resultado un aumento cuantitativo del tamaño (largo) y biomasa (peso) de la planta bajo condiciones ambientales naturales o controladas (Castellano, Segura, & Nústez, 2010, pág. 1).

9.3.1.2. Frecuencia de los datos

Con el fin de determinar cuáles fueron los bioensayos que presentaron un mejor desarrollo tomando como variables de significancia el peso y la longitud se elaboró tablas de frecuencias, las cuales se construyeron a partir de la distribución de la media de estas variables en el último M y S que se encuentran en las Tablas 12 y 13, donde el valor mínimo del peso fue de 367 g y de la longitud 39,67 cm y el máximo del peso fue de 1867 g y de la longitud 87,47 cm (Tabla 15 y 16).

Tabla 18. *Tabla de frecuencia de peso del ultimo S y M*

Clases en gramos	Marca de clase	Frecuencia Absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia absoluta acumulada
367-667	517	3	0,1875	2
667-967	817	3	0,1875	6
967-1267	1117	4	0,25	10
1267-1567	1417	4	0,25	14
1567-1867	1717	2	0,125	16
Total	-	16	1	-

Nota: Tabla de frecuencia compuesta por la media de los pesos presentadas por la *Brachiaria brizantha* en el M y S del 18 de junio. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2020.

Tabla 19. *Tabla de frecuencia de longitud del ultimo S y M*

Clases en centímetros	Marca de clase	Frecuencia Absoluta	Frecuencia relativa	Frecuencia absoluta acumulada
39,5-49,5	44,5	2	0,125	2
49,5-59,5	54,5	3	0,187	5
59,5-69,5	64,5	3	0,187	8
69,5-79,5	74,5	2	0,125	10
79,5-89,5	84,5	6	0,375	16
Total	-	16	1	-

Nota: Tabla de frecuencia compuesta por la media de las longitudes presentadas por la *Brachiaria brizantha* en el M y S del 18 de junio. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2020.

En la Tabla 15, se logró establecer que la tercera y cuarta clase, fueron las que presentaron la mayor frecuencia de los datos, sobresaliendo la cuarta ya que presentó los mejores pesos respecto a la otra, en la cual se encontraban los bioensayos 2, 7, 9 y 10. Sin embargo, la última clase en la que se expresó los intervalos de 1.567 g y 1.867 g fue en la que se evidenció los mejores pesos a nivel general, donde se encontraban los bioensayos 4 y 11, los cuales fueron denominados como los sobresalientes. Por otro lado, en la Tabla 16, se logró determinar que la última clase, la cual pertenece a los intervalos de 79,5 cm y 89,5 cm fue la que presentó la mayor frecuencia de los datos y adicionalmente mostró las mejores longitudes. Por ello, los bioensayos 4, 7, 9, 10, 11, y 16 fueron los sobresalientes porque tuvieron un buen crecimiento.

En relación a lo anteriormente descrito dado por las Tablas 15 y 16 se pudo evidenciar que los bioensayos que tuvieron los mejores rendimientos asociados a su crecimiento, se encuentran homogéneos en las dos variables (peso y largo), siendo estos, el 4, 7, 9, 10 y 11, con la diferenciación que en el peso el bioensayo 2 estaba incorporado, pero en la longitud, no y del mismo modo, en la longitud se encontraba el 16, mientras que, en el peso, no. Sin embargo, el 16

(el blanco) se tomó junto con los mencionados por su significancia y se analizaron en términos de longitudes ya que se tenían datos en todos los M y S ver Tabla 17.

Tabla 20. *Media de longitudes de bioensayos significativos*

Mejores bioensayos en altura						
Bioensayo	Primer M y S	Segundo M y S	Tercer M y S	Cuarto M y S	Quinto M y S	Sexto M y S
4	10,50	24,73	37,37	58,40	71,53	86,00
7	13,33	24,00	35,17	47,67	67,23	83,77
9	10,50	24,43	41,47	54,47	71,37	86,50
10	7,17	23,43	34,73	51,20	70,47	86,13
11	16,17	30,37	41,53	55,27	71,80	87,47
16	9,10	21,83	37,13	49,30	69,10	85,83

Nota: Tabla de medias de las longitudes de los bioensayos más significativos por cada M y S realizado. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2020.

De acuerdo a la anterior tabla, se pudo identificar de manera general que estos bioensayos tuvieron un buen comportamiento en cuanto a su crecimiento en la longitud, ya que los datos en cada uno de los M y S fueron los mayores. Por otro lado, el bioensayo 11 fue el que presentó los datos más relevantes debido a que mantuvo longitudes superiores respecto a los demás en los M y S realizados, exceptuando el cuarto dado que la longitud mayor se situó en el bioensayo 4, sin embargo, en ese M y S su longitud fue la segunda mejor. Además, en contraste con el peso, como se mencionó a partir de la Tabla 15 el bioensayo 4 junto con el 11, fueron los que presentaron los mejores pesos, ya que, al existir un aumento en el tamaño, también existió un aumento de biomasa, que por lo general ocurre en los casos en que la planta se origina a partir de la semilla (Lallana & Lallana, 2004, pág. 2). Por ello, se pudo determinar que el bioensayo 11, el cual estaba compuesto por 150 ml de efluente y 375 g de abono orgánico, fue el que tuvo un mejor rendimiento.

9.3.1.3. Relación de significancia

Con el propósito de establecer la causal del comportamiento sobresaliente del bioensayo 11, este se relacionó con el bioensayo 16 el cual contenía 0 ml de efluente y 0 g de abono orgánico, es decir, con el blanco mediante una curva de crecimiento ver Figura 20.

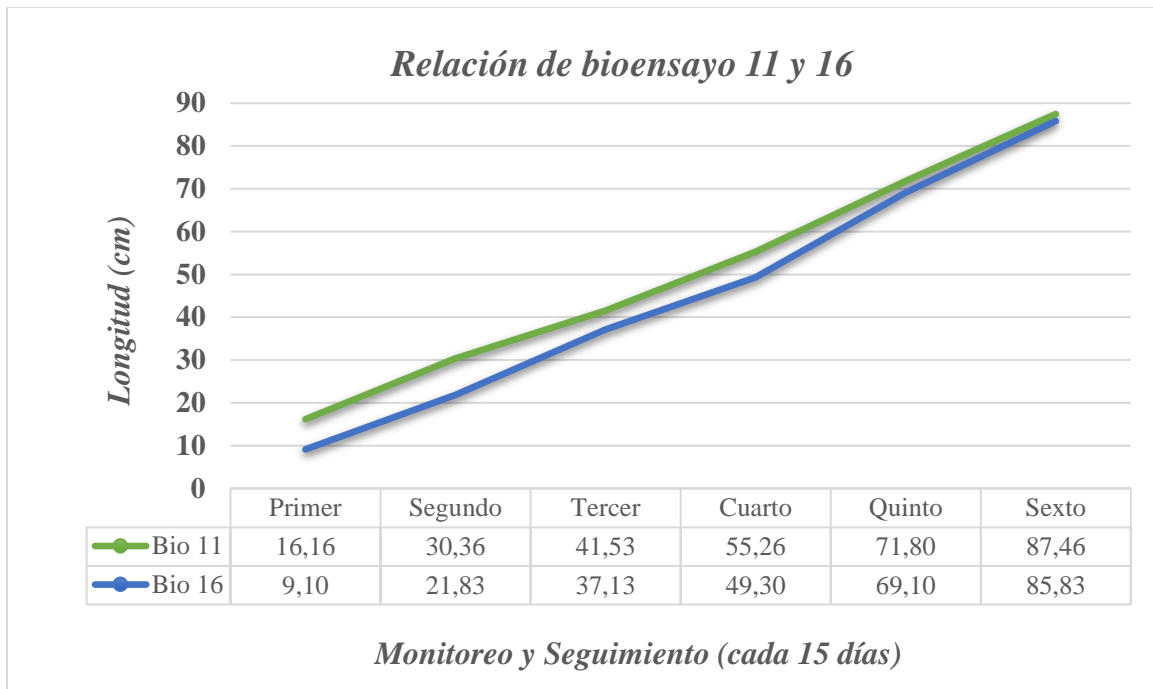


Figura 20. *Relación Bioensayo 11 y 16. Por Carrillo & Acosta, 2020.*

La Figura 20 representa el crecimiento lineal de los bioensayos 11 y 16, donde las rectas crecen con pendiente de 14 cm aproximadamente. De manera teórica el crecimiento de las plantas en sus parámetros externos, es decir, en la altura y peso, se representan en una gráfica que muestra una curva denominada como Sigmoide (Campos, Atondo, & Yee, 2016, págs. 1-2) cómo se puede ver en la Figura 21. Esta curva expresa el aumento del tamaño de la planta en función del tiempo y consta de tres fases características: En la primera se produce un incremento de forma exponencial, donde el crecimiento ocurre con la máxima intensidad, aquí predomina la división celular, y aumenta el peso. La segunda se caracteriza por tener un crecimiento de forma lineal, donde ocurren aumentos en la longitud, volumen y números de células. Y la tercera corresponde al envejecimiento de la planta, donde el crecimiento es lento o en algunas ocasiones desacelerado. Esta curva como se mencionó, es teórica ya que se da en algunos casos, pero muy poco frecuente, lo normal es obtener aproximaciones de la misma (Lallana & Lallana, 2004, pág. 7) cómo se evidencia en la Figura 20 en la cual se toman los datos del mejor bioensayo y el blanco.

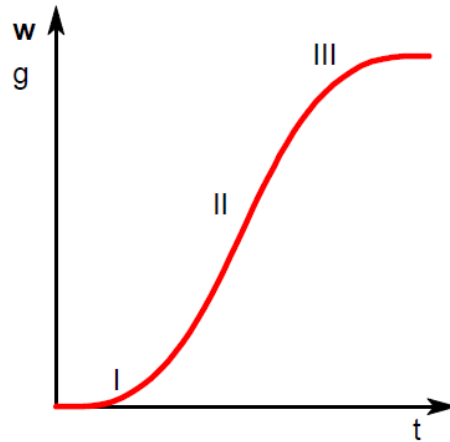


Figura 21. *Curva Sigmoide del crecimiento de plantas.* Por (Lallana & Lallana, 2004, pág. 6).

Por otro lado, aunque el bioensayo 16 no contenía el producto objeto de estudio ni el abono orgánico, presentó un buen crecimiento en términos de longitud de las hojas del pasto, en contraste al bioensayo 11 que se denominó como el de mejor rendimiento, debido que la variación en centímetros fue poca, además como se expresó en la Tabla 17, fue uno de los sobresalientes por su mayor crecimiento en todos los M y S. Por esto, se determinó que las concentraciones establecidas del abono y el efluente fueron condicionantes, junto los procesos fisiológicos complejos mayormente, que depende directamente de la fotosíntesis, la respiración, la división celular, la elongación, la diferenciación y que además están sujetos a factores como temperatura, intensidad de luz, densidad poblacional, calidad de semilla, disponibilidad de agua y de nutrientes en el suelo (Barrera, Suárez, & Melgarejo, 2010, pág. 1) para el buen crecimiento del pasto.

9.3.2. Correlación de Pearson

En el coeficiente de correlación se emplearon las medias del último M y S de las variables del desarrollo del pasto, es decir, de la longitud, ancho, peso, y longitud de raíz y las concentraciones de efluente y bioabono establecidas, ver Tabla 18.

Tabla 21. *Datos para análisis de coeficiente de correlación*

Efluente (ml)	Abono (g)	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Peso (g)	Raíz (cm)
300	0	63,17	1,87	1050	25
150	0	61,9	2,2	1443	29,2
60	0	59,33	2	1243	19,8
0	750	86	2,87	1867	33,3
0	375	58,17	1,73	912	17,2
0	150	70,9	2,53	1075	27,3
300	750	83,77	2,77	1272	28
300	375	42,67	1,33	367	13,5
300	150	86,5	2,6	1385	29,7
150	750	86,13	2,77	1557	31,3
150	375	87,47	2,8	1627	31,7
150	150	62,33	2,07	1052	27,7
60	750	39,67	1,23	435	15,7
60	375	79,27	2,57	932	28,3
60	150	58,87	1,7	600	19
0	0	85,83	2,63	950	29

Nota: Tabla de los datos utilizados para hallar el coeficiente de correlación de cada variable. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2019.

Los datos expresados en la Tabla 18, permitieron obtener el coeficiente de correlación por las variables estudiadas, donde se encontraron valores que oscilaron entre -1 y 1, el cual es el rango establecido para los resultados en esta correlación (Tabla 19).

Tabla 22. *Coefficiente de correlación de Pearson por variables*

	Efluente	Abono	Longitud	Ancho	Peso	Raíz
Efluente	1					
Abono	0	1				
Largo	-0,001528	0,133845	1			
Ancho	-0,055699	0,150122	0,968386	1		
Peso	0,001796	0,130938	0,759513	0,816504	1	
Raíz	0,006641	0,054738	0,887777	0,925356	0,841457	1

Nota: Tabla de los resultados obtenidos por el coeficiente de correlación de Pearson para cada variable. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2020.

Entre los índices de correlación frecuentemente utilizados para estudios ecológicos que incluyan variables como peso y altura, se encuentra el coeficiente de correlación de Pearson, en el cual se utilizan variables cuantitativas para evaluar el grado de asociación lineal entre dos variables X y Y (Camacho, 2008, págs. 1-2). El coeficiente es una covarianza, calculada con datos

estandarizados, que introduce la media y desviación estándar de las distribuciones de frecuencia de los datos de las variables comparadas (Bravo, Rodríguez, & Hernández, 2000, pág. 57), por esto, se describen los valores mostrados en la Tabla 19, donde se evidenció que el efluente líquido no arrojó ninguna correlación con el desarrollo del pasto, ya que los valores oscilaron entre -0,001528 y 0,006641; sin embargo, también se puede considerar que aunque el valor es 0 no necesariamente, indica que no exista una correlación, ya que las variables pudieron presentar una relación, pero no lineal (Díaz & Fernández, 2002, pág. 1). Por tanto, no solo se puede expresar que el efluente con la longitud, el ancho, peso, y raíz son variables independientes. Por otro lado, el abono orgánico presentó una correlación directa, pero, débil en las variables de largo, ancho y peso, debido a que los valores fluctuaron entre 0,133845 y 0,150122, y en la raíz la correlación directa fue más débil ya que presenta un valor inferior (Pedroza & Dicovalskyi, 2006, pág. 56).

De manera general el coeficiente debió ser positivo, si existía una relación directa entre las variables esto, si las dos aumentaban al mismo tiempo, negativa, si la relación era inversa, es decir, cuando una variable disminuía y la otra aumentaba, o nula, si no había una relación lineal entre las variables o estas eran independientes (Díaz & Fernández, 2002, pág. 1), por ello se estableció que el efluente en relación a las variables del desarrollo del pasto, fue cero, porque no presentó ninguna relación, ya que las variables no estuvieron correctamente relacionadas, mientras que el abono orgánico presentó una relación directa débil con las variables del desarrollo del pasto, porque al haber un aumento en sus concentraciones, algunas variables tuvieron incrementos en sus medidas.

Por otro lado, se identificó que las variables del desarrollo del pasto tuvieron de manera común un coeficiente positivo. En la longitud y el ancho del pasto existió una correlación directa casi perfecta ya que, el valor fue de 0,968386 lo cual se corroboró, porque a medida que una aumentaba, lo otra también lo hacía, y por esto, los bioensayos que sobresalieron por su longitud fueron los mismos que lo hicieron en su ancho. Además, en cuanto al peso y la longitud de la raíz se estableció que hubo una correlación directa puesto que dio un valor de 0,841457 y esto se dio por lo descrito en la relación de las dos variables anteriormente mencionadas, tan solo con menor frecuencia.

9.3.3. Variación de las condiciones del suelo

Debido a que el bioensayo 11 fue el que presentó el mejor crecimiento durante todo el estudio, se pudo identificar las variaciones de las propiedades físico-químicas del suelo y la influencia de su

concentración establecida en la Tabla 4. A este se le realizó nuevamente un análisis de los parámetros expresados en la Tabla 1 del apartado 8.1.1.2, cómo se puede observar en la Tabla 20.

Tabla 23. *Variación de condiciones del suelo en el bioensayo 11*

Parámetro	Valor inicial	Valor final
Densidad aparente	1,84 g/cm ³	1,62 g/cm ³
Densidad real	2,01 g/cm ³	2,31 g/cm ³
Conductividad eléctrica	0,12 ds/m	0,35 ds/m
pH	4,9 a 26°C	4,9 a 26°C
Humus	1 unidad de color	1 unidad de color
Fósforo	12,5 ppm	37,5 ppm

Nota: Tabla de las variaciones de las propiedades físico-químicas del suelo en relación al bioensayo 11. Elaborado por Carrillo & Acosta, 2020.

En la anterior tabla, se presentaron alteraciones en algunos parámetros, como lo fueron en la densidad aparente la cual obtuvo un valor inicial de 1,84g/cm³ disminuyendo a 1,62 g/cm³ mientras que la porosidad la cual es una variable que se encuentra estrechamente relacionada aumentó a 29,87% ya que la inicial fue de 8,45%, esto se presentó debido a que la densidad aparente se ve afectada por las partículas sólidas y por el espacio poroso, el cual a su vez está determinado principalmente por la materia orgánica del suelo. A medida que aumenta la materia orgánica y el espacio poroso, disminuye la densidad aparente y viceversa (Salamanca & Sadeghian, 2005, pág. 2). Por otro la densidad real es más constante a diferencia de la densidad aparente ya que esta depende la estructura del suelo, y de sus características de retracción y expansión, lo que a su vez está sujeto al contenido de arcilla y a la humedad del suelo. Además, cuando se habla de suelos extremadamente compactados, la densidad aparente sigue siendo menor que la densidad real porque las partículas nunca llegan a entrelazarse perfectamente (Ingaramo, Ferreiro, Miras, & Vázquez, 2007, pág. 3). En referencia a lo mencionado en el presente estudio se evidencia el mismo comportamiento, ya que la densidad real inicial fue de 2,01 g/cm³ y aumentó a 2,31 g/cm³.

La conductividad eléctrica inicial fue de 0,12 ds/m y finalizó con 0,35 ds/m aumentando significativamente, conjuntamente con el fósforo el cual aumentó 25 ppm teniendo como dato inicial 12,5 ppm, el incremento que se presentó en estos dos parámetros dependió de las características propias del efluente líquido, ya que al aplicarlo se adicionaron sales solubles y P, como indicó su caracterización físico-química. Sin embargo, los valores de conductividad eléctrica se mantuvieron por debajo del nivel umbral crítico para los cultivos, ya que los valores que se

encuentran entre 0 y 2 ds/m hacen referencia a suelos no salinos y su efecto en el suelo es imperceptible (Martínez, 2018, pág. 11).

El valor de humus permaneció constante antes y después de la aplicación del efluente, su resultado fue de 1, lo cual nos indica que su presencia en el suelo fue baja e influyó directamente en el pH, ya que interviene en sus procesos de regulación (López & Estrada, 2015, pág. 6), por lo anterior el pH no presentó cambios. Además, los suelos que presentan una mayor capacidad tampón, tienen una posibilidad de alteración del pH mínima por la aplicación de efluentes líquidos porcinos (Alesso, y otros, 2014, pág. 9).

10. Discusión

El efluente líquido tiene un gran valor al ser un residuo orgánico bioprocesado, este se puede establecer en función de sus propiedades físico-químicas las cuales dependen de las características físico-químicas de las materias primas que les dieron origen: El contenido de materia orgánica, los nutrientes totales disponibles, el contenido de sales solubles y pH, son los parámetros que permiten identificar su importancia (Varnero, 2011, pág. 69). Por esto, se determinó que el efluente líquido obtenido por el biodigestor de la Reserva Cosmopolitana, tiene un valor importante ya que sus características permitieron utilizarlo como acondicionador del suelo, lo que permitió brindarles información para mitigar la inadecuada disposición que se les da. Sin embargo, este pudo contener mejores características que contribuyan principalmente a aportar mayor cantidad de nutrientes al suelo y así mejorar la calidad del mismo (Ciro et al, 2007, pág. 7) y a su vez, la asimilación de estos por el pasto *Brachiaria brizantha* para obtener un buen crecimiento uniforme. La razón por la cual, el efluente no contaba con las mejores características se debió a que la materia prima, es decir, las excretas porcinas que eran suministrada al biodigestor no eran suficientes para producir un efluente de excelente calidad, lo cual ocurrió por la baja cantidad de ganado porcino con la que contaba la Reserva en sus corrales.

El uso del efluente no sólo aumenta la producción de los cultivos por su función como fertilizante ya que tiene mayor capacidad que el estiércol fresco debido a que el nitrógeno es convertido a amonio, el cual es transformado en nitratos (Sistema Biobolsa, 2015, pág. 3) sino también contribuye a generar un sistema sustentable, ya que mejora las condiciones físicas, químicas y biológicas de los suelos (Sosa, 2017, pág. 2). Sin embargo, la utilización de los efluentes debe ser una alternativa a largo plazo para que los aportes sean vistos en gran medida. Debido a que la aplicación del efluente se realizó una única vez, la cual se llevó a cabo al finalizar la adaptación de la zona de estudio junto con la siembra de las semillas, está generó un aumento, si bien, propio en el crecimiento del pasto *Brachiaria brizantha* expresado en sus características foliares de largo, ancho, peso y raíz y algunas variaciones en las propiedades físico-químicas del suelo, que reflejaron un mejoramiento mínimo en la condiciones del suelo como lo fue en la conductividad eléctrica, fósforo, densidad real y aparente.

El coeficiente de correlación permite determinar si existe una relación lineal directa entre dos variables, si las dos aumentan al mismo tiempo, además, la relación inversa de las mismas, si una disminuye y la otra aumenta (Díaz & Fernández, 2002, pág. 1). Debido a que el efluente no presentó ninguno de los fenómenos anteriormente mencionados con las variables del crecimiento del pasto, se determinó que estuvieron incorrectamente relacionadas, al no existir ninguna relación lineal directa entre ellos, mientras que el abono orgánico sí presentó uno de estos fenómenos, ya que al aumentar en su cantidad, aumentaba las medidas de las variables del crecimiento del pasto, por lo que existió una relación lineal, además, todas las variables del desarrollo del pasto, aumentaron homogéneamente, lo que reflejó una relación directa.

11. Conclusiones

- El pH con 7,44, ST con 0,08%, SV con 36,58%, N total con 1.350 mg/L, NO₃ con 1.268 mg/L, NO₂ con 6 mg/L y CE con 1.977 μS/cm, son concentraciones características según referentes que han estudiado este mismo tipo de efluentes porcinos, debido a que los datos se encontraban entre rangos o valores cercanos establecidos. Sin embargo, las concentraciones de DQO con 307,85 mg/L y P con 25,59 mg/L fueron bajas lo que evidenció deficiencia en la carga orgánica al biodigestor, por tanto, una subutilización.
- La aplicación del efluente no afectó el pH ni el humus del suelo, debido que estos fueron de 4,9 y 1 respectivamente, sin embargo, generó un aumento en la CE, ya que pasó de 0,12 ds/m a 0,35 ds/m, la Dr de 2,01 g/cm³ a 2,31 g/cm³, y en particular en el P que es uno de los nutrientes más escasos en el suelo, incremento de 12,5 ppm a 37,5 ppm. También produjo una disminución en la Da ya que pasó de 1,84g/cm³ a 1,62 g/cm³. Por lo que se determina que las variaciones influyeron para que el pasto tuviera un buen crecimiento.
- Se logró identificar a través del bioensayo 11, el cual estaba compuesto por 150 efluente / 375 abono orgánico, que esta combinación fue la de mayor significancia ya que contribuyo al mejor crecimiento en el pasto *Brachiaria brizantha* en sus características foliares de largo y peso en todos los M y S.
- Se determinó mediante el coeficiente de correlación de Pearson que las concentraciones del efluente no presentaron ninguna asociación lineal directa entre las variables del crecimiento (longitud, ancho, peso y raíz) ya que los valores oscilaron entre -0,001528 y 0,006641, mientras que el abono orgánico presentó una asociación directa, pero con muy baja magnitud, debido a que los valores fluctuaron entre 0,133845 y 0,150122.

12. Recomendaciones

Para futuros estudios que deseen realizar, en relación al presente trabajo, o continuar con el mismo:

- Se recomienda, que a la hora de utilizar un efluente líquido porcino generado por un biodigestor, se debe tener en cuenta que el biodigestor se encuentre suficientemente abastecido por la materia prima, que se relaciona con la cantidad de ganado porcino, ya que de esto depende de que las características del efluente sean mejores.
- Se sugiere realizar una aplicación periódica del efluente en el cultivo, puede ser en monitoreos y seguimientos cada 15 días, debido a que se va a obtener un resultado más eficiente como acondicionadores para el suelo y así obtener un aumento en la producción de los cultivos.
- Se propone controlar factores externos mediante la mejor adecuación de la zona de estudio al realizar la plantación, donde se puede implementar un sistema de riego, los cuales facilitan que el área de estudio cuente con el agua necesaria para su desarrollo, también implementar una cubierta que permita evitar afectaciones al cultivo por el clima y diseñar un cercamiento de los bloques para controlar la intervención de sujetos ajenos al estudio.

Referencias

- Acosta, Y., & Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 35-48. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>
- Acuña, A., Pucci, O., & Pucci, G. (2008). Caracterización de un proceso de biorremediación de hidrocarburos en deficiencia de nitrógeno en un suelo de Patagonia Argentina. *Ecosistemas*, 17(2), 85-93. Obtenido de <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:KsV9J53HY0EJ:https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/download/474/453+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>
- Aguirre, A. (26 de Agosto de 2009). El manejo de la conductividad electrica en fertirriego. Saltillo: Centro de Investigacion en Química Aplicada. Obtenido de <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/344/1/Alberto%20Aguirre%20Hernandez.pdf>
- Alesso, C., Carrizo, M., Girello, G., Capeletti, M., Micheloud, H., & Imhoff, S. (2014). Rendimiento de maíz y cambios en propiedades edáficas luego de la aplicación de efluentes líquidos porcinos. *Fave-Ciencias Agrarias*, 13(1-2), 30-40. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/80362892.pdf>
- Almudena, A., & Lizaso, J. (15 de Enero de 2001). Nitritos, Nitratos y Nitrosaminas. Madrid: Fundacion Iberica para la Seguridad Alimentaria. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/46280964/13181019_nitritos_nitratos.pdf?1465225290=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DFUNDACION_IBERICA_PARA_LA_SEGURIDAD_ALIM.pdf&Expires=1594455070&Signature=HisDoRA0Gytkk8I7OHER9QPAJTkEfNS-qb290s~qk
- Andrades, M., & Martínez, M. (2014). Fertilidad del suelo y parámetros que la definen. Logroño: Iberius. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=267902>

- Aparcana, S., & Jasen, A. (01 de Diciembre de 2008). Estudio sobre el valor fertilizante de los productos del proceso fermentación anaeróbica para producción de biogás. Lima: German Profec. Obtenido de http://www.german-profec.com/cms/upload/Reports/Estudio%20sobre%20el%20Valor%20Fertilizante%20de%20los%20Productos%20del%20Proceso%20Fermentacion%20Anaerobica%20para%20Produccion%20de%20Biogas_ntz.pdf
- Arévalo, J., & Zambrano, L. (08 de Noviembre de 2007). Implementación de un sistema autosostenible en la granja agropecuaria del municipio de Cogua para el tratamiento de los vertimientos líquidos porcícolas. *Trabajo de grado*. Universidad de la Salle. Obtenido de https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1581&context=ing_ambiental_sanitaria
- Argandoña, L., & Macias, R. (2013). Determinación de sólidos totales, suspendidos, sedimentados y volátiles, en el efluente de las lagunas de oxidación situadas en la parroquia colón, cantón Portoviejo, provincia de Manabí, durante el periodo de marzo a septiembre 2013. *Trabajo de grado*. Universidad Técnica de Manabí. Obtenido de <http://repositorio.utm.edu.ec/bitstream/123456789/137/1/DETERMINACION%20DE%20SOLIDOS%20TOTALES%2C%20SUSPENDIDOS%2C%20SEDIMENTADOS%20Y%20VOLATILES.pdf>
- Barrera, J., Suárez, D., & Melgarejo, L. (2010). Análisis de crecimiento de las plantas. Bogotá DC: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de https://d1wqtxs1xzle7.cloudfront.net/60524808/Analisis_de_crecimiento20190908-86111-723nu4.pdf?1567955859=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DII._ANALISIS_DE_CRECIMIENTO_EN_PLANTAS_M.pdf&Expires=1594456915&Signature=YQH1najl9RFOzLhvKkkOYia
- Barrios, M., Sandoval, E., Camacaro, O., & Borges, J. (2010). Importancia del fosforo en el complejo suelo-animal. *Producción animal*, 6(2), 151-156. Obtenido de http://produccion-animal.com.ar/suplementacion_mineral/133-foforo_suelo.pdf
- Bastidas, J. (24 de Octubre de 2019). Evaluación de un proceso de fermentación con microorganismos de montaña, como postratamiento para efluente producido en un

- biodigestor anaerobio. *Trabajo de grado*. Universidad Central del Ecuador. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/20563/1/T-UCE-0012-FIG-175.pdf>
- Blanco, J. (09 de 03 de 2020). Acondicionadores y mejoradores del suelo. Cucuta: Instituto Colombiano Agropecuario. Obtenido de http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4858/2/2006718153746_Acondicionadores%20y%20mejoradores%20de%20suelo.pdf
- Bogotá, J., Díaz, S., & Ramos, P. (04 de Febrero de 2009). Montaje y puesta en marcha de dos biodigestores anaerobios con residuos orgánicos en la central de mercado "Plaza Kennedy" en Bogota. *Trabajo de grado*. Universidad Manuela Beltrán. Obtenido de https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=4064
- Botero, R., & Preston, T. (1987). Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. 20. Costa Rica: Centro Internacional de Agricultura Tropical. Obtenido de <http://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/04-biodigestores.pdf>
- Bravo, E., Rodríguez, M., & Hernández, S. (2000). *Coefficientes de asociación*. México DF: Plaza y Valdés. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=hitW9gbEGwoC&printsec=frontcover&dq=inauthor:%22Mar%C3%ADa+Elena+Rodr%C3%ADguez+Salazar%22&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiJ7v7c3sTqAhXCT98KHUuaD20Q6AEwAHoECAAQA#v=onepage&q&f=false>
- Bustillos, Y. (19 de Julio de 2017). Evaluación de la eficiencia y funcionamiento del biodigestor anaerobio de flujo continuo en la "Granja Porcina Carlitos". *Trabajo de grado*. Universidad Técnica de Cotopaxi. Obtenido de <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/4229/1/UTC-PC-000168.pdf>
- Camacho, J. (2008). Asociación entre variables cuantitativas: análisis de correlación. *Acta medica costarricense*, 50(2), 94-96. Obtenido de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-60022008000200005

- Campos, P., Atondo, G., & Yee, C. (2016). Dinámica lineal para el crecimiento de plantas y frutos con simetría definida. *Latin-American Journal of Physics Education*, 10(3), 1-6. Obtenido de <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:buM7eRtSPNwJ:https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6001926.pdf+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>
- Castellano, M., Segura, M., & Núñez, C. (2010). Análisis de crecimiento y relación fuente-demanda de cuatro variedades de papa. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 63(1), 5253-5266. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v63n1/a04v63n01.pdf>
- Castellanos, A., Salazar, G., Hernández, P., Domínguez, G., & Barrera, G. (Julio de 2010). Uso de ensilado de cerdaza en la alimentación animal. Jalisco: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Obtenido de <https://docplayer.es/39954731-Uso-de-ensilado-de-cerdaza-en-la-alimentacion-animal.html>
- Cevallos, W., & Hidalgo, K. (Noviembre de 2013). Estimación del potencial energético a partir del metano producido por las aguas residuales procedentes de la granja porcina de Zamorano. *Trabajo de grado*. Escuela Agrícola Panamericana. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/1782/1/IAD-2013-T012.pdf>
- Chávez, E., Gonzáles, J., & Gonzáles, G. (2016). Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenca alta del Rio Nazas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1), 21-32. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v3n1/v3n1a2.pdf>
- Ciro, H., González, H., & Osorio, J. (2007). Evaluación de un sistema de biodigestión en serie para clima frío. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 60(2), 4145-4162. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24464/25056>
- Combatt, E., Barrera, J., & Ramírez, Y. (2011). Efecto de abonos orgánicos sobre el crecimiento y producción del plátano Hartón (Musa AAB). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 5(2), 186-194. Obtenido de https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_hortícolas/article/view/1267/1263

- Coviello, F. (Octubre de 2003). Entorno internacional y oportunidades para el desarrollo de las fuentes renovables de energía en los países de América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: Naciones Unidas CEPAL. Obtenido de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6428/S039641_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Díaz, P., & Fernández, P. (2002). Determinación del tamaño muestral para calcular la significación del coeficiente de correlación lineal. *Fisterra*, 9, 209-211. Obtenido de <https://www.fisterra.com/mbe/investiga/pearson/pearson2.pdf>
- Domínguez, G., Galindo, A., Salazar, G., Barrera, G., & Sánchez, F. (Noviembre de 2014). Las excretas porcinas como materia prima para procesos de reciclaje utilizados en actividades agropecuarias. Jalisco: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/ed10/5bb4445d1fe4bb690f411f0d17c861bfa562.pdf>
- Félix, J., Sañudo, R., Rojo, G., Martínez, R., & Olalde, V. (2008). Importancia de los abonos orgánicos. *Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, 4(1), 57-67. Obtenido de [http://www.uaim.edu.mx/webraximhai/Ej-10articulosPDF/Art\[1\]%20Abonos.pdf](http://www.uaim.edu.mx/webraximhai/Ej-10articulosPDF/Art[1]%20Abonos.pdf)
- Gallo, B., & Gallo, D. (2016). Dimensionamiento de instalaciones para el tratamiento de purines de una empresa porcina en confinamiento. *Trabajo de grado*. Universidad Nacional de la Pampa. Obtenido de http://www.biblioteca.unlpam.edu.ar/rdata/tesis/a_galдим042.pdf
- García, M. (2008). *Materia orgánica: La sangre de la tierra*. Celaya: INIFAP.
- Gonzáles, H. (Septiembre de 2004). El turismo como alternativa de desarrollo para Villavicencio y el departamento del Meta. Villavicencio: Centro regional de estudios económicos Villavicencio. Obtenido de https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/2004_septiembre.pdf
- Gonzáles, O. (29 de Mayo de 2019). Diagnóstico y contextualización del sector porcino en el mundo para la consecuencia de buenas prácticas del modelo logístico de la cadena de suministro porcina. *Trabajo de grado*. Universidad Católica de Colombia. Obtenido de

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23295/1/DIAGN%c3%93STICO%20Y%20CONTEXTUALIZACI%c3%93N%20DEL%20SECTOR%20PORCINO%20EN%20EL%20MUNDO%20PARA%20LA%20CONSECUCI%c3%93N%20DE%20BUENA%20S%20PR%c3%81C.pdf>

Herrero, J. (2019). Biodigestor de bajo costo para producir biogás y fertilizante natural a partir de residuos orgánicos. *IDEASS América Latina*, 1-12. Obtenido de <https://www.ideassonline.org/public/pdf/BrochureBiodigestoresESP.pdf>

Ingaramo, O., Ferreiro, P., Miras, A., & Vázquez, V. (2007). Caracterización de las propiedades generales del suelo en una parcela experimental con distintos sistemas de laboreo. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 32(1), 127-137. Obtenido de <https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/6334/CA-32-10.pdf>

Jiménez, M., Torres, M., Gonzáles, F., & Salinas, F. (2000). La utilización del concepto de pH en la publicidad y su relación con las ideas que manejan los alumnos: aplicaciones en el aula. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 38(2), 451-461. Obtenido de <https://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/21696/21530>

Julca, A., Meneses, L., Blas, R., & Bello, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencias de usos en la agricultura. *Idesia (Chile)*, 24(1), 49-61. Obtenido de <https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Julca-et-al-2006.pdf>

Kumar, S., & Nguyen, D. (2018). A little breath of fresh air into an anaerobic system: How microaeration facilitates anaerobic digestion process. *El Sevier*, 36(7), 1971-1983. Obtenido de <https://eds-b-ebshost-com.craiu-stadigital.usantotomas.edu.co/eds/detail/detail?vid=5&sid=9a260dfc-d2e3-4231-a5db-1ecfbf4dfccc%40pdc-v-sessmgr05&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbG12ZQ%3d%3d#AN=131592077&db=eih>

Lallana, V., & Lallana, M. (Febrero de 2004). Crecimiento. Paraná: Universidad Nacional Entre Ríos-Facultad de Ciencias Agropecuarias. Obtenido de http://www.fca.uner.edu.ar/files/academica/deptos/catedras/WEBFV_2010/mat_did/UT7.pdf

- Lara, S., & Torregrosa, J. (19 de Julio de 2009). Diseño y evaluación de biodigestores utilizando excretas de cerdo y ganado vacuno generadas en la granja club campestre de Santa Marta. *Trabajo de grado*. Universidad del Magdalena. Obtenido de <http://repositorio.unimagdalena.edu.co/jspui/bitstream/123456789/2011/1/IAS-00052.pdf>
- López, M., & Estrada, H. (2015). Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. *Bioagrocencias*, 8(1), 3-11. Obtenido de <http://www.ccba.uady.mx/bioagro/V8N1/BC%208.1%20Propiedades%20del%20suelo.pdf>
- Lozano, M. (2015). Producción potencial de biogás empleando excretas de ganado porcino en el estado de Guanajuato. *Revista Electrónica Nova Scientia*, 7(3), 96-115. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/ns/v7n15/2007-0705-ns-7-15-00096.pdf>
- Magaña, L., Torres, E., Martínez, M., Sandoval, C., & Hernández, R. (2006). Producción de Biogás a Nivel Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras. *Acta Universitaria*, 16(2), 27-37. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/416/41616204.pdf>
- Martínez, F. (Noviembre de 2018). La conductividad eléctrica del suelo como indicador de la capacidad de uso de los suelos de la zona norte del parque natural de la albufera de valencia. *Trabajo de grado*. Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/94368/GALLART%20-%20La%20conductividad%20el%20c3%a9ctrica%20del%20suelo%20como%20indicador%20de%20la%20capacidad%20de%20uso%20de%20los%20suelo....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Medina, A., Quipuzco, L., & Juscamaita, J. (2014). Evaluación de la calidad de biol de segunda generación de estiércol de ovino producido a través de biodigestores. *Anales Científicos*, 76(1), 116-124. Obtenido de http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:xg_bI-EC8J:revistas.lamolina.edu.pe/index.php/acu/article/view/772+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co
- Morales, E., Trejo, W., Santos, R., & Bacad, H. (2012). Caracterización química de excretas de cerdos secas y maduras provenientes de tres niveles de energía. *Tropical and Subtropical*

- Agroecosystems*, 15, 567-573. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/309385101_Caracterizacion_quimica_de_excretas_de_cerdo_secas_y_maduras_provenientes_de_tres_niveles_de_energia
- Muños, M., Rodríguez, M., Curay, S., Valencia, R., Carrasco, A., & Mayorga, S. (2018). Residuos orgánicos de sistemas pecuarios: producción de biogás y derivados. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 21, 109-113. Obtenido de <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:kb0xHW1TG3gJ:www.revista.cba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/download/2570/1096+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>
- Navarro, M. (Noviembre de 1992). Fertilización en diversos cultivos. Bogotá DC: Instituto Colombiano Agropecuario. Obtenido de https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/14124/27733_16902.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ninabanda, J. (Febrero de 06 de 2012). Alternativas de manejo de las excretas porcinas. *Trabajo de grado*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2109/1/17T1107.pdf>
- Núñez, O. (2016). Diseño y construcción de un digestor para la generación de biogás y fertilizante orgánico. *Centro Azúcar*, 43(2), 35-45. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v43n2/caz04216.pdf>
- Ochoa, D., & Gutiérrez, C. (Agosto de 2019). Determinación del potencial energético para la producción de biogás, a partir de la co-digestión anaerobia del co-sustrato cascarilla de arroz con excretas porcinas. *Trabajo de grado*. Universidad Santo Tomás. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/18402/2019catalinagutierrez?sequence=6&isAllowed=y>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2012). Establecimiento y manejo de pasturas mejoradas: La *Brachiaria Brizantha*. Europa: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido de <http://www.fao.org/3/CA3137ES/ca3137es.pdf>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020). *Portal de suelos de la FAO*. Obtenido de <http://www.fao.org/soils-portal/soil-management/manejo-de-suelos-problematicos/suelos-afectados-por-salinidad/es/>
- Ortega, N. (27 de Junio de 2006). Precipitación del fósforo en el proceso de digestión anaerobia. Florida: Dissertation. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=ICmzDqGMw6QC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Osorio, N. (30 de Abril de 2012). pH del suelo y disponibilidad de nutrientes. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://www.bioedafologia.com/sites/default/files/documentos/pdf/pH-del-suelo-y-nutrientes.pdf>
- Owen, E. (1995). Características físico-químicas del suelo y su incidencia en la absorción de nutrimentos, con énfasis en el cultivo de la palma de aceite. *Palma*, 16(1), 31-39. Obtenido de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/461/461>
- Parra, R. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción más Limpia*, 10(2), 142-159. Obtenido de <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/905/628>
- Pedroza, H., & Dicovskyi. (2006). *Sistema de Análisis Estadístico con SPSS*. Managua: IICA Biblioteca Venezuela. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=sE0qAAAAYAAJ&printsec=frontcover&dq=Sistema+de+An%C3%A1lisis+Estad%C3%ADstico+con+SPSS&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjvx67j-cTqAhUPTt8KHcWrAToQ6AEwAHoECAUQA#v=onepage&q=Sistema%20de%20An%C3%A1lisis%20Estad%C3%ADstico%20con%20>
- Pérez, M., Peña, E., & Lago, S. (2017). Producción de biol y determinación de sus características físico-químicas. 11. Las Tunas: Universidad de Las Tunas. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Esteban_Pena_Pena/publication/326841755_Titulo_Produccion_de_biol_y_determinacion_de_sus_caracteristicas_fisico-

quimicas/links/5b6885f192851ca650511386/Titulo-Produccion-de-biol-y-determinacion-de-sus-caracteristicas-f

- Puerta, S. (2014). Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos. *Lasallita de investigacion*, 1(1), 56-65. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69511009>
- Ramón, J., Romero, L., & Simanca, J. (2006). Diseño de un biodigestor de canecas en serie para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de cerdo. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 1(1), 15-23. Obtenido de http://revistas.unipamplona.edu.co/ojs_viceinves/index.php/RA/article/view/110
- Recalde, A. (15 de Febrero de 2017). Caracterización de las propiedades físico químicas: densidad aparente, densidad real, porosidad, textura, color, pH, conductividad eléctrica y materia orgánica de los suelos de la reserva biológica Limoncocha. *Trabajo de posgrado*. Universidad Internacional SEK. Obtenido de <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2268>
- Rengifo, G. (2009). Efecto de la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas del suelo sobre el rendimiento del cultivo de maíz en choclo (*Zea mays* L.) en la sabana de bogotá. *Trabajo de posgrado*. Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21838/7075002-2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Resolución 1207 de 2014. (13 de Agosto de 2014). Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Bogotá DC, Colombia. Obtenido de <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-1207-de-2014.pdf>
- Rodríguez, J. (2019). Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Cali: Universidad del Valle. Obtenido de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>
- Rojas, N., & Ñaños, L. (2018). Diseño e implementación de un Biodigestor en la granja porcícola San Sebastián del municipio de Timaná – Huila, como estrategia de aprovechamiento de los residuos generados para la fertilización de pasturas y la generación de biogás. *Trabajo de grado*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Obtenido de

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/17850/1080934105%20.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

- Rubio, A. (Julio de 2010). La densidad aparente en suelos forestales del parque natural los alcornocales. *Trabajo de grado*. Universidad de Sevilla. Obtenido de <https://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La%20densidad%20aparente%20en%20suelos%20forestales%20.pdf>
- Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé*, 56(4), 381-397. Obtenido de <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc056%2804%29381-397.pdf>
- Sanabria, D. (12 de Julio de 2006). Conductividad eléctrica por el método electrométrico en aguas. Bogotá DC: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Conductividad+El%C3%A9ctrica.pdf/f25e2275-39b2-4381-8a35-97c23d7e8af4>
- Sistema Biobolsa. (2015). Manual del Biol. México DF: Sistema Biobolsa. Obtenido de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SISTEMA%20BIOBOLSA%20s.f.%20Manual%20del%20BIOL.pdf
- Soria, M., Ferrera, R., Etchevers, J., Alcántar, G., Santos, J., Borges, L., & Pereyda, G. (2001). Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. *Terra Latinoamericana*, 19(4), 353-362. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57319408.pdf>
- Sosa, N. (22 de Octubre de 2017). Aplicación de efluentes porcinos en cultivo de maíz. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Obtenido de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_carlota_efluentesporcinos14.pdf
- Tobón, A. (2017). Evaluación del impacto ambiental en biodigestores anaeróbicos en el Servicio Nacional de Aprendizaje, Regional Cesar. *Revista especializada en tecnologías transversales de la organización*, 5(5), 39-49. Obtenido de

<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:PTgLND5o8LIJ:revistas.sena.edu.co/index.php/RETO/article/download/1409/1511+&cd=2&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>

- Vargas, M., & Rivas, O. (2012). Obtención de un mejorador de suelos como subproducto de la digestión anaerobia de desechos orgánicos en el TEC. *Tecnología en Marcha*, 25(3), 19-27. Obtenido de https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/454/382
- Varnero, M. (2011). Manual del biogás. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación. Obtenido de <http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Zambrano, L., & Macias, R. (2013). Determinación de sólidos totales, suspendidos, sedimentados y volátiles, en el efluente de las lagunas de oxidación situadas en la parroquia colón, cantón portoviejo, provincia de manabí, durante el período de marzo a septiembre 2013. *Trabajo de grado*. Universidad Técnica de Manabí. Obtenido de <http://repositorio.utm.edu.ec/bitstream/123456789/137/1/DETERMINACION%20DE%20SOLIDOS%20TOTALES%2C%20SUSPENDIDOS%2C%20SEDIMENTADOS%20Y%20VOLATILES.pdf>

13. Anexos

Anexo 1. *Reserva Natural Cosmopolitana-lugar de estudio*



Figura 1. *Reserva Cosmopolitana. Por Acosta & Carrillo, 2019.*

Anexo 2. Línea de tiempo respecto a los antecedentes

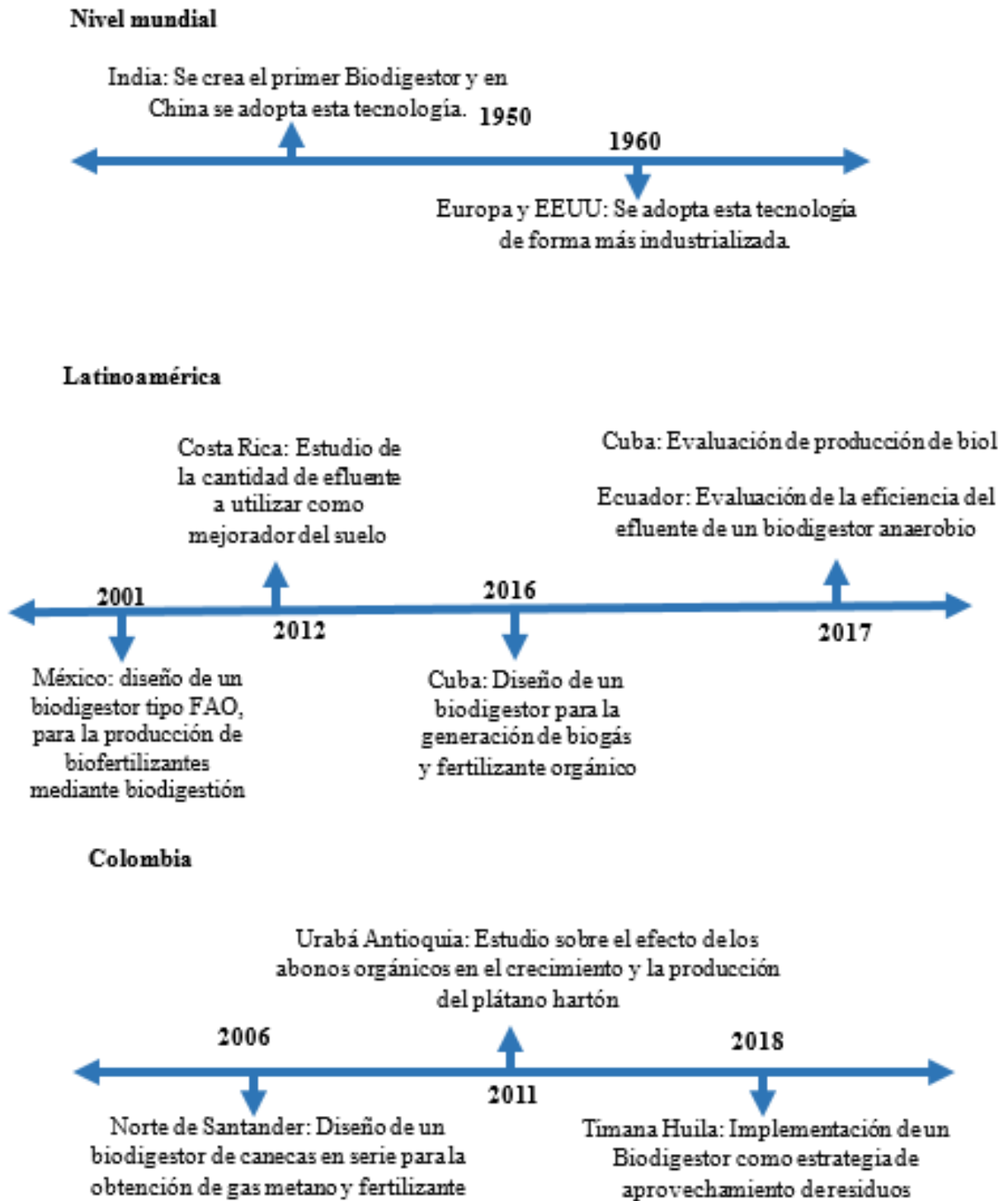
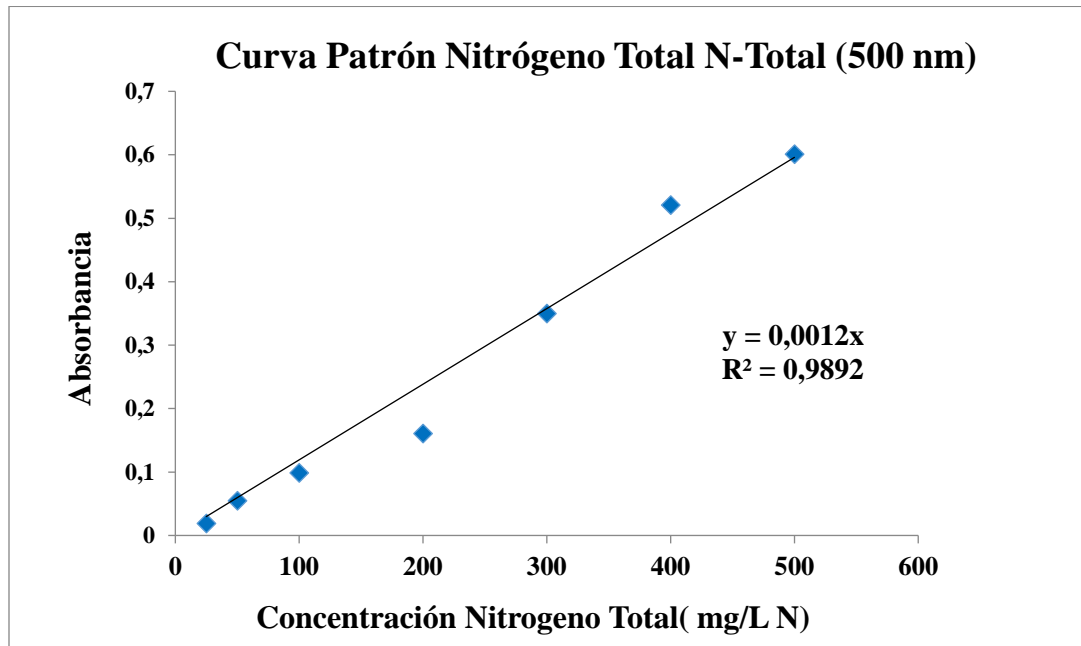
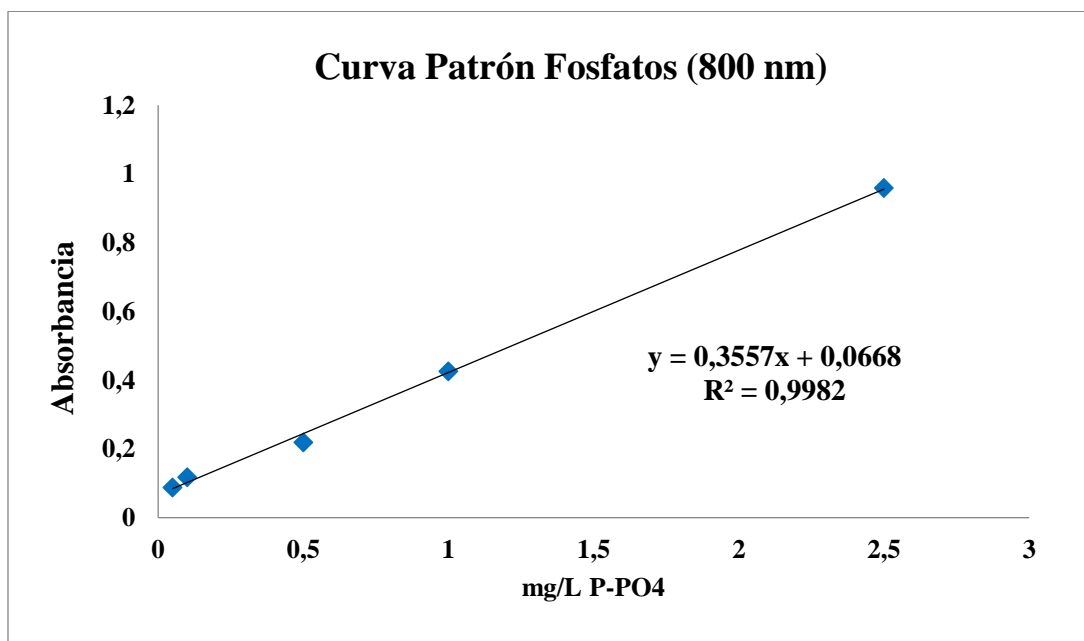


Figura 2. Esquema de la línea del tiempo. Por Acosta & Carrillo, 2019.

Anexo 3. *Curvas patrón utilizadas para resultados de los parámetros de DQO, N, P, NO₃*

Recta para obtener la equivalencia en mg/L de los compuestos DQO, N, P, NO₃. Se utilizaron las siguientes curvas patrón, las cuales fueron diseñadas por el Ingeniero Christian José Rojas Reina en el laboratorio de aguas para llevar a cabo los análisis de los parámetros establecidos.

Figura 3. *Curva patrón Nitrógeno Total (N)*Figura 4. *Curva patrón Fosfato (P)*

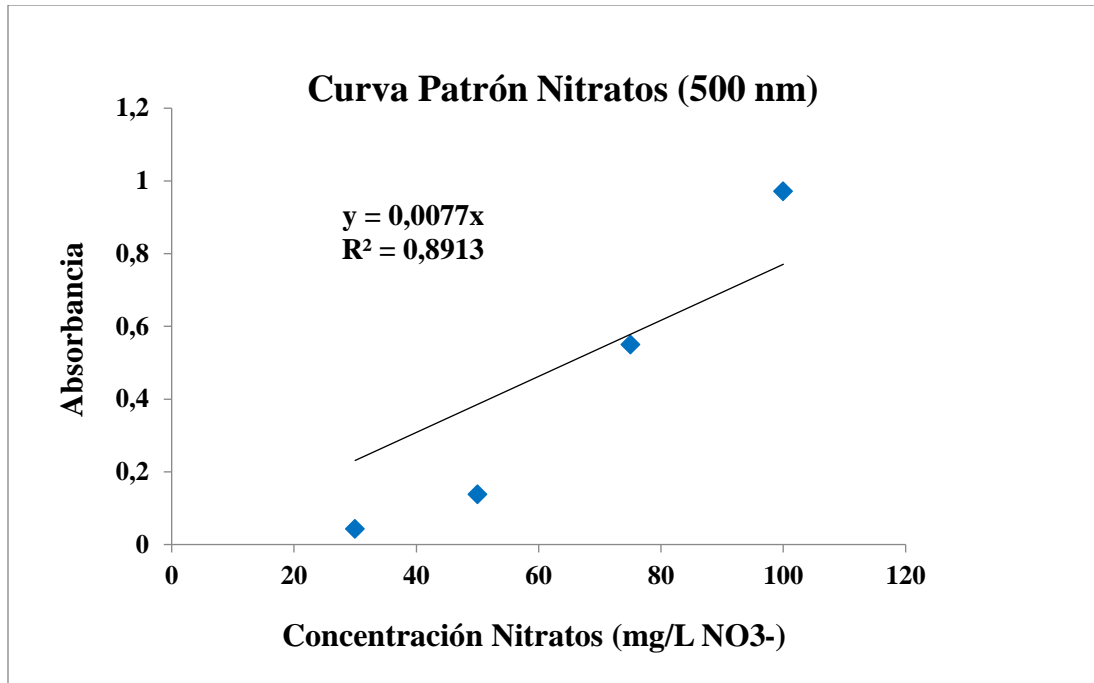


Figura 5. Curva patrón Nitratos (NO₃-)

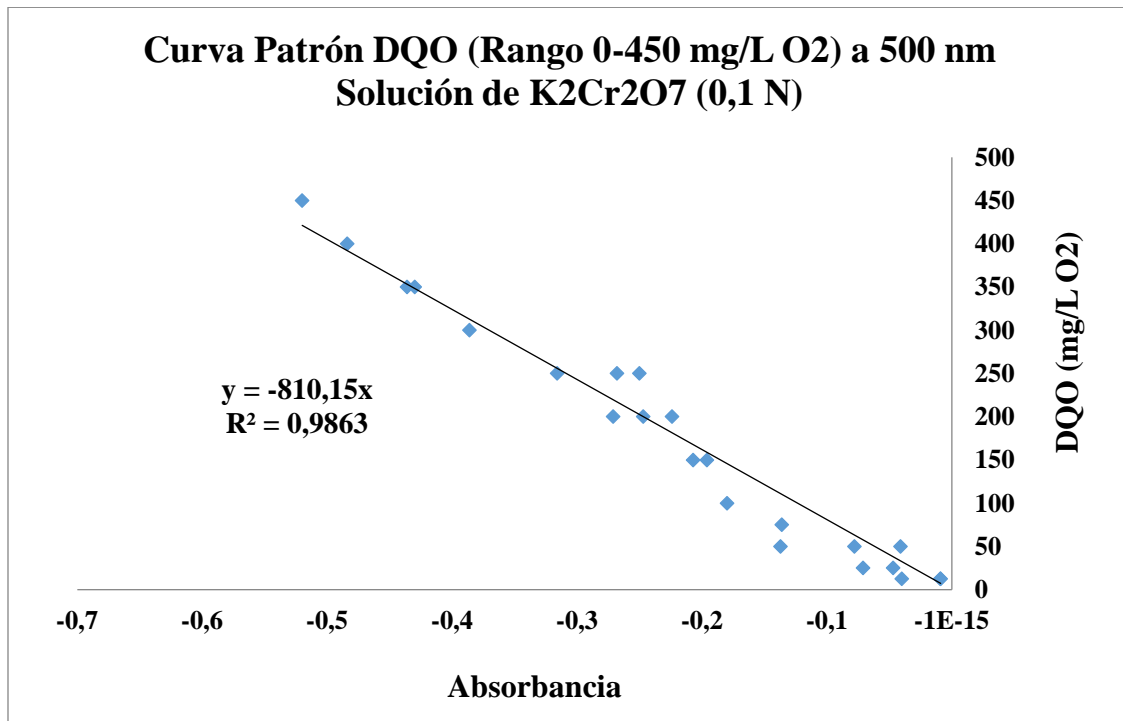


Figura 6. Curva patrón DQO