

Evaluación del potencial de generación de biogás de un biodigestor de excremento vía simulación con el software SIMBA®

Excrement biodigester design for biogas generation via simulation with SIMBA® software

Lozano Ruíz, Angie Carolina; Sánchez Montealegre, Cristian Arled; Ardila Marín, Juan Gonzalo

 **Angie Carolina Lozano Ruíz**

alozano98@uan.edu.co

Universidad Antonio Nariño, Colombia

 **Cristian Arled Sánchez Montealegre**

csanchez84@uan.edu.co

Universidad Antonio Nariño, Colombia

 **Juan Gonzalo Ardila Marín**

jardila77@uan.edu.co

Universidad Antonio Nariño, Colombia

Ingeniería y Región

Universidad Surcolombiana, Colombia

ISSN: 1657-6985

ISSN-e: 2216-1325

Periodicidad: Semestral

vol. 24, 2020

ingenieriayregion@usco.edu.co

Recepción: 28 Octubre 2020

Aprobación: 13 Diciembre 2020

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/238/2382461008/>

DOI: <https://doi.org/10.25054/22161325.2779>

Autor de correspondencia: jardila77@uan.edu.co

Resumen: Un biodigestor genera biogás y digestato estabilizado que en función de la temperatura esta higienizado. “Mi Granjita Huevos el Dorado” es una finca productora de huevos ubicada en zona rural de Neiva, con 1325 gallinas ponedoras cuyo excremento no se dispone adecuadamente, contaminando: el suelo por su uso como abono sin eliminación de microorganismos patógenos, disminuyendo la capacidad de drenaje y dificultando la mineralización del oxígeno; el agua con lixiviados de nitratos, y el aire con amoníaco y malos olores y posterior propagación de insectos, afectando la salud de la población y generando gasto en recolección/tratamiento. La investigación evaluó el potencial de generación de biogás de un biodigestor utilizando como fuente de materia orgánica, sustrato o como influente, el estiércol de la finca, como primer paso se caracterizó la mezcla de biomasa y agua, para esto se recolectó el excremento producido durante seis meses por las gallinas y un cerdo en engorde, que funcionarían como sustrato acelerador de la digestión anaeróbica, se obtuvieron 33.46 kg/día, luego se midió el pH de diferentes proporciones entre gallinaza, porcínaza y agua para definir el porcentaje de mezcla con el que se abastecería al biodigestor, con resultados de 7.31, 6.86 y 7.06, siendo la de 40% biomasa combinada y 60% agua, la más idónea por ser la más neutra. Se dimensionó el biodigestor llegando al presupuesto de su fabricación e instalación, y se simuló mediante el software SIMBA®, encontrando una producción esperada de 10 m³/mes de biogás, basado en la carga orgánica, una temperatura de 35°C, apropiada para el crecimiento y desarrollo de las bacterias, y un tiempo de retención de 30 días, concluyendo que la producción de biogás puede suplir un 50% del gas natural utilizado en la finca, generando una recuperación de la inversión en un periodo de tres años.

Palabras clave: Biodigestor, biogás, digestión anaeróbica, gallinaza, porcínaza.

Abstract: A biodigester generates biogas and stabilized digestate that is sanitized depending on the temperature. “Mi Granjita Huevos El Dorado” is an egg-producing farm located in the rural area of Neiva, with 1,325 laying hens whose excrement is not properly disposed of, contaminating: the soil due to its use as fertilizer without eliminating pathogenic

microorganisms, reducing the capacity of drainage and hindering oxygen mineralization; the water with nitrate leachate, and the air with ammonia and bad odors and subsequent spread of insects, affecting the health of the population and generating costs in collection/treatment. The research evaluated the biogas generation potential of a biodigester using farm manure as a source of organic matter, substrate, or influent, as a first step the mixture of biomass and water was characterized, for this the excrement produced during Six months for the hens and a fattening pig, which would function as an accelerating substrate of anaerobic digestion, 33.46 kg/day were obtained, then the pH of different proportions between chicken manure, pig manure, and water was measured to define the percentage of mixture with the which would be supplied to the biodigester, with results of 7.31, 6.86 and 7.06, being that of 40% combined biomass and 60% water, the most suitable for being the most neutral. The biodigester was dimensioned reaching the budget for its manufacture and installation, and it was simulated using the SIMBA® software, finding an expected production of 10 m³ / month of biogas, based on the organic load, a temperature of 35 ° C, appropriate for the growth and development of bacteria, and a retention time of 30 days, concluding that biogas production can supply 50% of the natural gas used on the farm, generating a return on investment in a period of three years.

Keywords: Biodigester, biogas, anaerobic digestion, chicken manure, pig manure.

Un biodigestor procesa materia orgánica para la obtención de biogás y fertilizantes minimizando el riesgo por organismo patógenos, pero no totalmente libre de patógenos. En el caso de una digestión anaerobia termófila es posible obtener una eliminación casi completa de los patógenos (Alkalay, 1997; Estrada, 2005; Chillo Abril & Paguay Cuvi, 2015; Belduma, 2015; Rodríguez & García, 2017). La generación de biogás representa una de las alternativas de energías renovables más relevante en el sector agrícola, ofrece una oportunidad al agricultor de obtener ingresos adicionales, energía descentralizada y contribuye con la protección del medio ambiente (Venegas, *et al.*, 2018). Gobiernos como el de Camboya, con su Programa Nacional de Biodigestores (NBP) ofrecen apoyo para construir y mantener biodigestores domésticos, a 2012 instaló casi 20,000 biodigestores y estableció una red de financieros, empresas de construcción, especialistas en biolodos y técnicos de postratamiento accesibles a los usuarios, siendo un valioso ejemplo a nivel mundial (Hyman & Bailis, 2018). O da Silva, *et al.*, (2019) reportan la instalación de 78 biodigestores domiciliarios para el tratamiento de aguas residuales domésticas en el estado de Minas Gerais-Brasil para incentivar el saneamiento descentralizado en áreas vulnerables y de pobreza, así como en sitios rurales, considerando el impacto positivo de esta implementación en la salud pública. Múltiples investigaciones han propuesto diseños e implementaciones de biodigestores. Acuña

(2015) propuso el tratamiento de excremento de ganado bovino en una finca con 50 cabezas de ganado y una producción de 281.25 kg de estiércol por día, el equipo llegó a tener una producción de 332 litros de biofertilizante y 6 m³ de biogás diariamente en un plazo de 35 días luego de ingresada la mezcla al biodigestor (Acuña, 2015). Chillo & Paguay (2015) implementaron un biodigestor continuo para producción de biogás a partir de excremento vacuno de 8 vacas con las cuales se estimó la cantidad de excremento producido y sus propiedades físico-químicas y microbiológicas para seleccionar el tipo y las dimensiones del biodigestor, que se fabricó de 500 litros y fue cargado diariamente con 12 litros de sustrato obteniendo una producción 2.26 m³/mes de biogás a una temperatura promedio de 29.5°C en un tiempo de 30 días (Chillo & Paguay, 2015). Sánchez (2017) investigó un biodigestor para residuos de ganado vacuno y una carga orgánica de 6750 kg estimando una producción de 9 m³ de metano, con 5150 litros de biol y 792 kilos de abono orgánico (Sánchez, 2017). Bolívar & Ramírez (2012) diseñaron un biodigestor para excremento y orina de vacas y cerdos sacrificados en frigoríficos, para el excremento de vacas un biodigestor tipo plug flow con un porcentaje de sólidos totales entre 11% y 13% generando una producción mensual de 1801 m³ de biogás con temperatura promedio de 37.5°C en un tiempo de 20 días de retención, y para el excremento de cerdos se propuso un biodigestor tipo CIPAV con una producción mensual de 657 m³ de biogás durante un tiempo de retención de 45 días (Bolívar & Ramírez, 2012). Hernández & Ramírez (2019) propusieron un biodigestor de excrementos de vacas y caballos, concluyendo que la proporción de 0.75 de estiércol vacuno y un 0.25 de estiércol equino con biodigestor de tipo flexible con aislamiento presentaba el menor tiempo de retención y la mayor producción de biogás (Hernández & Ramírez, 2019). Bernal & Suarez (2018) diseñaron un biodigestor para excremento vacuno y avícola del tipo CSTR semicontinuo a una escala mediana de 250 L concluyendo que el excremento que más favorecía la producción de biogás era el excremento vacuno y que se requieren condiciones sumamente estrictas de temperatura y pH (Bernal & Suarez, 2018). Rojas & Ñañez (2018) implementaron un biodigestor en una granja porcícola del tipo CIPAV con una producción por cada 10 kg de excremento de 0.9 m³ de biogás, supliendo la necesidad de 4 familias (Rojas & Ñañez, 2018). Pinzón (2017) también realizó la implementación de biodigestores de cerdos, y llegó a la conclusión de que disminuyen la deforestación y protegen las fuentes hídricas junto con la fauna y la flora, adicional que con la sustitución de la leña como forma de cocción de alimentos se contribuyó a evitar enfermedades respiratorias debido a la inhalación de humo y generó un aporte económico a las familias (Pinzón, 2017). Chini, *et al.*, (2019), dado que el digestato de procesos anaeróbicos contiene Carbono Orgánico Total (TOC)

que puede inhibir la desammonificación, investigó su interferencia en un reactor tratando el digestato de un biodigestor de lodo porcino, y analizó la comunidad de microorganismos a diferentes condiciones operativas (Chini, *et al.*, 2019). Cubas & Lescano (2017) estudiaron la obtención de biogás a partir de estiércol de gallina por medio de un biodigestor de lecho fijo, teniendo en cuenta los sólidos totales, contenido de carbono y de nitrógeno y el nivel de PH; construyeron un biodigestor de 264.21 litros cargado con 29.83 kg de gallinaza compostada con 12.78 litros de lodo activado para acelerar el proceso de digestión y 88.34 litros de agua, para una producción diaria de 0.1928 m³ de biogás, 6.92 m³ de biogás al final del proceso, concluyendo que si es viable la utilización del excremento de gallina y que las características mencionadas si influyen directamente en la producción, el biogás se usó en cocina y en calentadores de galpones (Cubas & Lescano, 2007). Carhuancho (2012) aprovechó el estiércol de gallina para producir biol de gallinas ponedoras en piso y en jaula, y mezclando estas dos, en biodigestores tipo batch, haciendo seguimiento al PH y la temperatura, cargando por 90 días (Carhuancho, 2012). Sierra (2013) estudió la obtención de 127.5 m³/día de biogás de 0.0804 kg de gallinaza en masa seca al día por ave, y estudió al inóculo que se utilizaría en el proceso entre estiércol bovino, lodo estiércol de cerdos o lodo de plantas de tratamiento de aguas residuales, siendo el estiércol bovino el de mayor aporte (Sierra, 2013). Mi Granjita Huevos el Dorado es una finca productora de huevos ubicada en la vereda el Triunfo del corregimiento el Caguán en Neiva, cuenta con 1300 gallinas ponedoras que producen 28.57 kg/día de gallinaza y un porcino que produce 4.89 kg/día, a las cuales no se le daba una disposición adecuada, generando inconvenientes como la contaminación de los suelos debido al uso de este material como abono sin ser tratado lo que provoca una disminución en la capacidad de drenaje del suelo, y la presencia de microorganismos patógenos que dificultan la mineralización del nitrógeno; afectado, además, las fuentes de agua por lixiviados de nitratos, y el aire por la liberación de amoníaco que causa malos olores y posterior propagación los microorganismos patógenos y, posteriormente, de moscas e insectos, afectando la salud de la población de la finca y generando un gasto económico para la solución de estos inconvenientes. Con la propuesta de implementación de un biodigestor se busca incorporar una alternativa en la finca para que las actividades desempeñadas en esta se realicen de una manera sostenible dando un uso más provechoso al excremento como una forma de combustible para la generación de biogás. El tratamiento adecuado de las heces de gallinas y cerdos permite obtener beneficios en materia ambiental reduciendo los perjuicios mencionados previamente, beneficios de tipo económico pues el biogás generado será usado en la cocina de la finca con lo que el gasto en

gas convencional se verá disminuido, y el residuo obtenido se puede comercializar como biofertilizante, beneficios tecnológicos que contribuyen con el desarrollo de la finca incrementando su sustentabilidad, y vale tener en cuenta que los costos de implementación de este proyecto son bajos dada su construcción sencilla, y su manejo y cuidado fácil. Las etapas del proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás y fertilizante parten por la hidrólisis, cuando bacterias hidrolíticas hidrolizan moléculas como proteínas, grasas y carbohidratos y las transforma en polímeros más simples, lo cual resulta en una conversión a monómeros más simples, en este proceso ya hay producción de dióxido de carbono; posteriormente en la acidogénesis, compuestos obtenidos en la primera fase se convierten en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, gracias a las bacterias hidrolíticas-acidogénicas y las acetogénicas que consumen oxígeno molecular para su metabolismo lo que genera un ambiente anaeróbico ideal para un crecimiento bacteriano rápido, ya en esta fase se producen gases como sulfuro de dihidrógeno (H_2S), dióxido de carbono (CO_2) y amoníaco (NH_3); luego, la acetogénesis es llevada a cabo por las bacterias acetogénicas que degradan los ácidos orgánicos formando ácido acético y se libera CO_2 y H_2 vitales para la formación de las bacterias metanogénicas, este proceso es endoenergético por lo cual hay un demanda de energía para su realización (Sierra, 2013); durante la metanogénesis se produce el 90% del gas metano (CH_4) y CO_2 gracias a las bacterias metanogénicas, las cuales solo existen en condiciones anaeróbicas bastante estrictas, las más importantes son las que transforman los ácidos propanóicos y acéticos, denominadas bacterias metanogénicas acetoclasticas (Alzate, Jimenez, & Londoño, 2011). Esta fase resulta ser la más lenta de todo el proceso y solo es posible cuando está avanzada la fermentación de los sustratos primarios y cuando se haya consumido todo el oxígeno presente. Entre estas bacterias hidrolíticas se encuentran *clostridium*, *acetovibrio*, *micrococcus*, *staphylococcus* y *bacillus*; las principales bacterias acetogénicas son *Acinetobacter Lwoffii*, *Acinetobacter sp*, *Actinomyces sp*, *Alcaligenes*, *Pasteurella sp*, *Staphylococcus hominis*, *Bacillus*, y *Kleibsiella oxytoca*, *clostridium spp*, *peptococcus*, *Bifidobacterium*, *Delsulphovibrio spp*, *Lactobacillus*, *Staphylococcus* y *Escherichia coli*; y las bacterias metanogénicas que más se destacan son las de género *Methanosarcina* y *Methanosaeta*, *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus*, *Methanosarcinales*, *Methanomicrobiales*, *Methanobacteriales*, *Methanococcales* y *Methanopyrales* (Hernandez & Ramirez, 2019). Además, se pueden encontrar diferentes factores que intervienen en este proceso ya que los grupos de bacterias reaccionan de una manera diferente a los cambios, por tanto, es difícil dar valores del grado de afectación en la producción de gas de manera precisa (Acuña, 2015). Entre

los factores que afectan la producción de biogás encontramos: la materia orgánica, los estiércoles y los lodos cloacales son lo que más tienen estas condiciones adecuadas para este proceso (Cubas & Lescano, 2007); la relación Carbono-Nitrógeno (C/N), el carbono es utilizado por las bacterias como una fuente de energía y el nitrógeno para la reproducción de nuevas bacterias, el rango ideal para un buen compostaje es entre 20 y 50 a 1, y el exceso conllevará a resultados negativos, demasiado carbono produce fermentación lenta, temperaturas bajas y se puede perder como CO₂, y demasiado nitrógeno se puede convertir en NH₃ (Rodríguez & García, 2017); la temperatura tiene una importancia sobre la actividad de digestión, se destacan tres rangos de 8 a 20°C (psicrofilico), 20 a 40°C (mesofilico) y 50 a 65°C (termofilico), en cada rango predominan diferentes tipos de bacterias y son sensibles a los cambios de esta temperatura, para la digestión en Mi Granjita Huevos el Dorado se encuentra un rango mesofilico (35°C); el pH es un factor que ayuda a determinar la inhibición y la toxicidad de las bacterias y el crecimiento óptimo de los diferentes grupos microbianos que están presentes en cada fase, los microorganismos que producen biogás son susceptibles a cambios en el pH y se establece que para que haya una buena digestión anaeróbica debe estar cerca a la neutralidad entre 6.8 y 7.4 (Bernal & Suarez, 2018); y, por último, el tiempo de retención se refiere al tiempo que las bacterias requieren para poder degradar la materia orgánica siendo el parámetro con el que se determina el volumen del biodigestor y está relacionado directamente con la temperatura, a mayor temperatura menor tiempo (Rodríguez & García, 2017).

El propósito de esta investigación, fue evaluar el potencial de generación de biogás de un biodigestor utilizando como combustible la gallinaza de la finca y la porcínaza como inóculo.

2. Materiales y métodos

2.1 Caracterización de materia orgánica disponible

Cabe mencionar que las gallinas son alimentadas con Ponedoras® de Solla que garantiza 15.5% de proteína, 2.5% de grasa, 6.0% de fibra, 15.0% de cenizas, 13.0% de humedad, 3.0% de Calcio y 0.70% de Fósforo, y el porcino con Cría Cerdos Reemplazos® de Solla que garantiza 14.5% de proteína, 3.0% de grasa, 8.0% de fibra, 9.0% de cenizas y 13.0% de humedad. Esto es importante porque, en cuanto a las gallinas, estas solo asimilan entre el 30% y 40% de los nutrientes con los que se les alimenta, lo que hace que en su excremento se encuentren el restante no asimilado, el nivel de nitrógeno de las deyecciones es más elevado que en pollos de engorde, en tanto que con el calcio pasa lo contrario, así que dependiendo del tipo de alimentación, y de otros aspectos como su origen,

lugar de alojamiento, temperatura y acondicionamiento del galpón, se afectará el contenido de nutrientes en la gallinaza (Estrada, 2005).

Con base en el manual de producción avícola, la recolección en seco consistió en dejar que el material se acumulará a una altura de 40 centímetros, sin tocar la base de las jaulas, realizándose durante la noche (Pedroza, 2005), terminado este proceso, se pesaron cada uno de los bultos en una balanza romana con gancho con peso máximo de 100 kg. En total se recogieron 150 bultos de gallinaza, cada uno pesó 40 kg, para 6000 kg de gallinaza, durante siete meses. La cantidad de gallinaza diaria en promedio generada (MPCG) fue entonces de 28.57 kg/día. El porcino produjo excremento durante tres meses, se recolectó la porcinaza como complemento de la gallinaza. Para la recolección se usó bulto de fibra, se recogieron 11 bultos de 40 kg para un total de 440 kg de porcinaza. La cantidad de porcinaza diaria en promedio generada (MPCP) fue de 4.89 kg/día. Así, la cantidad total de excremento diaria (E) fue $E = 33.46$ kg/día. En la Figura 1 se muestran el galpón, la cochera, y algunas imágenes del proceso de recolección y empaque de la materia orgánica en el sitio de estudio.

Para la determinación del pH se utilizó un pHmetro Apera PH400S disponible en los laboratorios de la UAN sede Neiva Buganviles teniendo en cuenta tres proporciones entre gallinaza, porcinaza y agua, a saber: Gallinaza: 40% - Agua: 60%, Porcinaza: 40% - Agua: 60%, y Gallinaza: 20% - Porcinaza: 20% - Agua: 60%. En las muestras se usó mayor proporción de agua a materia prima, lo cual se recomienda para mejorar la eficiencia de proceso (Chillo & Paguay, 2015). En la Tabla 1 se presentan los valores medidos en las muestras, la tercera muestra fue la más neutra con un promedio de 7.06, el más cercano a 7.00, la primera resultó neutra y la segunda ligeramente ácida. El análisis de varianza de un factor arrojó un valor f de 18.37 mayor que el valor crítico 3.89, con lo cual se puede afirmar que la proporción de estiércol influye en el pH de la muestra, y un valor p de 0.0002 menor a 0.05, para una prueba de 95% de confianza, permite rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias.



Figura 1.

Figura 1. Mi Granjita Huevos el Dorado – Proceso de recolección de excremento.

Autores

Tabla 1.

Tabla 1. Datos de pH medidos de las tres proporciones de estiércol - agua

pH	Gallinaza: 40% - Agua: 60%	Porcinaza: 40% - Agua: 60%	Gallinaza: 20% - Porcinaza: 20% - Agua: 60%
	7.32	7.14	7.04
	7.48	6.90	7.14
	7.24	6.87	6.95
	7.28	7.04	6.98
	7.22	6.90	7.20
promedio	7.308	6.858	7.062
varianza	0.01072	0.01952	0.01122

Autores

2.2 Diseño del biodigestor

Según Chungandro & Manitio (2010), el factor de dilución del residuo en volumen para la muestra seleccionada (muestra 3) es 1:1 ($F_d=2$). El volumen de fase líquida del biodigestor se calcula con la Ec. (1).

$$V_D = (E)(TR)(F_d) [m^3]$$

Ec. (1)

Donde TR es el tiempo de retención en días, tiempo conveniente para que, en las condiciones ambientales del lugar, la materia orgánica pueda degradarse y producir biogás, el tiempo de retención recomendado para porcinaza y agua es entre 15 y 25 días y para gallinaza y agua es entre 20 y 40 días (Chungandro & Manitio, 2010), así que en el presente estudio se proponen 30 días de retención

por ser dominante el estiércol aviar líquido, con lo que $VD = 2.34 \text{ m}^3$. Para el biodigestor tubular tipo Plug Flow se sugiere que 75% del volumen sea fase líquida y el 25% del volumen se disponga para una fase gaseosa, entendiendo que la fase líquida equivale al volumen del sustrato ingresado y la fase gaseosa al volumen de biogás generado, como se ilustra en la Figura 2. Por lo que el volumen real del biodigestor (VDR) viene a ser 3.12 m^3 y, dado que se propone usar polietileno tubular calibre 8 con protección rayos UV para la membrana, que tiene un perímetro de 2.5 m (diámetro 0.79 m), se estableció una longitud de 6.4 m. Aclarando que, al comprar el polietileno, como el biodigestor está conectado a la tubería de entrada y de salida del sustrato, se le debe adicionar un 1 m a cada lado, es decir que la longitud total de la membrana quedaría en 8.4 m.

Los tanques de carga (VTC) y descarga (VTD), almacenan la materia orgánica antes y después del proceso, deben diseñarse con un volumen de, mínimo, el triple de la carga diaria, lo que, para el presente estudio, equivale a 1 m^3 . El tanque de carga se encuentra ubicado a un nivel diferente que el digestor (ver Figura 2), ingresando el sustrato por gravedad por la tubería de conducción, se estima una altura de máximo 50 cm por encima del nivel del digestor, mientras el tanque de descarga estará ubicado al nivel del biodigestor, permitiendo la facilidad de mantenimiento y recolección del digestato. Para su construcción se recomienda concreto por viabilidad y vida útil. En cuanto a la tubería de alimentación del sustrato se sugiere una inclinación de mínimo 30° respecto a la horizontal, y para que la salida del efluente sea más fácil de retirar, la tubería debe tener una inclinación de 45° . Se recomienda PVC por viabilidad, para evitar problemas de corrosión, y por mantenibilidad. Y, por último, la tubería de salida de biogás, también en PVC, debido a que posee un recubrimiento interno con poca rigurosidad, de esta manera permite el paso más fácil del gas, evitando la condensación en el interior del tubo, se recomienda con 1 pulgada de diámetro para digestores familiares y de $1 \frac{1}{2}$ pulgada para digestores grandes.

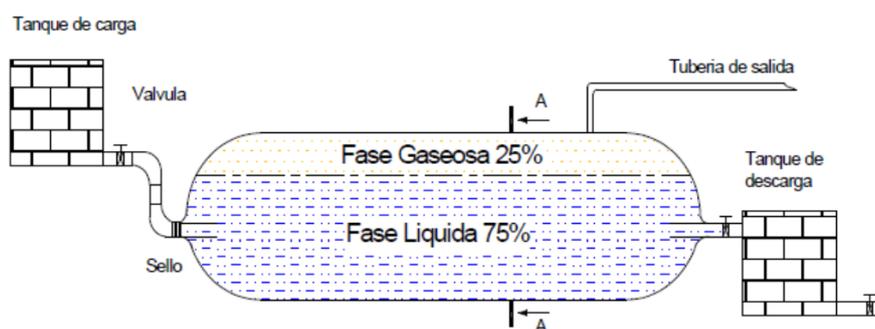


Figura 2.

Figura 2. Esquema general del biodigestor tubular
(Chungandro Nacaza & Manitio Cahuatijo, 2010)

Cuando comienza el proceso de digestión metanogénica, incrementa la presión interna del digestor, causada por la generación de gases, controlada con una válvula de alivio manteniendo un flujo constante y una presión interna adecuada. El digestor tendrá acoples hembra y macho de PVC entre el plástico polietileno y las tuberías, y empaque de neopreno de 2.3 mm de espesor, con diámetro menor a 1 pulgada, de esta manera se forma un sello mecánico evitando cualquier fuga.

Para la construcción de la fosa, se recomienda abrirla con retroexcavadora, se debe cavar la zanja primero considerando que los lados y el piso deben ser lisos, sin piedras y raíces, sus lados deberán estar inclinados de 10° a 15° para evitar que colapse, por esa razón es necesario ubicarla en una zona cerca de la línea de consumo, encontrándose debajo de la tierra, evitando de esta manera efectos variables de temperatura y pérdidas de calor. Las fosas para biodigestores tubulares deben tener una profundidad máxima de 90 cm, un ancho de 2 metros y su largo depende de la cantidad de materia cargada en m^3 .

Jyothilakshmi & Prakashb (2016), al igual que este proyecto, emplearon todos los conocimientos básicos de estática, diseño industrial y tecnologías de manufactura en el desarrollo y análisis de la forma del cuerpo de un digestor para que fuera más eficiente en la producción de gas metano, pero su propuesta es un biodigestor residencial portátil que procesa residuos domésticos.

2.3 Simulación

El software SIMBA#biogas® es un simulador dinámico de plantas de biogás, ofrece todos los componentes necesarios para un análisis sólido de las plantas de biogás de digestión húmeda, incluyendo modelos de reactores explícitos y un modelo de digestión dinámica capaz de manejar múltiples sustratos (InCTRL, 2016). Permite la realización de una amplia gama de aplicaciones en la práctica de ingeniería, investigación y educación, esto incluye el diseño y la optimización de diseños de plantas de biogás y procesos de unidades conectadas. Se contactó por videollamada a los desarrolladores del software, Manel Garrido y Alex Rosenthal, quienes enseñaron el funcionamiento del software y facilitaron una versión demo con restricción para guardar los trabajos y mostrando solo una parte de los resultados obtenidos.

Para la simulación se define la temperatura del ambiente promedio de 30°C en la que va a trabajar el biodigestor, y las constantes que influyen en el funcionamiento de este, las propiedades de la gallinaza, la porcínaza y el agua, y se procede a configurar la cantidad de cada excremento que ingresa al biodigestor, y se especifican las propiedades de las materias primas presentes en el biodigestor, el programa ya posee una base de datos de propiedades por defecto, solo se modifican la temperatura y el pH. Se configura el proceso de digestión anaeróbica en el bloque reactor o biodigestor, y se simula por los días que sean requeridos. Después de la simulación se puede revisar información del gas en la tubería de salida, del lodo que sale del biodigestor y la información dentro del reactor del biodigestor. La conexión de todos los componentes del sistema se ilustra en la Figura 3. Los datos ingresados al software fueron $V_{DR} = 3.12 m^3$, $E = 33.46 kg/día$, retención de 30 días, y proporción de Gallinaza: 20% - Porcínaza: 20% - Agua: 60% en cada carga, con un pH neutro que fue verificado por el software y configurado en un valor preciso de 7.062 de acuerdo con la carga, en un ambiente cuya temperatura promedio es de 30°C.

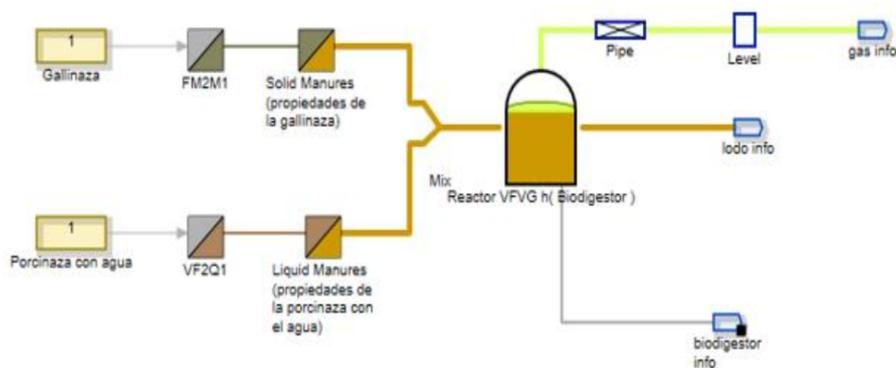


Figura 3

Figura 3. Ensamblaje de componentes del biodigestor diseñado en SIMBA#biogas®

Autores

Neba, *et al.*, (2019), estudian la digestión anaeróbica en múltiples etapas, en la que se operan múltiples digestores en una red, diseñada para optimizar cada reacción del proceso, pero a diferencia de los artículos tradicionales que se centran en la evaluación experimental, su estudio desarrolla una metodología numérica de optimización que da cuenta de las características geométricas de los tipos fundamentales de digestores anaeróbicos y está validado con datos experimentales diarios de estiércol de caballo, cabra, pollo y porcino, y muestra buena concordancia (errores del modelo entre 0.01 y 0.06); guardando cierta similitud con el presente estudio que también evalúa un modelo numérico que se basa en simulación, pero en futuros trabajos se propone evaluar la opción de múltiples etapas. Posteriormente, Neba, *et al.*, (2020), estudian la cinética de procesos en el diseño de digestores anaeróbicos, pues tradicionalmente se diseñan mediante una combinación de carga orgánica e hidráulica, en esta oportunidad proponen un entorno de software llamado Biodigester Rapid Analysis and Design System (B-RADeS), que combina la cinética de biodegradación y los parámetros económicos al considerar las aguas residuales porcinas y farmacéuticas, y establece una estructura de digestor y los tiempos de retención hidráulicos asociados; este trabajo, igualmente, válida las herramientas computacionales en el diseño de biodigestores, pero también propone la incorporación de la cinética en trabajos futuros.

3. Resultados y discusión

3.1 Presupuesto

Una vez terminado el ejercicio de diseño, que tal como se describió en la sección anterior partió por a definición y especificación del problema particular en el lugar de intervención, la selección del concepto adecuado para solucionar dicho problema, y el posterior dimensionamiento y diseño detallado que termino en la selección de cada uno de los componentes del sistema de biodigestión, se procedió a construir el presupuesto del proyecto con miras a establecer el valor de inversión inicial requerido para dar solución al problema.

Los materiales y componentes seleccionados corresponden a los de más fácil acceso en términos económicos, disponibilidad e instalación. Evaluando los

costos detallados de los materiales y de los procesos de manufactura y la mano de obra para la construcción del biodigestor, se estableció un costo total de 1.103.000 COP. En cuanto al costo general se considera económico inicialmente al juzgar el valor total, pero es necesario contrastarlo con la producción de biogás para establecer el Retorno Sobre la Inversión (ROI) y terminar de convencer a los propietarios de la finca, pero inicialmente, al conocer este costo de inversión inicial, mostraron gran favoritismo por el proyecto. En cuanto a los costos individuales no fue sorpresa que se concentraran en el plástico tubular calibre 8 con protección de los rayos UV a 13.500 COP por metro, para un costo de 121.500 COP los 9 metros requeridos, y en la construcción de la fosa que requiere el alquiler de retroexcavadora estimando su costo en 180.000 COP por dos horas de trabajo. Otros costos representativos fueron 95.000 COP de la válvula de escape, 72.000 COP de 9 metros de plástico aislante, 25.000 COP de 2 m de tubo PVC de 6" pesado, 10.000 COP de 2 llaves de paso de ½", y los 84.000 COP de cemento, 20.000 COP de arena y 6.000 COP de ladrillos requeridos para la adecuación de la fosa y la construcción de los tanques de carga y descarga. Por último, la mano de obra se estimó por horas y de acuerdo con los perfiles del personal técnico requerido para las diferentes laborales, y ascendió a un valor de 300.000 COP. Los futuros inversionistas estuvieron de acuerdo con los resultados del diseño y del presupuesto y con las metodologías implementadas en el desarrollo de esta fase del proyecto, mostrando gran interés en realizar la inversión inicial.

3.2 Predicción de producción

El principal resultado de la simulación vía SIMBA#biogas® fue el pronóstico de una producción de gas en volumen (Vg) de 9.99m³ de biogás al final del periodo de retención.

El software realiza un análisis de la carga al interior del biodigestor y reporta una caracterización discriminada en la que se predicen valores de interés como, por ejemplo, los que se reportan en la Tabla 2.

Tabla 2.

Tabla 2. Análisis de carga al interior del biodigestor

Ácidos grasos volátiles (VFA)	0.4347 kg/m ³
Capacidad ácida (pH5 - TAC)	8.692 kg de CaCO ₃ /m ³
Razón de carga orgánica (OLR) para una relación VFA/TAC de 0.05	0.0207 kg de concentración de sólidos volátiles en suspensión (VSS/m ³ /día)
Campo específico de gas	5828 m ³ /t de VSS
Campo gaseoso	60.33 m ³ / t de peso molecular (FM)

Autores

Además, en cuanto al proceso estimó, para el periodo de retención, los valores presentados en la Tabla 3.

Tabla 3.

Tabla 3. Resultados del proceso en el periodo de retención

Reducción de partículas totales (dTSS)	-275.5%
Reducción de partículas orgánicas (dVSS)	-243.4%
Reducción de oxígenos químico demandado (dCOD)	-228.5%
Volumen de lodo (Vs)	3.089 m ³
Masa de lodo (Ms)	3.135 ton
Masa de azúcares (Mch)	0.1035 ton
Masa de proteínas (Mpr)	0.029 ton
Masa de lípidos (Mli)	0.0062 ton
Masa de minerales (Mmi)	0.0280 ton
Masa de agua (Mw)	2.9680 ton

Autores

Igualmente reporta el contenido y la composición del biogás producido, estableciendo que porcentualmente contiene 59.1752% de metano (CH₄), 31.1653% de dióxido de carbono (CO₂), 5.4584% de vapor de agua (H₂O), 4.1819% de dinitrógeno (N₂), 0.0191% de amoníaco (NH₃), y pequeñas trazas de hidrógeno (H₂), dióxido nitroso (N₂O), oxígeno (O₂), dióxido sulfúrico (SO₂), y ácido sulfhídrico (H₂S), en ese orden. Siendo el metano el principal componente y el que determina su potencial para la combustión estableciendo como un biogás combustible útil para desempeñarse en remplazo del gas natural u otros combustibles gaseosos.

En la Tabla 4 se reporta una comparación con los referentes del presente estudio con la que se pretende validar los resultados del diseño y de la simulación del dispositivo propuesto para la finca. Resulta compleja la comparación por la falta de información de algunos referentes y por las diferencias, principalmente en proveniencia de la materia orgánica, pero al establecer una relación entre la cantidad de materia orgánica requerida para producir cada m³ de biogás se encuentra que el presente estudio reporta un valor promedio, la diferencia entre estos valores obedece a las diferentes tecnologías propuestas y a las condiciones de proceso y en sitio.

Tabla 4.

Tabla 4. Comparación resultados presente estudio con referentes

Proveniencia	Cantidad M.O. [kg/día]	Retención [días]	Cantidad biogás [m ³ /mes]	Relación M.O. a biogás [kg/m ³]	Referencia
Bovino	281.25	35	180	46.9	Acuña
Bovino	12	30	2.6	138.5	Chillo & Paguay
Bovino	225	-	270	25.0	Sánchez
Bovino	-	20	1801	-	Bolívar & Ramírez
Porcino	-	45	657	-	Bolívar & Ramírez
Porcino	10	-	27	11.1	Rojas & Nañez
Avícola	29.83	-	6.92	129.3	Cubas & Lescano
Avícola	0.0804/ave	-	3825	-	Sierra
Avícola + Porcino	33.46	30	10	100.4	Autores

Autores

3.3 Retorno de la Inversión (ROI)

Actualmente en la finca se consume un promedio de 20,0 m³ de gas natural mensual a 3068 COP/ m³ pesos en esa zona, según esto el volumen de biogás generado a partir de la gallinaza y la porcinaza puede suplir un 50% del gas requerido para cocción de alimentos, sustituyendo el consumo de gas natural durante 15 días al mes, logrando así un ahorro de 30.680 COP/mes. Recordando que la inversión inicial en el biodigestor propuesto es de 1.103.000 COP, se estima la recuperación de la inversión calculando el ROI con la Ec. (2) que es una adaptación de la expresión convencional donde se considera el ahorro en lugar de la ganancia.

$$ROI = \frac{\text{Ahorro} - \text{Inversión}}{\text{Inversión}}$$

Ec. (2)

Estimando un lapso de tres años (36 meses) para la recuperación se proyecta un ahorro acumulado de 1.104.480 COP en dicho periodo si se mantiene el mismo volumen de biogás generado y sin tener en cuenta al aumento del costo del gas natural que representaría un aumento paulatino en el ahorro. Así, al calcular el ROI se obtiene un valor mínimo positivo de 0.0013, casi cero (0), lo que se interpreta como la validación del tiempo proyectado como el tiempo requerido para recuperar la inversión inicial. Vale aclarar que tampoco se tuvieron en cuenta costos operativos como el mantenimiento.

A la luz de estos resultados es necesario tener en cuenta las conclusiones de Kajau & Madyira (2019), que afirman que un digestor de biogás que funcione

perfectamente es un activo, ya que proporciona gas al propietario y también ayuda a ahorrar dinero y reducir la dependencia excesiva de la red eléctrica, pues permite la recuperación de energía, el saneamiento, la gestión de residuos y la producción de fertilizantes orgánicos de alta calidad; el biogás reduce la dependencia de combustibles fósiles y da como resultado la reducción de impactos ambientales como el calentamiento global y la contaminación, mejora el saneamiento y reduce la demanda de carbón para cocinar. Pero la falta de: (a) mecanismo de control y monitoreo de temperatura (b) tuberías de gas adecuadas (d) sensores detectores de gas (e) medidores de flujo (f) mecanismo de agitación (g) sistemas de calefacción y (h) trampas de agua, puede ser un factor importante que inhibe el rendimiento del digestor.

4. Conclusiones

Se determinó que la producción de excremento diario en la finca es de 28.75 kg de gallinaza y 4.89 kg de porcinaza, adicionalmente se debe tener una dilución en 40% biomasa – 60% agua, siendo ideal 20% gallinaza y 20% porcinaza en lo posible para un pH de mezcla aproximadamente 7.06 (neutro), favoreciendo la producción de metano y eliminando las bacterias eficazmente.

De acuerdo con los parámetros identificados, se diseñó un biodigestor tubular, para favorecer la producción de biogás en la finca, siendo uno de los biodigestores más económicos. Estableciendo una capacidad de 3.12 m³, tomando en cuenta las condiciones del lugar, el tipo de sustrato trabajado, una temperatura ambiente promedio de 30°C y un tiempo de retención de 30 días en función de la cantidad de sustrato a tratar.

Según la simulación de desarrollo del biodigestor en el demo SIMBA#biogas®, se verificó que con las condiciones y parámetros establecidos para el biodigestor es posible su funcionamiento y la producción de biogás, generando 10 m³ mensuales, llegando a suplir un 50% del gas natural utilizado en la finca, sustituyendo el consumo durante 15 días al mes ahorrando 30.680 COP mensuales y recuperando la inversión en un periodo de tres años.

Se recomienda implementar el biodigestor tubular en la finca “Mi Granjita Huevos el Dorado”, de bajo costo y fácil construcción, recuperado a futuro la inversión inicial.

Realizar nuevas pruebas de las mezclas del sustrato, determinando el pH, relación de C/N, sólidos totales, sólidos vótales, carbono orgánico, nitrógeno total, humedad y microorganismos recogidos, con el fin de confirmar que los parámetros se encuentren en rangos favorables para la digestión anaeróbica. Se debe comprobar a escala piloto o laboratorio mediante ensayos BMP cuál es la mezcla más adecuada y los rendimientos que se obtendrían.

Evaluar la posibilidad de agregar otro tipo de materia prima a la mezcla, utilizando otros desechos que genere la finca, observando la efectividad de la producción de biogás. Se recomienda usar el bioabono generado, como nuevo fertilizante en la finca y analizar su impacto positivo a la producción y al medio ambiente. E incluso evaluar la posibilidad de implementar los resultados del biodigestor para la generación de energía eléctrica.

Referencias bibliográficas

- Acuña Rubio, J. P., (2015). Diseño e Implementación de un Biodigestor para el Tratamiento de Excretas de Ganado Bovino. Repositorio Digital Universidad Central del Ecuador. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/6441> Consultada 18/06/2019.
- Alkalay, D., (1997). Aprovechamiento de Desechos Agropecuarios para la Producción de Energía. Reunión Regional Sobre Biomasa para la Producción de Energía y Alimentos. <http://www.fao.org/3/AD098S/AD098S08.htm> Consultada 06/12/2019. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.261996>
- Alzate T., L., Jimenez C., C., & Londoño L., J. (2011). Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales para Mejorar la Calidad Sensorial y Nutricional de Productos Avícolas. *Producción + Limpia*, Vol. 6, núm. 1, pp. 108-127, 2011. <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/pl/article/view/111> Consultada 06/12/2019.
- Bernal Patiño, L. E., & Suarez Ramírez, L. S., (2018). Diseño Conceptual de un Biodigestor Partiendo de Estiércol Vacuno y Avícola, Producido en la Finca El Guarumal, para la Obtención de Biogás. Repositorio Fundación Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6844/1/6102531-2018-2-IQ.pdf> Consultada 18/06/2019. <https://doi.org/10.37292/riccva.v4i01.134>
- Bolívar Fuquene, H. E., & Ramírez Hernández, E. Y., (2012). Propuesta para el Diseño de un Biodigestor para el Aprovechamiento de la Materia Orgánica Generada en los Frigoríficos de Bogotá. Repositorio Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://docplayer.es/82003907-Propuesta-para-el-diseno-de-un-biodigestor-para-el-aprovechamiento-de-la-materia-organica-generada-en-los-frigorificos-de-bogota.html> Consultada 18/06/2019. <https://doi.org/10.15332/dt.inv.2021.01948>
- Carhuancho Leon, F. M., (2012). Aprovechamiento del Estiércol de Gallina para la Elaboración de Biol en Biodigestores Tipo Batch como Propuesta al Manejo de Residuo Avícola. Repositorio Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1769> Consultada 25/07/2019. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-02-12>
- Chillo Abril, J. F., & Paguay Cuvi, S. C., (2015). Implementación de un Biodigestor Continuo para Producción de Biogás a Partir de Estiércol de Ganado Vacuno en la Finca La Poderosa. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO. <http://dspace.esepoch.edu.ec/handle/123456789/4773> Consultada 13/10/2019. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v29i1.1906>
- Chini, A., Bolsan, A., Hollas, C., Goldschmidt F., Fongaro, G., Treichel, H., & Kunz, A., (2019). Evaluation of Deammonification Reactor Performance and Microorganisms Community During Treatment of Digestate from Swine Sludge CSTR Biodigester. *Journal of Environmental Management*, Vol. 246, 2019, pp. 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.113> Consultada 28/12/2020.
- Chungandro Nacaza, K. R., & Manitio Cahuatijo, G. J., (2010). Diseño y Construcción de un Biodigestor para Pequeñas y Medianas Granjas. Repositorio Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1650/1/CD-2734.pdf> Consultada 25/07/2019.
- Cubas Guarnizo, W. A., & Lescano Leon, N. A., (2007). Obtención de Biogás a Partir de Estiércol de Gallina Procedente de la Granja Avícola Lescano-

- Chicama Utilizando un Biorreactor Anaerobio de Lecho Fijo. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Trujillo. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/9161> Consultada 06/12/2019. <https://doi.org/10.29197/cpu.n31.v16.2019.03>
- da Silva, M., Viancelli, A., Michelon, W., Castro, S., de Almeida, D., Fernandez, L., Hashimoto, I., Resende, L., de Souza, C., das Chagas, I., Hernández, M., Treichel, H., Rodríguez, D., & Fongaro, G., (2019). Household-based Biodigesters Promote Reduction of Enteric Virus and Bacteria in Vulnerable and Poverty Rural Area. *Environmental Pollution*, Vol. 252, 2019, pp. 8-13. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.104> Consultada 28/12/2020.
- Estrada Pareja, M. M., (2005). Manejo y Procesamiento de la Gallinaza. *Revista Lasallista de Investigación*. Vol. 2, núm. 1, enero-junio, 2005, pp. 43-48. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520108.pdf> Consultada 18/06/2019.
- Hernández Ramírez, B. A., & Ramírez Saavedra, N., (2019). Especificación de las Condiciones de Operación de un Biodigestor Usando como Materia Prima Estiércol Bovino y Equino en la Finca “Villa Italia” Ubicada en el Municipio Paipa (Boyacá). Repositorio Fundación Universidad de América. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7385> Consultada 06/12/2019. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.15.29.2020.59-75>
- Hyman, J., & Bailis, R., (2018). Assessment of the Cambodian National Biodigester Program. *Energy for Sustainable Development*. Vol. 46, 2018, pp. 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.06.008> Consultada 28/12/2020.
- InCTRL, solution. (2016). SIMBA #biogas | Soluciones inCTRL. <https://www.inctrl.com/software/simba/simbabiogas/> Consultada 28/04/2020.
- Jyothilakshmi, R. A., & Prakashb, S.V., (2016). Design, Fabrication and Experimentation of a Small Scale Anaerobic Biodigester for Domestic Biodegradable Solid Waste with Energy Recovery and Sizing Calculations. *Procedia Environmental Sciences*. Vol. 35, 2016, pp. 749-755. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.085> Consultada 28/12/2020.
- Kajau, G., & Madyira, D., (2019). Analysis of the Zimbabwe Biodigester Status. *Procedia Manufacturing*. Vol. 35, 2019, pp. 561-566. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.079> Consultada 28/12/2020.
- Neba, F.A., Asiedu, N.Y., Addo, A., Morken, J., Østerhusd, S.W., & Seidue, R., (2019). Use of Attainable Regions for Synthesis and Optimization of Multistage Anaerobic Digesters. *Applied Energy*, Vol. 242, 2019, pp. 334-350. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.095> Consultada 28/12/2020.
- Neba, F.A., Asiedu, N.Y., Addo, A., Morken, J., Østerhusd, S.W., & Seidue, R., (2020). Biodigester Rapid Analysis and Design System (B-RADeS): A Candidate Attainable Region-Based Simulator for the Synthesis of Biogas Reactor Structures. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 132, 2020, pp. 106607. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106607> Consultada 28/12/2020.
- Pedroza, J. (2005). Manual de Producción Avícola. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA). https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/11404/4271/1/avicultura_2005.pdf Consultada 06/12/2019.
- Pinzón Fernández, C. A., (2017). Implementación de Biodigestores para el Mejoramiento de la Calidad de Vida de las Familias Campesinas. *Revista de Investigaciones Agroempresariales*. Vol. 3, enero-junio, 2017, pp. 89-96. <https://doi.org/10.23850/25004468.1438> Consultada 25/07/2019.

- Rodríguez Pachón, D. A., & García Cepeda, A. F., (2017). Diseño y Construcción de un Biodigestor para la Producción de Biogás a Partir de Heces Caninas. Repositorio Universidad Distrital Francisco José De Caldas. <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6949/1/DavidAlexanderRodriguezPach%C3%B3n2017.pdf> Consultada 18/06/2019. <https://doi.org/10.48082/espacios-a20v41n43p08>
- Rojas Reyes, J. F., & Ñañez Muñoz, 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. Repositorio Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/17850> Consultada 25/07/2019. <https://doi.org/10.22490/25391887.672>
- Sánchez Sánchez, V. M., (2017). Biodigestor para el Tratamiento de Residuos Orgánicos Generados por Ganado Vacuno del Fondo de la Asociación de Ganaderos de Lambayeque. Repositorio Digital Institucional Universidad César Vallejo. <http://repository.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/10898> Consultada 25/07/2019. <https://doi.org/10.15359/cicen.1.63>
- Sierra Rios, A. X., (2013). Obtención de Biogás a Partir de Gallinaza Producida en la Granja Bellavista-Horizontes a Servicio de Incubadora Santander S.A. Repositorio Universidad Industrial de Santander. <http://noesis.uis.edu.co/handle/123456789/39375> Consultada 18/06/2019. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25119>
- Venegas Venegas, J. A., Raj Aryal, D., & Pinto Ruíz, R., (2019). Biogás, la Energía Renovable para el Desarrollo de Granjas Porcícolas en el Estado de Chiapas. Análisis Económico. Vol. 34, núm. 85, enero-abril, 2019. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-66552019000100169 Consultada 06/12/2019. <https://doi.org/10.24275/uam/azc/dcsh/ac/2019v34n85/venegas>

Notas de autor

jardila77@uan.edu.co