
Nanopartículas de hierro magnetizado en la producción de biogás de excretas de ganado porcino

Nanoparticles of iron magnetics in the production of biogas of porcine eat excrets

Espicio Monteros Curiel¹
Luis Carlos Durand Moreno²
Cástulo I. Martín del Campo Moreno³

Fecha de recepción: 23 de agosto 2018
Fecha de aprobación: 10 de diciembre 2018

Para citar este artículo: Monteros Curiel, E., Durand Moreno, L., & Martín del campo moreno, C. (2019). Nanopartículas de hierro magnetizado en la producción de biogás de excretas de ganado porcino. *Tecnogestion*, 16 (1).

Resumen

En la actualidad la producción de biogás a partir de materia orgánica dista de ser la óptima ya que en la metanogénesis se efectúa por microorganismos Archaea, que participa en el ciclo del carbono y en la descomposición de la materia orgánica. El objetivo de este trabajo es la producción de biogás a través de excretas de ganado porcino utilizando nanopartículas de fierro como sustrato, con el propósito de crear condiciones favorables a la metanogénesis, para mejorar el bioproceso y acrecentar la obtención de biogás. Las muestras fueron recolectadas de una granja porcícola. Los ST y SV tanto para el inicio como al final del proceso se cuantificaron de acuerdo a Standard Methods. La digestión anaerobia se monitoreo midiendo el biogás producido y la remoción de materia orgánica

(SV), a través de calcular el contenido final de sólidos volátiles. Los resultados se analizaron con el software ORIGEN ® the data analysis and graphing workspace.

Palabras clave: Biogás, digestión anaerobia, hierro magnetizado, nanotecnología.

Abstract

At present, the production of biogas from organic matter is far from optimal because in methanogenesis it is carried out by Archaea microorganisms, which participate in the carbon cycle and in the decomposition of organic matter. The objective of this work is the production of biogas through excreta from pigs using iron nanoparticles as a substrate, with the purpose of creating favorable

1 Profesor-Docente Titular A en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. E-mail: espicio3@yahoo.com

2 Profesor-Docente Asociado B en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. E-mail: Luis.Durand@cutonala.udg.mx

3 Profesor-Docente Titular B en el Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. E-mail: cilhuimar@gmail.com

conditions for methanogenesis, to improve bioprocess and increase the production of biogas. Samples were collected from a swine farm. ST and SV for both the beginning and the end of the process were quantified according to Standard Methods. Anaerobic digestion was monitored by measuring the biogas produced and the removal of organic matter (SV), by calculating the final content of volatile solids. The results were analyzed with the ORIGEN[®] software the data analysis and graphing workspace.

Keywords: Biogas, anaerobic digestion, iron magnetics, nanotechnology.

Introducción

La generación de biogás representan un reto para suministrar una parte de la energía necesaria para las demandas en materia de energéticos, ya que hasta el momento no se ha explotado la potencialidad de estos combustibles, los residuos de los animales de granja se han utilizado para producir energía en forma de biogás con múltiples usos, estos flujos son generados por el proceso biotecnológico básico de la fermentación anaerobia; sin embargo las condiciones con las cuales se producen distan de ser un combustible de calidad y de baja eficiencia.

La producción de biogás es una realidad, y puede representar una especie de neguentropía que coadyuve con la reducción de entropía producida por los procesos sistémicos de las urbes en diferentes partes del globo (González, 2018). En la actualidad muchos países de europea son grandes productores de biogás, como Alemania que genera más de la mitad de la energía por biomasa de todo el continente europeo. Sin embargo, México dista de conseguir la meta de producción de energías renovables del 25 por ciento para el 2018 y 30 por ciento para el 2021, con un 0.06 por ciento de generación de biogás en 2016 (SENER, 2017), aun siendo uno de los países que cuenta con mayor potencial para el desarrollo de fuentes de energía revocables.

La tecnología más usada es los biodigestores para sustratos agropecuarios, son depósitos donde se lleva a cabo la biodigestión de la biomasa en ausencia de oxígeno, utilizando como materia prima residuos orgánicos, como las excretas de ganado porcino; sin embargo la generación de biogás es limitada oscilando entre un 40-70 % de la fracción orgánica que es convertida CH₄ (Vega y Ramírez, 2015). En consecuencia, “El contenido total de nutrimentos en los residuos orgánicos es muy variable y depende de la especie que lo produce, la edad del animal, su eficiencia digestiva y el tipo de alimentación que recibe” (Taiganides *et al.*, 1996).

Tabla 1. Productividad de biogás para diferentes materias primas.

Materias Primas	Purín cerdo	Purín vacuno	Estiércol cerdo	Estiércol Vacuno	Ensilado de maíz
Generación de biogás (m ³ /tMF)	19	22	94	81	240
Energía térmica (KWh /tMF)	94	132	564	486	1,440
Electricidad (KWh /tMF)	38	53	226	194	576

Productividad de biogás para diferentes materias primas
 Poder calorífico medio = 6kWh/m³ de biogás; eficiencia de conversión a electricidad
 Fuente. (Boyle, 2004).

Por otra parte aunque existen recomendaciones nutricionales de organismos particulares y oficiales sobre el balance de las cantidades de los componentes de la dieta alimenticia para una misma raza de ganado, los ganaderos de cada región recurren a regímenes alimenticios de carácter empírico muy variado y desbalanceado, que dan como resultado una gama muy amplia de excretas.

No obstante la eficiencia de producción de biogás de la materia orgánica dista de ser la óptima ya que en el proceso de producción del biogás, la metalogénesis, se efectúa por microorganismos arcaicos (Archaea), que participa en el ciclo del carbono y en la descomposición de la materia orgánica en la biodigestión anaerobia. Sin embargo, la producción de energía a partir de la biomasa es del 30-40 %, resultando el proceso poco eficiente y poco rentable económicamente. Por ello, para mejorar la eficiencia de producción de biogás, se requirió mejorar del comportamiento de las colonias de archaeas, a través de seleccionar el consorcio de bacterias óptimas, para buscar potenciar su actividad mediante el pretratamiento de la biomasa, ya sea utilizando la hidrólisis selectiva, el calentamiento de la biomasa y la adición de sales de hierro.

Estudios indican que con el uso de NPs de hierro incrementaba la generación de metano, a través de potenciar la enzimas involucradas en la metanogénesis, y que esta podía ser fortalecida a través de una optimización del diseño de las nanopartículas, alcanzando hasta 200 % de incremento en la generación de biogás, siendo una producción mucho muy superior a cualquiera de las otras alternativas existentes.

El hierro es un elemento de los más abundantes en la corteza terrestre y un micronutriente esencial para todos los organismos vivos. Sin embargo su disponibilidad está limitada por la baja solubili-

dad y su lenta velocidad de disolución en fases con minerales que contienen hierro, en especial en soluciones de pH neutras o alcalinas, como serían suelos carbonatados, agua de mar y digestores anaeróbicos, de ahí que el pH debe de ser controlado. Por ello, bacterias, hongos y plantas han adaptado sistemas complejos de adquisición de hierro para aumentar la biodisponibilidad de hierro mineral en tales ambientes y así completar el ciclo biogeoquímico.

En estudios microbianos han sido confirmados la presencia de hierro biológico proveniente de minerales de hierro. Así pues, en la mayoría de los suelos para cultivo, los óxidos de hierro son la fuente más aprovechada de Fe para la nutrición bacteriana y de plantas, ya que este Hierro tiene que ser suministrado en fase soluble y su velocidad de disolución de los compuestos provenientes de los óxidos de hierro favorece el suministro requerido de hierro biológico. Además, como las sales de óxido de hierro no provienen de base fuertes están asociadas a la constante de hidrólisis (K_h) y constante de producto de solubilidad (K_{ps}) que están disponibles en suelos con contenidos de goethita, hematita y la ferrihidrita. Sin embargo, dependiendo del tipo de sales y del tamaño de los cristales la constante de producto de solubilidad puede aumentar en varios órdenes de magnitud la velocidad de disolución que regula el suministro de Fe soluble. Para que, la disolución de los óxidos de hierro se lleven a cabo ya sea por protonación, complejación o en especial por la reducción de Fe^{+2} en ambientes anaeróbicos, siendo este más soluble que el Fe^{+3} ya que la solubilidad del Fe^{+2} es de 0.1 M y la del Fe^{+3} es de 10^{-18} M.

Además, los aniones orgánicos derivados de la biomasa, en especial los oxalatos provenientes de los piruvatos, que son absorbidos en la superficie de las nanopartículas, delimitan los enlaces Fe^{+3} O- y

aumentar la disolución reductiva y así, fijar el hierro biológico. De ésta manera, la adición de NPs de hierro en la excretas de ganado porcino, dispersan iones de hierro activo a la dosis necesaria para las bacterias anaeróbicas y igualmente mejora el proceso de la producción de biogás, ya que asegura una distribución homogénea de iones de hierro en el medio y asegura en forma sostenida una concentración determinada en el biodigestor.



Figura 1: Estructura de nanopartículas de óxido de hierro magnetizado. Fuente. (Raquejo-Roque, K., 2011).

Las NPs de hierro se pueden introducir al mismo tiempo que la biomasa o se puede dispersar sobre las excretas ya que este producto es dirigido a las bacterias y no a la biomasa, de manera que se puede aplicar al estiércol, residuos urbanos y otras fuentes y al final del proceso es reducida la masa de residuo, debido a la alta producción de biogás, así como, las NPs de hierro es reducido en sales de hierro no tóxicos para organismos pluricelulares, lo que conlleva a tener una composta de mayor calidad como fertilizante.

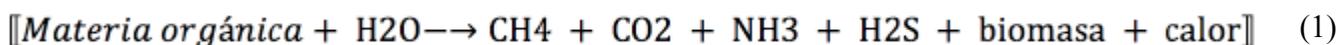
La nanotecnología se ha desarrollado para ser una opción atractiva en la ingeniería y la ciencia ambiental (Lo HM *et al.*, 2004). La nanotecnología es reconocida por la Comisión Europea como una de sus

seis ‘‘Tecnologías Habilitadoras Claves’’ que contribuyen a la competitividad sostenible y al crecimiento en varios sectores industriales. El desafío actual de la sostenibilidad, la seguridad alimentaria y el cambio climático están llevando a los investigadores a explorar el campo de la nanotecnología como una nueva fuente de mejoras para el sector agrícola (Parisi *et al.*, 2015). A la nanotecnología se le considera como la ingeniería y el arte de manipular materiales a escala (1-100nm), siendo uno de los avances más importantes en ciencia y tecnología de las últimas décadas.

Se espera que también la nanotecnología revolucione nuestra capacidad de mejorar el medio ambiente (Wilson, *et al.*, 2002). Además, ofrece mejorar el potencial de nuevos materiales, procesos y dispositivos funcionales con actividad única hacia contaminantes complejos, que impacten en el medio ambiente. Las partículas en el rango de tamaño manométrico se denominan nanopartículas (NPs). Se puede sintetizar nanopartículas de magnetita mediante el método de co-precipitación con velocidad de agitación mediante el cual se determina el rendimiento y la distribución de tamaños (Alvear *et al.*, 2017). (Figura 1). El tamaño manométrico es la propiedad cardinal para la interacción con sistemas biológicos, dado que determina la capacidad de penetrar las membranas celulares, facilitando así el paso de las barreras biológicas, la interacción con el sistema inmune, la absorción, la distribución y el metabolismo (Powell *et al.*, 2010).

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual un conjunto de múltiples microorganismos interactúan entre sí, en ausencia de oxígeno, para transformar la materia orgánica a metano y otros compuestos inorgánicos, incluyendo el agua y dióxido de carbono, como se muestra en la siguiente ecuación (Díaz, 2002).

Bacterias Anaeróbicas



El proceso de la digestión anaerobia se produce en 4 fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En estas fases intervienen diferentes tipos de microorganismos principalmente bacterias que están presentes en cada etapa y presentan distintas velocidades de crecimiento y su sensibilidad varía de acuerdo a los compuestos existentes en el medio como inhibidores, siendo el hidrógeno, amoníaco, ácido acético, etc...Es por ello, que a la culminación de las cuatro etapas se debe de alcanzar un equilibrio, para evitar la acumulación de compuestos inhibidores como son los ácidos grasos volátiles, que ocasionan disminución del pH y por ende inhibir la producción de biogás.

La producción de biogás está asociada a la eliminación de los inhibidores, ya que una degradación de las muestras sin interferentes produce rápidamente biogás y se considera como una degradación normal, en cambio si la producción de biogás representa una curva ligeramente ondulada como se muestra en la figura 2, se le denomina degradación retardada, además se tiene la curva que representa ligeramente inhibida la degradación y por último se puede percibir la inhibición total de la degradación de la materia orgánica, como resultado se tiene una producción neta de biogás negativo (Drosg *et al.*, 2013).

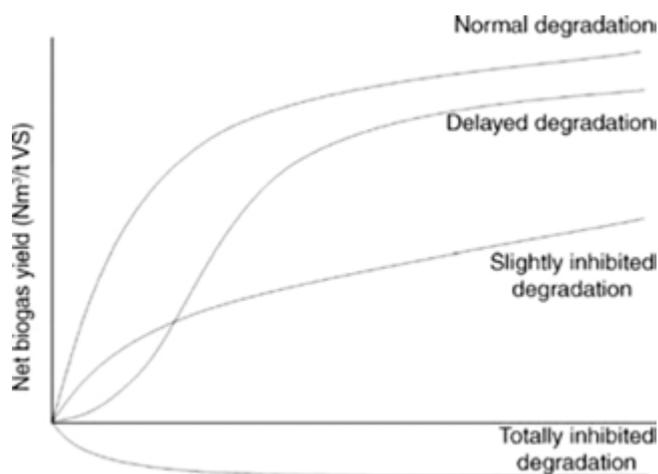


Figura 2. Formas típicas de las curvas de producción de biogás.
Fuente. (Drosg *et al.*, 2013).

La aplicación de procesos biotecnológicos para la producción de biogás, exige conocer diferentes aspectos con el fin de hacer más eficiente y optimizar la producción de los biocombustibles, como ejemplos:

- 1.- Las características de la biomasa para obtener productos útiles a través de la acción de los microorganismos. Para facilitar la acción de los microorganismos, la biomasa debe contener un porcentaje adecuado de humedad, además del tamaño de las partículas orgánicas sometidas a tratamiento.
- 2.- Los microorganismos que intervienen en las diferentes fases de la fermentación de la biomasa y de las condiciones idóneas para realizar los procesos fermentativos en forma eficiente. Considerando que existen procesos aeróbicos y anaeróbicos que favorecen el desarrollo de determinados microorganismos en las diferentes etapas de descomposición.
- 3.- La secuencia de las reacciones bioquímicas en la transformación de la biomasa, con objeto de favorecer la producción de productos útiles y evitar la formación de compuestos no deseados.

La degradación biológica se efectúa en un biodigestor; en el cual la materia orgánica se descompone sin oxígeno atmosférico (anaerobia) para dar como producto de la reacción agua, dióxido de carbono y metano (Hilbert, 1998). Aunque la variación en la composición del biogás varía depende de la composición de la biomasa utilizada, por ejemplo su composición aproximada reportada en la literatura, se muestra en la tabla 1. El metano es el constituyente más importante del biogás, desde el punto de vista económico, ya que le confiere la característica de combustible, el valor energético del biogás está en función de la

Tabla 2. Composición química del biogás.

Composición	% total
Metano CH ₄	50-70
Dióxido de carbono CO ₂	30-40
Hidrogeno H ₂	1-10
Nitrógeno N ₂	1 -6

Fuente: Adaptado de Vega y Ramírez (2015).

concentración de metano que tiene un valor energético de 20 MJ/m³ - 25 MJ/m³, en cambio el gas natural proveniente del petróleo tiene un rango de 33 MJ/m³- 38 MJ/m³.

Materiales y métodos

Es este estudio, se propuso que la adición de nanopartículas (NP) de hierro potenciara el proceso anaerobio y aceleraran la digestión biológica, lo que aumentaría la producción de biogás. Los efectos de las NP en la producción de biogás se investigaron utilizando un sistema anaerobio por lotes. Para este propósito, se utilizaron seis reactores de 500 mL para estudiar los efectos de las nanopartículas de hierro con una carga de 8.0 mg de nanopartículas Fe/ Kg de excretas frescas, siendo la concentración óptima para el mayor rendimiento (Córdova, *et. al.*, 2017) a temperatura ambiente y controlada 34 °C, con una carga de excreta fresca de 0.150 Kg.

Las muestras de excretas de ganado porcino se recolectaron del área de cerdos en desarrollo, reproductora gestación, lechones en destete y reproductora lactancia, teniendo la precaución de que sean frescas y recientes, para que posteriormente se mezclaron y homogenizaron. Dicha recolección fue de una granja ubicada en el poblado de las Moras, Municipio de Puente Grande, Jalisco. México.

Posteriormente se pesó 0.150 Kg de excretas y se mezclaron con 0.200L de agua destilada como factor de dilución, cumpliendo con la relación de 1:1.3 para depositarse en cada uno de los reactores y cumpliendo con el rango de 6-10 % de sólidos totales, para ello, se aplicó la siguiente fórmula:

$$\text{Sólidos totales (mg/L)} = \frac{1000(A-B)}{\text{mL de la muestra}} \quad (2)$$

Dónde:

A = peso de la capsula de porcelana + residuo seco (mg)

B = Peso de la capsula (mg)

Para determinación de los sólidos totales, se introdujeron tres capsulas de porcelana a una estufa a la temperatura de 110 °C durante 24 horas con la finalidad de eliminar la humedad contenida en las capsulas, para posteriormente introducirlo en el desecador para enfriarlas y pesarlas en la balanza analítica hasta peso constante. Posteriormente se incorporan 10 mL de excretas en las capsulas y se llevaron al horno a una temperatura de 110 °C durante 24 horas,

Tabla 3. Características del alimento del ganado porcino.

Cerdos	Proteína	Grasa	Fibra	Cenizas	Humedad	E.L.N
Desarrollo	15.0%	2.5%	5.0%	8.0%	12.0%	57.5%
Gestación	12.0%	2.0%	10.0%	8.0%	12.0%	50.0%
Lechones	22.0%	3.5%	4.0%	8.0%	12.0%	54.0%
Lactancia	14.0%	3.0%	6.0%	8.0%	12.0%	58.0%

Fuente. (Nutrimentos Ramírez, S. A. de C.V).

al término de los cuales se pesaron obteniendo los resultados que muestra la tabla 4. Posteriormente se determinó la cantidad de sólidos volátiles, partiendo del contenido de sólidos fijos y el peso perdido por la ignición para determinar la presencia de sólidos volátiles, aplicando la siguiente ecuación.

$$\text{Sólidos volátiles (mg/L)} = \frac{1000(A-B)}{\text{mL de la muestra}} \quad (3)$$

Dónde:

A = peso de la capsula de porcelana + residuo seco (mg)

B = Peso de la capsula (mg) + residuo calcinado (mg)

Para ello, la muestra se calcino (previamente seca a 110 °C en una mufla a una temperatura de 550 °C durante 24 horas. Antes de sacar la muestra de la mufla, se debe permitir que la temperatura baje hasta 105 °C; entonces se colocó en un desecador y se dejó a que baje la temperatura ambiente. Posteriormente se registró el peso de la capsula con la muestra calcinada y se aplicó la fórmula, dando los valores que se muestran en la tabla 4.

El pH es una variable que influye en el proceso anaeróbico al encontrarse fuera de rango óptimo, los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a la variación del pH, comparados con los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica. El nivel óptimo para los diferentes grupos bacterianos que se encuentran en el proceso de digestión anaeróbica, es entre 5.5 y 6.5 para acidogénicos y entre 7.8 y 8.2 para metanogénicos. En cambio el pH para cultivos mixtos está dentro del rango entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el ideal.

Para que un proceso se lleve a cabo normalmente, el pH no debe de bajar de 6.0 ni subir de 8.0. Además el pH en el proceso de digestión no solo contribuye a la producción de biogás sino también a su composición (Varnero y Arellano, 1991). Una de las causas de que se tengan un descenso del pH a valores de 6.0 es que el biogás producido es muy pobre en metano. Razón por la cual, la metalogénesis es considerada la etapa limitante del proceso, por consecuencia es necesario mantener el pH del biodigestor cerca de la neutralidad, en cambio los acidogénicos se consideran menos sensibles a valores extremos de pH.

Tabla 4. Resultado de los sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) promedios de la muestra inicial.

Muestra	Inicio (Sólidos totales)	Inicio (Sólidos Volátiles)
Excretas de cerdo	83,000 ppm (8.30 %)	63,500 ppm (6.35%)

1ppm equivale a 0.0001 %

Fuente. (Elaboración propia, 2018).

Tabla 5. Peso de las muestras frescas y el pH promedio de la muestra inicial.

Muestra	Muestra fresca	Agua destilada	pH inicial
Excreta de ganado porcino	0.150 Kg	0.200 L	7.28

Fuente. (Elaboración propia, 2018).

Para la determinación del pH se realizó mediante una dilución de 1:1.3 de excreta y agua destilada utilizando un potenciómetro marca Orion Star Thermo Scientific como se muestra en la tabla 5.

En los procesos anaeróbicos, al igual que otras variables la temperatura juega un papel importante, ya que la velocidad de las reacciones de los procesos biológicos es dependiente de la velocidad de crecimiento de la flora microbiana, es decir que la temperatura es directamente proporcional al aumento de la velocidad de crecimiento de los microorganismos y a la vez favorece el proceso de biodigestión, para dar lugar a mayor producción de biogás.

Los cambios bruscos de temperatura en el digestor pueden retardar la producción de biogás, por ello se implementaron dos experimentos; uno a la temperatura ambiente que en promedio fue de 22 °C y la otra a una temperatura de 34 °C controlada por un termostato. En los dos casos se garantizó la agitación, y con respecto a la medición de la temperatura esta se determinó con el termómetro digital de infrarrojo Cole Palmer.

Después de realizar las diluciones en cada uno de los 6 reactores de cristal (Figura 2) con capacidad de 500 mL como depósito de la mezcla agua-excretas, actuando como un biodigestor discontinuo. Para ello, 3 biodigestores, de los cuales 2 se les incorporó 8 mg de nanopartículas de hierro (100 nm) y 1 sin nanopartículas, para introducirlos dentro de una tina conteniendo agua calentada por una resistencia a fin de mantener la temperatura a 34 °C y los otros 3 biodigestores (2 se les introdujo 8 mg de nanopartículas de hierro 1 sin nanopartículas de hierro), se dejaron a la intemperie a una temperatura promedio de 22 °C (Figura 3).

De acuerdo a la bibliografía las diluciones más adecuadas en relación a los sólidos totales, % humedad, pH y relación carbono/nitrógeno, para porcino 16:1 (Varnero y Arellano, 1991) fue de

una parte de excretas por 1.3 de agua destilada. El volumen del biogás producido tanto de los biodigestores a temperatura de 34 °C como a la temperatura de 22 °C, fue recolectado en una tina de agua con probetas graduadas invertidas para recolectar el gas por desplazamiento del agua.



Figura 3. Sistema de experimentación con biodigestores a 34 °C de excretas. Fuente. (Elaboración propia, 2018).



Figura 4: Sistema de experimentación con biodigestores a temperatura ambiente (22 °C). Fuente. (Elaboración propia, 2018).

Resultados y discusiones

Con respecto a los objetivos planteados, ha sido factible obtener el biogás utilizando excretas de ganado porcino incorporándole nanopartículas de hierro a temperatura controlada de 34 °C y temperatura ambiente (22 °C) respectivamente, así como determinar la producción diaria de biogás a nivel de laboratorio utilizando matraces kitazato como biodigestores discontinuos y comparar la producción de biogás a las dos temperaturas experimentadas. El proceso de biodigestión anaerobia se llevó a cabo mediante un control adecuado de las variables involucradas.

En la tabla 6 y en las gráfico 1, se muestran los resultados obtenidos en la experimentación para la excreta de ganado porcino con nanopartículas de hierro y sin nanopartículas a las temperaturas de 30 °C y 22 °C, además se observa que la generación de biogás es mayor en el experimento 3 NP (22 °C) y que la producción de biogás con temperatura controlada y con nanopartículas y sin nanopartículas de hierro es muy similar.

En tabla 7 y gráfico 2 se puede apreciar que la producción de biogás acumulado del experimento 3 (NP) con nanopartículas de hierro y a temperatura ambiente (22 °C) es la que produce en mayor cantidad de biogás. Posteriormente se efectuaron

Tabla 6. Producción promedio de biogás de las excretas de ganado porcino con nanopartículas de (NP) hierro y sin nanopartículas de hierro (NP).

Días de generación	Exp.1 SNT (34 °C)	Exp.2 NPT (34 °C)	Exp.3 NP (22 °C)	Exp.4 SN (22 °C)
	mL	mL	mL	mL
1	0	0	0	0
2	240	235	117,5	110
3	240	225	192,5	175
4	270	255	247,5	145
5	255	260	275	165
6	220	227,5	325	225
7	130	142,5	265	220
8	70	67,5	142,5	130
9	60	70	75	50
10	40	55	157,5	75
11	10	25	92,5	40

Fuente. (Elaboración propia, 2018).

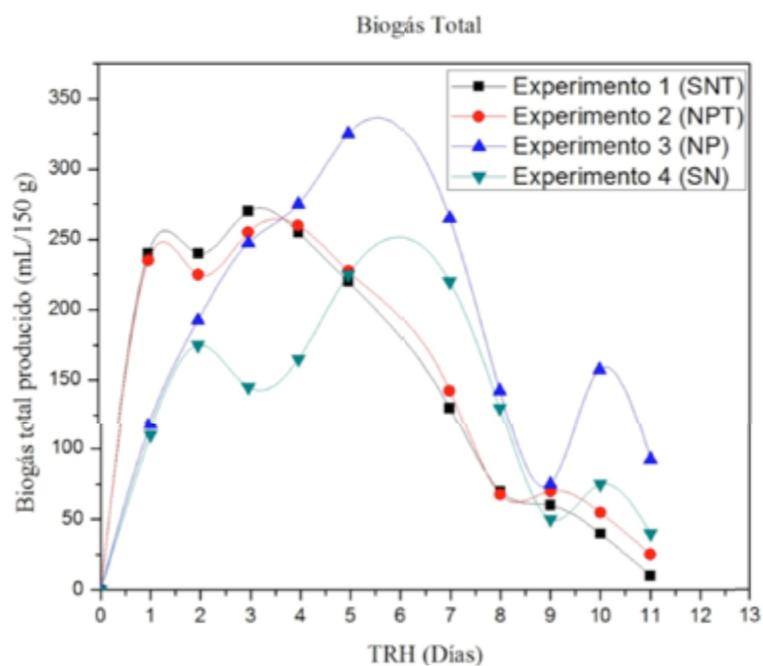


Gráfico 1. Producción de biogás de excretas de ganado porcino con nanopartículas de (NP) hierro y sin nanopartículas de hierro (NP).
Fuente. (Elaboración propia, 2018).

Tabla 7. Producción acumulada de biogás de las excretas de ganado porcino.

Días de generación	Exp.1 SNT (34 °C)	Exp.2 NPT (34 °C)	Exp.3 NP (22 °C)	Exp.4 SN (22 °C)
	mL	mL	mL	mL
1	0	0	0	0
2	240	235	117,5	110
3	480	460	310	285
4	750	715	557.5	430
5	255	975	832.5	595
6	1005	1202.5	1157.5	820
7	1135	1345	1422.5	1040
8	1205	1412.50	1565	1170
9	1265	1482.50	1640	1220
10	1305	1537.50	1797.5	1295
11	1315	1562.50	1890	1335

Fuente. (Elaboración propia, 2018).

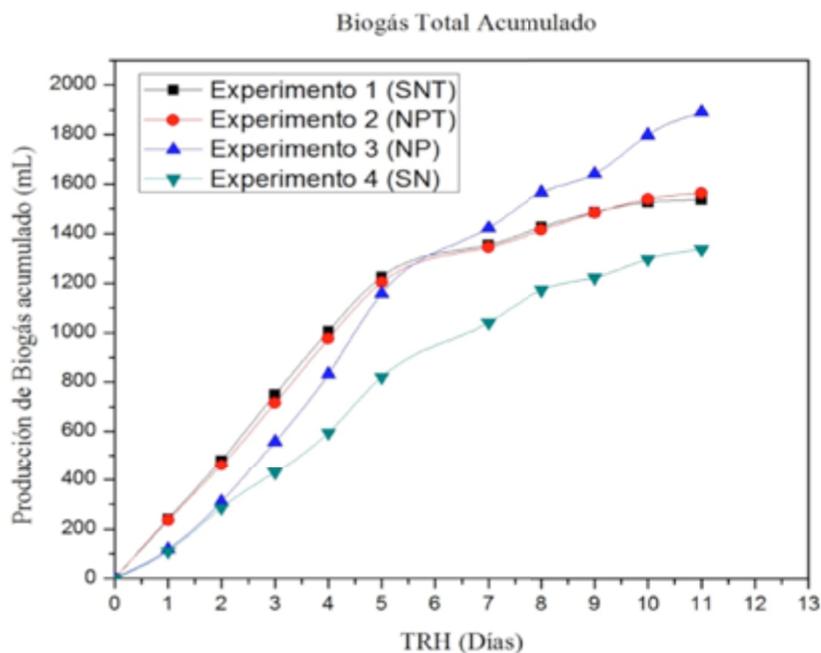


Gráfico 2. Producción acumulada de biogás de las excretas de ganado porcino con nanopartículas de (NP) hierro y sin nanopartículas de hierro (NP).
Fuente. (Elaboración propia, 2018).

análisis fisicoquímicos en la excretas de ganado porcino en los seis experimentos, con dos repeticiones para cada uno y las mismas porciones de excretas y agua destilada. Para ello se determinó los sólidos totales, utilizando el procedimiento como lo indica el método estándar 2540B, como se muestra en la tabla 8.

En el gráfico 3 se puede apreciar que el valor promedio de los sólidos totales de inicio es de 83070 ppm (8.30%) para los cuatro experimentos, paso a 28320 (2.80%) para los Exp. 1,2 (SNT y NPT), de igual manera para los Exp.3, 4 (NP y SN) fue de 17270 ppm (1.72%), observándose una disminución para los dos casos.

Tabla 8. Valores de sólidos totales promedio de la excretas de ganado porcino a temperatura ambiente y controlada.

Muestra	Inicio (Sólidos totales)	Inicio (Solidos totales)
Exp.1,2(SNT Y NPT)	83,070 ppm (8.30 %)	28,320 ppm (2.80%)
Exp. 3,4 (NP y SN)	83,070 ppm (8.30 %)	17,270 ppm (1.72%)

1ppm equivale a 0.0001%

Fuente. (Elaboración propia, 2018).

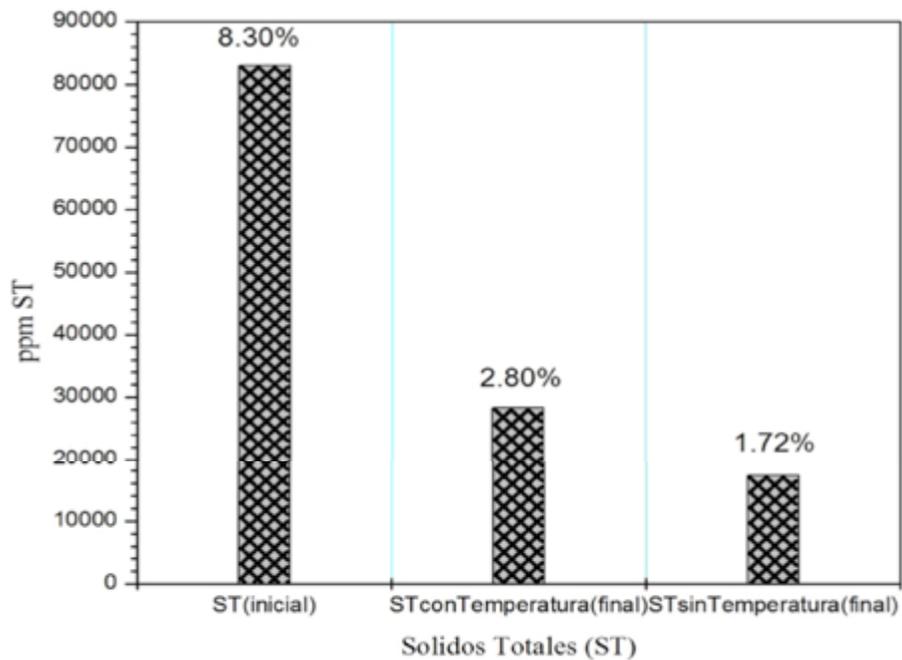


Gráfico 3. Sólidos totales en partes por millón (ppm) para las muestras de excretas a temperatura ambiente y controlada, proveniente de los Exp. 1,2 y Exp. 3,4.
Fuente. (Elaboración propia, 2018).

Para la determinación de sólidos volátiles se aplicó el método estándar y las mediciones que arrojó los experimentos, fueron las siguientes:

Tabla 9. Valores de sólidos volátiles promedio de la excretas de ganado porcino a temperatura ambiente y controlada.

Muestra	Inicio (Sólidos totales)	Inicio (Solidos totales)
Exp.1,2(SNT Y NPT)	63,550 ppm (6.30 %)	18,880 ppm (1.80%)
Exp. 3,4 (NP y SN)	63,550 ppm (6.30 %)	11,540 ppm (1.15%)

1ppm equivale a 0.0001%

Fuente. (Elaboración propia, 2018).

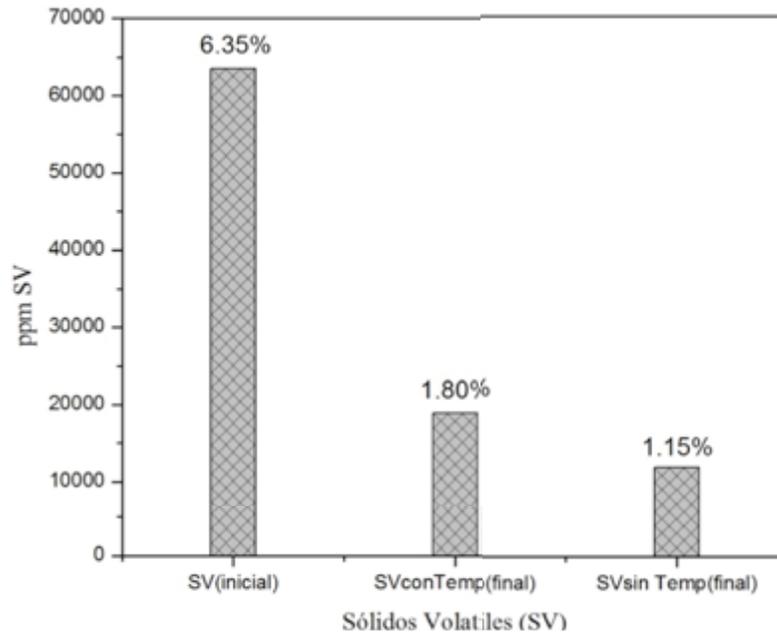


Gráfico 4. Sólidos volátiles en partes por millón (ppm) para las muestras de excretas a temperatura ambiente y controlada, proveniente de los Exp. 1,2 y Exp. 3,4. Fuente. (Elaboración propia, 2018).

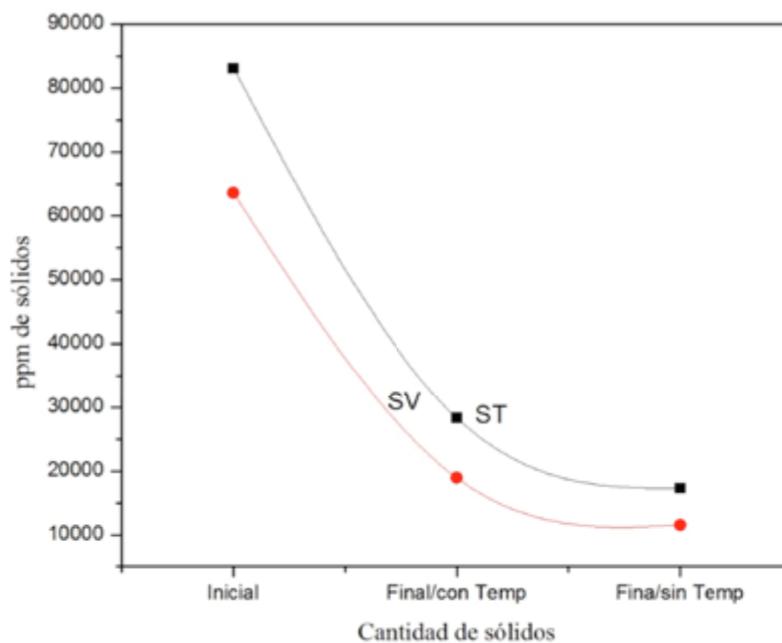


Gráfico 5. Relación de Sólidos totales y volátiles en partes por millón (ppm) para las muestras de excretas a temperatura ambiente y controlada, proveniente de los Exp. 1,2 y Exp. 3,4. Fuente. (Elaboración propia, 2018).

Como se observa en la tabla 9 y gráfico 4, se obtuvo 63550 ppm (6.35%) al inicio del proceso, tanto para los Exp. 1,2 y Exp. 3,4. En cambio para el análisis de los sólidos volátiles finales fue de; 1.80% para Exp. 1,2 y 1.15% de los Exp. 3,4.

En el gráfico 5 se puede apreciar las curvas que representan a los sólidos totales tanto inicial como final, así como los sólidos volátiles. El margen de diferencia entre las dos curvas está representado por el rendimiento del proceso. Se pudo comprobar que el gas generado en los biodigestores del laboratorio es un gas inflamable y con olor característica de la mezcla del biogás, como se muestra en la figura 6, donde se realizó la prueba a la llama para la identificación del metano como único gas inflamable producto de la fase metanogénica de la digestión anaeróbica de la excretas de ganado porcino con nanopartículas de hierro y sin nanopartículas de hierro.

Discusiones

Las ventajas de la experimentación en el laboratorio son: potencial de recuperación de biogás, fácil de construir e instalar, bajo costo en los materiales, repetitividad y reproductibilidad, ya que prácticamente se dispuso de los materiales y equipos disponibles en el laboratorio, no distando a la funcionalidad de otros experimentos revisados en la literatura. Como reporta la literatura los valores de pH menores que 6.3 y mayores de 7.8, las condiciones cinéticas no son favorables para la etapa de la metanogénesis, con consecuencia es vital cuidar que el pH se encuentre dentro del rango antes comentado, ya que esto puede provocar una disminución en su producción de biogás, al inhibir a la bacterias formadoras de metano. En lo que respecta al experimento el pH inicial de la muestra de excretas de ganado porcino fue de

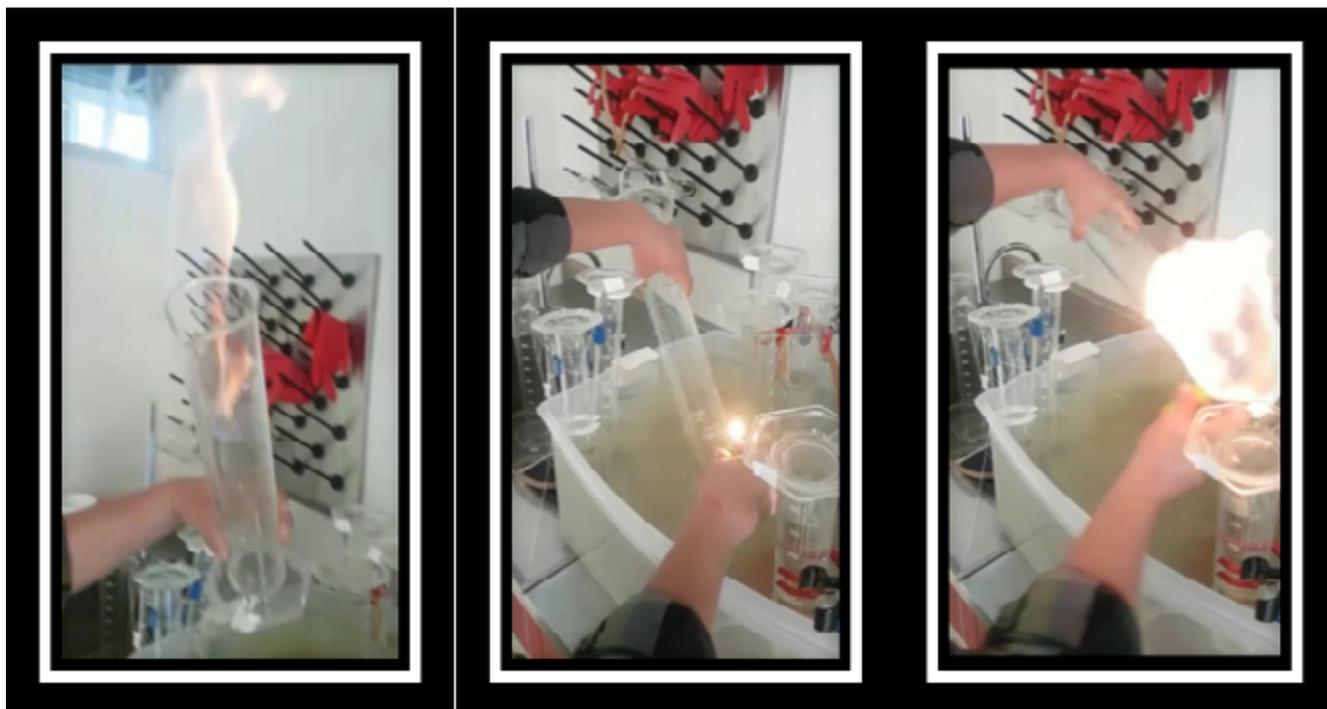


Figura 6. Prueba de la llama para identificación de metano en el biogás.
Fuente. (Elaboración propia, 2018).

7.28 y al final 7.19, este valor final de pH obtenido, se encuentra dentro del rango establecido por la literatura, lo que nos indica que el proceso de digestión anaerobia ocurrido en esta muestra está en la fase de la metanogénesis.

En la digestión anaerobia la influencia de la temperatura está asociada a la actividad enzimática y por lo tanto varía la velocidad del proceso de digestión; estas variaciones de la temperatura pueden inhibir el desarrollo de los microorganismos y las temperaturas óptimas están en el rango de 20–40 °C. Con respecto al experimento estas fueron de 22 °C siendo la temperatura ambiente y 34 °C la temperatura controlada. En consecuencia, estos valores obtenidos durante todo el proceso indican que el conjunto de muestras experimentales se encuentran dentro del rango de temperatura óptima para el desarrollo de microorganismos anaeróbicos (Monteros *et. al.*, 2017).

El contenido de sólidos totales contenido en la mezcla de excretas con que se carga el biodigestor anaerobio es uno de los parámetros más importantes para una eficiencia de la producción de biogás, ya que según lo reportan en la literatura el rango deseable está dentro de los intervalos del 4 al 16 %; un rango mayor puede retardar o inhibir en su totalidad la biodegradación (Drosg *et al.*, 2013). En lo que respecta a este trabajo experimental los valores promedios de los sólidos totales de la excreta de ganado porcino al inicio fue de 8.30 %, encontrándose dentro del rango establecido para una adecuada biodegradación y el proceso de digestión anaerobia sea adecuada. El contenido de sólidos volátiles en la mezcla de excretas nos representan la cantidad de materia orgánica que tiene la muestra, ya que para una producción adecuada de biogás se recomienda un intervalo de 3 a 8 %, (Castellanos, 1990), que para ello, se obtuvo un valor promedio de sólidos

volátiles de la muestra inicial de 6.35%, por lo tanto, este valor obtenido está dentro del rango óptimo que reporta la literatura.

La producción de biogás está asociada a la eliminación de los inhibidores, ya que una degradación de las muestras sin interferentes produce rápidamente biogás y se considera como una degradación normal, en cambio si la producción de biogás representa una curva ligeramente ondulada como se muestra en la figura 3, se le denomina degradación retardada, además se tiene la curva que representa ligeramente inhibida la degradación y por último se puede percibir la inhibición total de la degradación de la materia orgánica, como resultado se tiene una producción neta de biogás negativo (Drosg *et al.*, 2013). Los resultados obtenidos del experimento se aprecian en el gráfico 2 de la generación de biogás acumulado durante 11 días, obteniéndose una curva de frecuencias acumuladas para el Exp. 3 (NP), que corresponde a la curva normal de degradación de la figura 3, así mismo para los Ex. 1 (SNT) y Exp. 2 (NPT), en cambio para el Exp.4 (SN) le corresponde una degradación retardada.

Conclusiones

Se obtuvo la producción de biogás a partir de excretas de ganado porcino con nanopartículas de hierro a temperatura ambiente y controlada y como testigos sin nanopartículas de hierro a las mismas temperaturas, siendo el experimento con nanopartículas de hierro y temperatura ambiente el de mayor producción.

La cantidad de producción acumulada en volumen de biogás o total del experimento con nanopartículas de hierro a temperatura ambiente fue mayor que la de temperatura controlada, lo cual indica

que la muestra fue degradada sin interferentes y se le considera una degradación normal.

La adición de nanopartículas de hierro como metales trazas favorece la producción de biogás al ser consumido por las bacterias metanogénicas, no así el tiempo de mayor producción de biogás, ya que el experimento de temperatura controlada fue el de menor tiempo de residencia hidráulico.

Bibliografía

- ALVEAR, D., GALEAS, S., GUERRERO, V. Y DEBUT, A. (2017). “Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de Magnetita”. Ecuador. Revista *Politécnica*. Vol. 39, Núm. 2.
- BAQUEDANO M. (1979). *Los digestores: Energía y fertilizantes para el desarrollo rural*. Xalapa, Veracruz. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos (INIREB), p. 30.
- BRAKEL, J. (1980). “Small-Scale Anaerobic Digesters (Biogas Plants): A Critical Review of the Pre-1970 Literature Softback”. Ex-Library. *Delft University Press*.
- BROWN, N. (1987). *Biogas systems in development*. *Appropriate Technology*. 14 (3): 5-7.
- BOYLE G. (2004). “Renewable Energy”. England. *Oxford University Press*.
- CERVANTES R. (2002). *Diseño de un biodigestor para la producción de biogás en una vivienda*. Tesis profesional, DIMA. México. Universidad Autónoma Chapingo.
- COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA. (2006). *Guía del Mecanismo de Desarrollo Limpio para Proyectos del Sector Energía en Chile*. Santiago, Chile. Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ), Cooperación Intergubernamental Chile-Alemania, p. 69.
- DEUBLEIN D. Y STEINHAUSER A. (2008). *Biogas from waste and renewable resources: An Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim, Alemania, p. 443.
- DÍAZ, M., ESPITIA, R. Y MOLINA, F. (2002). Digestión anaerobia. Una aproximación a la tecnología. Universidad Nacional de Colombia. Instituto de Biotecnología. Bogotá. Colombia.
- DOMÍNGUEZ, P. Y LY, J. (2000). *Biodigestores como componentes de sistemas agropecuarios integrados*. Instituto de Investigaciones Porcinas. PO Box 1, Punta Brava, La Habana, Cuba.
- DROSG, B., AL SAEDI, T., BRAUN, R., AND BOCHMANN, G. (2013). Analysis and Characterisation of Biogas Feedstocks. In: *The Biogas Handbook: Science, production and applications*.pg. 52-84.
- E. ABDELSALAM, M. SAMER, M.A. ABDEL-HADI, H.E. HASSAN, Y. BADR, (2017). Influence of zero valent iron nanoparticles and magnetic iron oxide nanoparticles on biogas methane production from anaerobic digestion of manure. *J. Energy*. 120. Page. 842 -853.
- E. ABDELSALAM., M. SAMER., Y.A. ATTIA., M.A. ABDEL-HADI. H.E. HASSAN. Y Y. BADR (2016). Comparison of nanoparticles effects on biogas and methane production from anaerobic digestion of cattle dung slurry. *Renewable Energy*. 87 (592-598).

- FACCHIN, V., CAVINATO, C., FATONE, F., PAVAN, P., CECCHI, F. Y BOLZONELLA, D. (2013). Effect of trace elements supplementation on the mesophilic anaerobic digestion of food waste in batch trials: the influence of inoculum origin. *Biochemical Engineering Journal*. 70 (71-77).
- GONZÁLEZ, M. (2018). Entropy and negentropy of private electric vehicles in urban systems: homeostasis of mobility in Mexico. *DYNA*, 85(206), pp. 171-177. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.72509>.
- GUEVARA, V. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú.
- GUNNERSON, C.G. Y STUCKEY, D.C. (1968). "Anaerobic digestion. Principles and practices for biogas systems". Washington D.C. *The World Bank Technical Paper* Núm. 49, pp. 93-100.
- KATHERINNE ISABEL REQUEJO-ROQUE (2011). «¿Al fin nanopartículas de óxido de hierro estables en el cuerpo humano?». Pontificia Universidad Católica del Perú. *Revista de Química PUCP*. Vol. 25, nº 1-2.
- HERRERA, G. (2010). *Producción de biogás a partir de desechos de bovinos como una alternativa de energía renovable*. Veracruz. México.
- HILBERT, J. (1998). "Manual para la producción de biogás. Instituto de Ingeniería Rural I.N.T.A. – Castelar", p. 57.
- HONG QIANG, DONG-LI Y YU-YOU LI (2012). High-solid mesophilic methane fermentation of food waste with an emphasis on Iron, Cobalt, and Nickel requirements. *Biore-source Technology*. 103 (21-27).
- HONG QIANG, QIGUI NIU., YONG ZHI-CHS Y YU-YOU LI (2012). Trace metals requirements for continuous thermophilic methane fermentation of high-solid food waste. *Chemical Engineering Journal*. 222(330-336).
- LAGRANGE, B. (1979). "Biomethane. Principles, Techniques, Utilization". Vol. 2. *Edisual / Energies Alternatives*, p. 249.
- LAROUÏ H, WILSON DS, DALMASSO G, SALAITA K, MURTHYN, SITARAMAN SV, et. al. (2011). "Nanomedicine in GI. American journal of physiology". *Gastrointest Liver Physiol*. 300:371e83.
- LETTINGA, G. Y VAN HAANDEL, A. (1993). "Anaerobic digestion for energy production and environmental protection. In: Renewable Energy. Sources for Fuels and Electricity". ED. JOHANSSON, T.; KELLY, H.; REDDY, A.; WILLIAMS, R., EARTHSCAN, WASHINGTON. *Island Press*.
- LO HM, CHIU HY, LO SW, LO FC. (2012). *Effects of micro-nano and non micro-nano MSWI ashes addition on MSW anaerobic digestion*. *Bioresour Technol* 114:90-4.
- LÓPEZ, A. (1997). "Valorización del estiércol de cerdo a través de la producción de biogás". Asociación colombiana de porcicultores fondo nacional de la porcicultura.

- MAGAÑA R. J. L.; TORRES R. E.; MARTÍNEZ G. M. T.; SANDOVAL J. C.; HERNÁNDEZ C. R. (2006). *Producción de Biogás a Nivel Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras*. Guanajuato, México. Universidad de Guanajuato.
- MARCHAIM, U. (1992). *Biogas processes for sustainable development*. Bull FAO Agric Services. Roma, Italia. Consultado en línea el 10 de noviembre 2016. Disponible en: https://books.google.com.mx/books?id=NLDRTXyp0IcC&printsec=frontcover&dq=marchaim+1992&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwik4b_F_KbRAhUIzmMKHepdCSkQ6AEIHjAA#v=onepage&q=marchaim%201992&f=false.
- MONTEROS, E., DURAND, L. MORA, E. Y SANTOS, E (2017). Comparación de dos tipos de biomasa para generación de biogás a partir de excretas de ganado porcino y bovino en el laboratorio. *Revista Tecnogestión*, 14 (1).
- MEISSNER Y, LAMPRECHT A. (2008). “Alternative drug delivery approaches for the therapy of inflammatory bowel disease”. *J Pharm Sci*. 97:2878-91.
- OSORIO, J, CIRO, H. Y GONZÁLEZ, H. (2007). “Evaluación de un Sistema de Biodigestión en Serie para Clima Frío”. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*. Medellín, Colombia. 60(2): 41454162.
- PARISI C, VIGANI M, RODRÍGUEZ-CEREZO E. (2015) *Agricultural Nanotechnologies: what are the current possibilities?* *Nano Today*. 10(2):124-7.
- PASCUAL, J. (2011). *Rediseño y Ensayo de un Biodigestor en la Granja Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo*. Chapingo, México.
- PORTALES A. (1990). Construcción de un biodigestor anaerobio para la producción de metano en aéreas rurales. Tesis profesional, Universidad de Guanajuato.
- POWELL JJ, FARIA N, THOMAS-MCKAY E, PELE LC. (2010). “Origin and fate of dietary nanoparticles and microparticles in the gastrointestinal tract”. *J Autoimmun*. 34(3):J226-33.
- RODRÍGUEZ, J. A. (2005). Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Profesora asociada de la Universidad el Valle. Calí. Colombia. Consultados en noviembre 2016. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/fulltext/tratamiento.pdf>
- RODRÍGUEZ J.C., EL ATRACH, K., RUMBOS, E. Y DELEPIANI, A.G. (1997). “Resultados experimentales sobre la producción de biogás a través de la bora y el estiércol de ganado”. Venezuela. *Agronomía Tropical*. 47(4): 441-455.
- REQUEJO-ROQUE, KATHERINNE ISABEL (2011). “¿Al fin nanopartículas de óxido de hierro estables en el cuerpo humano?” Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú. *Revista de Química PUCP*. Vol. 25, núm.1-2.
- RIVAS, O. Y M. FAITH & GUILLÉN, R. (2010). “Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad”. Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. 23(1): 39-46.

- SECRETARÍA DE ECONOMÍA. DIRECCIÓN GENERAL DE NORMAS (1984a). Norma Mexicana NMX-AA-16-1984. Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - determinación de humedad. 14 de diciembre de 1984.
- SECRETARÍA DE ENERGÍA (2017). *Reporte de avance de energías limpias 2016*. México. Disponible en el siguiente links: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232624/Informe_Renovables_2016_12062017.pdf.
- SHARPE R. Y SKAKKEBÆK N. (1993). "Are oestrogens involved in falling sperm counts and disorders of the male reproductive tract?" *The Lancet* 341, 1392-1395. Disponible con: DOI: 10.1016/s0140-6736(93)90953-E.
- SORIA, M. J., FERRERA-CERRATO, RY ET-CHEVERS, J.; ALCÁNTAR, G.; TRINIDAD, J.; BORGES, L. & PEREYDA, G. (2001). "Producción de Biofertilizantes Mediante Biodigestión de Excreta Líquida de Cerdo". México. *Terra*. 19(4): 354-361.
- SCHMID, L.A. Y LIPPER, R.Z. (1969). "Swine wastes, characterization and anaerobic digestion". *Proceeding of the Conference on Agricultural Wastes Management*, New York, USA. Cornell University, pp. 50-57.
- TAIGANIDES, P. E., PÉREZ, E. R. Y GIRÓN, S. E. (1996). Manual para el manejo y control de aguas residuales y excretas porcinas en México. Consejo mexicano de porcicultura. Pag.77-80.
- VARNERO, M.T. Y ARELLANO, J. (1991). *Aprovechamiento racional de desechos orgánicos*. Ministerio de Agricultura (FIA). Santiago, Chile. Informe Técnico. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile, p. 98.
- VEGA, J. Y RAMÍREZ, S. (2014). *Fuentes de energía, renovables y no renovables aplicaciones*. México. Ed. Alfa omega.
- WILSON M, KANNANGARA K, SMITH G, SIMMONS M, RAGUSE B. (2002). *Nanotechnology: basic science and emerging technologies*. New York: Chapman & Hall/CRC.