

Estudio biofísicoquímico de biodigestores alimentados con excretas porcinas y bovinas en la provincia Sumapaz, Colombia



Biophysicochemical study of biodigesters fed with pig and bovine manure, in Sumapaz Province, Colombia

CU-ID: 2177/v31n3e02

Jairo Enrique Granados-Moreno*, Diego Andrés Abril-Herrera, Andrés Mogollón-Reina

Universidad de Cundinamarca, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia.

RESUMEN: En los últimos años se ha implementado la construcción de sistemas de biodigestión, consiguiendo resultados efectivos en materia económica, energética y ambiental, donde se han incrementado la producción anual de biogás en niveles significativos con el propósito de producir energía eléctrica y calorífica (Steyer et al., 2006). El objetivo evaluar el comportamiento de 4 biodigestores abastecidos con excretas bovinas y porcinas y la calidad biofísicoquímica de sus bioles, en el municipio de Fusagasugá Cundinamarca. Se realizaron cinco momentos de análisis de variables en campo (T, HR, pH) y muestras de afluentes, efluentes provenientes de cuatro biodigestores, ubicados en sistemas productivos (3 porcinos y 1 bovino) del municipio de Fusagasugá, para ser transportados al laboratorio de nutrición de la universidad de Cundinamarca, donde por medio de técnicas analíticas instrumentales como potenciometría, gravimetría, medición multiparamétrica, titulación y espectrofotometría, se evaluaron variables: pH, sólidos totales disueltos (TDS), conductividad eléctrica (CE), nitrógeno, fósforo y potasio. Los indicadores biofísicoquímicos determinados en abonos líquidos-bioles, mostraron valores de pH ligeramente alcalinos, CE y TDS altos, contenidos de nitrógeno disponible y potasio medianamente concentrados y valores de Fósforo ligeramente inferiores a lo reportado en otros trabajos similares, lo cual permite recomendarlos para su uso como biofertilizantes líquidos en cultivos moderadamente tolerantes. El biogás producido en los biodigestores Mirador y Santa Bárbara, presentaron la mayor concentración de gas metano, superando de forma significativa ($P < 0.050$) al CH_4 obtenido en Meseta y Saucita, lo cual se puede explicar por el tipo de sustrato utilizado (estiércol porcino y bovino) y las condiciones climatológicas de los predios estudiados.

Palabras clave: Biodigestión anaeróbica, biofertilizante, biomasa.

ABSTRACT: In recent years, the construction of biodigestion systems has been implemented, achieving effective results in economic, energy and environmental matters, where the annual production of biogas has increased to significant levels with the purpose of producing electrical and heat energy (Steyer *et al.* 2006). The work aimed to evaluate the behavior of 4 biodigesters supplied with bovine and porcine excreta and to assess the biophysicochemical quality of their biols, in Fusagasuga Municipality, Cundinamarca. Five moments of analysis of variables in the field (T, HR, pH) and sampling of tributaries, effluents from four biodigesters, located in production systems (3 pigs and 1 bovine) in Fusagasugá Municipality were performed. Samples were transported to the nutrition laboratory of University of Cundinamarca, where through instrumental analytical techniques such as potentiometric tests, gravimetry, multiparametric measurement, titration and spectrophotometry, variables like pH, total dissolved solids (TDS), electrical conductivity (EC), nitrogen, phosphorus and potassium were evaluated. Biophysicochemical indicators determined in liquid fertilizers-biols, showed slightly alkaline pH values, high EC and TDS, moderately concentrated available nitrogen and potassium contents and slightly lower phosphorus values than those reported in other similar works, which allows recommending them for use as liquid biofertilizers in moderately tolerant crops. Biogas produced in Mirador and Santa Bárbara biodigesters presented the highest concentration of methane gas, significantly exceeding ($P < 0.050$) the CH_4 obtained in Meseta and Saucita, which can be explained by the type of substrate used (pig and bovine manure) and the weather conditions of the farms studied.

Keywords: Anaerobic biodigestion, biofertilizer, biomass.

*Autor para correspondencia: Jairo Enrique Granados Moreno, e-mail: jegranados@cundinamarca.edu.co

Recibido: 10/01/2022

Aceptado: 24/06/2022

INTRODUCCIÓN

La alta demanda en el consumo energético global y la dependencia de fuentes de energía no renovable, así como los problemas ambientales asociados, exigen la búsqueda de nuevas tecnologías y fuentes energéticas (Deepanraj *et al.*, 2015). La generación de residuos alimentarios equivale a un tercio de la producción para el consumo humano en el mundo, siendo aproximadamente de 1300 MMt/año Zapata (2019); en los últimos años se ha implementado la construcción de sistemas de biodigestión consiguiendo resultados efectivos en materia económica, energética y ambiental, puesto que han incrementado la producción anual de biogás en niveles significativos con el propósito de producir energía eléctrica y calorífica (Appels *et al.*, 2011). La alternativa de energía limpia para actividades pecuarias como el biogás, generado por la biodigestión anaeróbica de desechos orgánicos, proporciona una alternativa energética de bajo costo, aumenta ingresos a los productores, descentraliza la adquisición de energía y reduce emisiones de gases con efecto invernadero, maximizando el uso de los recursos para contribuir en ahorro de producción a futuro.

Colombia es un país con alto potencial agropecuario con alta producción de biomasa orgánica, la cual puede ser aprovechada en la generación de energía alternativa. La cantidad de excretas producidas en los sistemas pecuarios puede sobrepasar los 80 millones de toneladas/año y se estima que puedan alcanzar un potencial energético de aproximadamente 71.000 TJ/año. En sistemas tecnificados el adecuado aprovechamiento de la biomasa residual podría generar 864 GWh/año equivalente al 1,3 %, de la demanda nacional energética.

La energía eléctrica en Colombia depende, fundamentalmente, de hidroeléctricas (70 %) y termoeléctricas (29,3 %), desaprovechando otras fuentes de energías renovables como la biomasa residual pecuaria, entre otras (López y Ruíz, 2014). Según Esquivel *et al.* (2020) la dirección de Cadenas Pecuarias, Pesqueras y Acuícolas entidad adscrita al Ministerio de Agricultura y desarrollo rural, desde el 2019, el crecimiento de los sistemas productivos porcícolas ha sido del 8.8 % en Colombia, lo cual indica un aumento en materia orgánica (excretas). Dicha biomasa, en la mayoría de los casos, no recibe manejo adecuado en instalaciones agropecuarias Medina (2013), generando contaminación principalmente en fuentes hídricas cercanas a los sistemas productivos y facilitando la propagación de diferentes vectores y patógenos en ambientes óptimos que propician los cuerpos de agua con vertimientos (Cerdán, 2020).

Los biodigestores surgen como una tecnología alterna en el campo agrícola y pecuario, para tratamiento y fermentación anaeróbica de materia

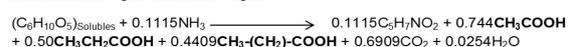
orgánica presente en residuos alimenticios, desechos vegetales y estiércol de animales, susceptibles a desarrollar tal transformación; en general, los biodigestores se consideran como contenedores herméticos y adiabáticos, diseñados con materiales que permitan el desarrollo de la biodigestión anaeróbica (BDA) por parte de poblaciones microbianas encargadas de desdoblar la materia orgánica mediante cuatro etapas fundamentales: Hidrólisis de polímeros como proteínas, carbohidratos y grasas, hasta biomoléculas elementales como péptidos, aminoácidos, glucosa y ácidos grasos entre otras, luego se produce la acidogénesis de estas biomoléculas, cuyos productos son principalmente ácidos orgánicos tales como ácidos grasos volátiles (propiónico, butírico, isobutírico y valérico); las bacterias acetogénicas desarrollan la tercera etapa de la BDA, denominada: acetogénesis, con la consecuente producción de ácido acético ó etanoico (CH₃COOH), hidrógeno gaseoso (H₂) y gas carbónico (CO₂); finalmente ocurre la metanogénesis, dada por bacterias metanogénicas, en cuya fase se produce el metano (CH₄) por vías: acetoclástica (desdoblamiento del ácido acético) e hidrógenotrófica (reacción entre H₂ y CO₂) (Deepanraj *et al.*, 2015; Nopharatana *et al.*, 2007; Ampudia, 2011; Yu *et al.*, 2013; Valladares, 2017; López y Ruíz, 2014; Orjuela, 2015). Las Figuras 1 y 2, resumen las reacciones bioquímicas enzimáticas desarrolladas en la BA.

Yu *et al.* (2013), citan un modelo integral alterno para generación y vías anaeróbicas degradativas de la materia orgánica con interacciones asociadas, previamente desarrollado en 1999, esto simula la codigestión de desechos complejos que tienen diferentes características y composiciones a través de las vías principales; el modelo cuenta con la hidrólisis enzimática de carbohidratos no disueltos y proteínas e involucra ocho tipos de bacterias: acidógenos fermentadores de glucosa, bacterias lipolíticas, degradantes de ácidos grasos acetógenos, acidógenos que degradan aminoácidos, acidógenos que degradan propionato, acidógenos que degradan butirato, acetógenos degradantes de valerato y metanógenos acetoclásticos. En el caso de los carbohidratos, las ecuaciones químicas estequiométricas propuestas para las tres etapas de la biodigestión anaeróbica son:

Hidrólisis de polisacáridos



Acidogénesis



Según lo mostrado en las ecuaciones de arriba, los carbohidratos insolubles presentes en la MO, del sustrato, son hidrolizados enzimáticamente hasta carbohidratos solubles (CHOS) y carbohidratos

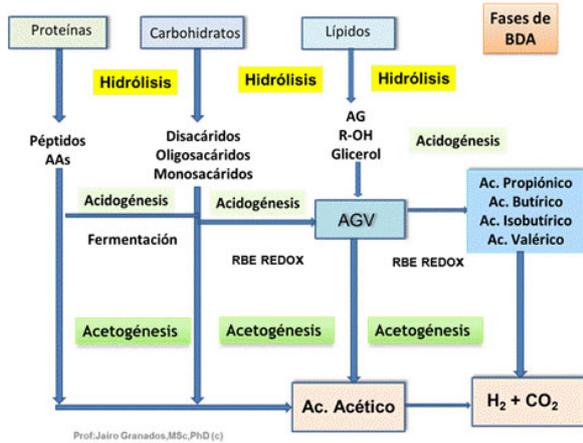
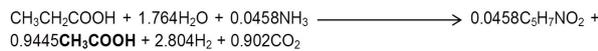


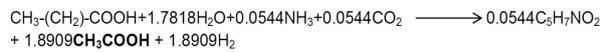
FIGURA 1. Primeras etapas de la biodigestión anaeróbica.

inertes; posteriormente, los CHOS reaccionan con el amoníaco, proveniente de la desaminación proteica y en presencia de las bacterias acidogénicas, hasta producir ácidos orgánicos: acético (C₂), propiónico (C₃) y butírico (C₄), dióxido de carbono, agua y la biomasa residual: C₅H₇NO₂, que constituirá el denominado: biosol, posterior a esto se desarrolla la acetogénesis.

Acetogénesis propiónica



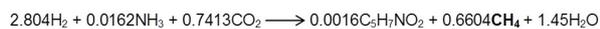
Acetogénesis butírica



Acorde a las ecuaciones anteriores, la acetogénesis señala dos vías: la propiónica, mediante la cual, el ácido propiónico reacciona con agua y amoníaco, produciendo biosol, ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono y luego se tiene la butírica, donde el ácido butírico reacciona con agua, amoníaco y dióxido de carbono, generando biosol, ácido acético e hidrógeno gaseoso

Finalmente, las bacterias metanogénicas son las encargadas de producir las reacciones bioquímicas enzimáticas de la metanogénesis, de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

Metanogénesis Hidrogenotrófica



Metanogénesis Acetoclástica



De acuerdo a estas expresiones químicas, se observan dos vías mediante las cuales se desarrolla la metanogénesis, la primera corresponde a la hidrogenotrófica, en la cual, el hidrógeno gaseoso, reacciona con amoníaco y dióxido de carbono, generando gas metano y agua, mientras que por la ruta acetoclástica, las biomoléculas de entrada son: ácido acético y amoníaco quienes al reaccionar producen: biosol, metano, agua y dióxido de carbono

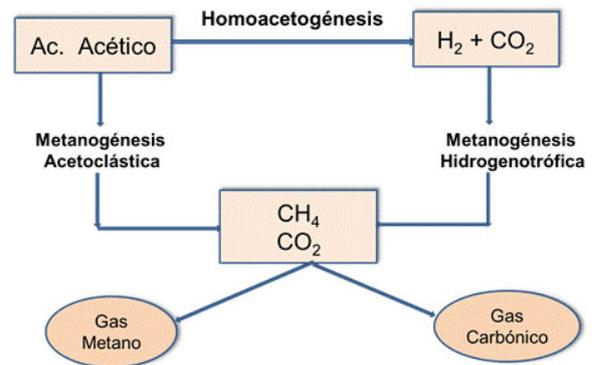


FIGURA 2. Vías metanogénicas en la biodigestión anaeróbica.

La presente investigación analizó efectos biofísicoquímicos de materia orgánica proveniente de excretas porcinas y bovinas, actuando como afluentes en biodigestores de membrana, sobre procesos de fermentación anaeróbica y características de biogas y biosol (efluentes), en cuatro predios de la provincia de Sumapaz, Colombia

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del experimento

La instalación de los biodigestores se realizó en cuatro predios (Tabla 1) cercanos al municipio de Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia, con condiciones de: altura: 1600 msnm, temperatura promedio: 19,1°C, humedad relativa promedio de 80%, precipitación anual de 140 mm; el municipio se encuentra ubicado a 59 km al suroccidente de Bogotá; para la ejecución del proyecto de investigación, previamente fueron seleccionados como ya se indicó, cuatro predios de un total de 21 sistemas productivos agropecuarios encuestados y caracterizados. Las producciones elegidas contaron con la disposición de sus propietarios, fácil a moderado acceso a las instalaciones, así como generación de suficiente cantidad de materia orgánica adecuada para procesos fermentativos anaeróbicos en la producción de energía. El proceso de intervención sobre los sistemas seleccionados se dividió en cuatro fases: adecuación, instalación, funcionamiento y toma de datos/muestras, en campo, lo cual será descrito más adelante.

Etapas experimentales

De acuerdo a la Figura 3, Una vez ejecutada primera fase, se procedió a la instalación del sistema de biodigestión-geomembrana (Figura 4) en los predios señalados, posteriormente, se procedió al registro de datos en campo (Temperatura (°C), humedad relativa (%), pH, presión de salida del biogás (kPa)) y toma de muestras (excretas y bioles), lo que se realizó en intervalos de tiempo de dos semanas (15 días) durante 90 días, para un total de 6 muestreos

(Figura 5); así mismo, se evaluó producción de biogás en cubeta hidroneumática, por método de desplazamiento de agua en probeta y la concentración

de gases: CH₄, CO₂, H₂S y NH₃, se midió utilizando analizador digital multiparamétrico de gases A-ALT5X-ALK;

TABLA 1. Sistemas productivos seleccionados-Municipio de Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia

Nombre del predio	Vereda	Municipio	Fin productivo	Abreviatura
La Meseta	Bermejál	Fusagasugá	Bovinos leche	LMS
Santa Bárbara	Jordán Bajo	Fusagasugá	Porcicultura	STB
El Mirador	Guayabal	Fusagasugá	Porcicultura/cultivos	EMD
La Saucita	Tierra Negra	Fusagasugá	Porcicultura	LST

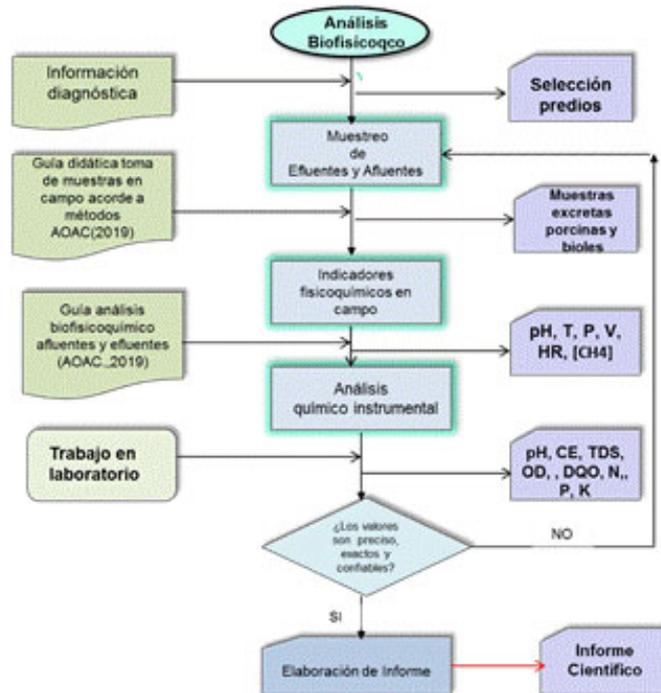


FIGURA 3. Etapas desarrolladas para efectuar análisis biofísicoquímico de afluentes y efluentes provenientes de biodigestores.



Santa Bárbara



El Mirador



La Meseta



La Saucita

FIGURA 4. Biodigestores de membrana evaluados en el experimento.

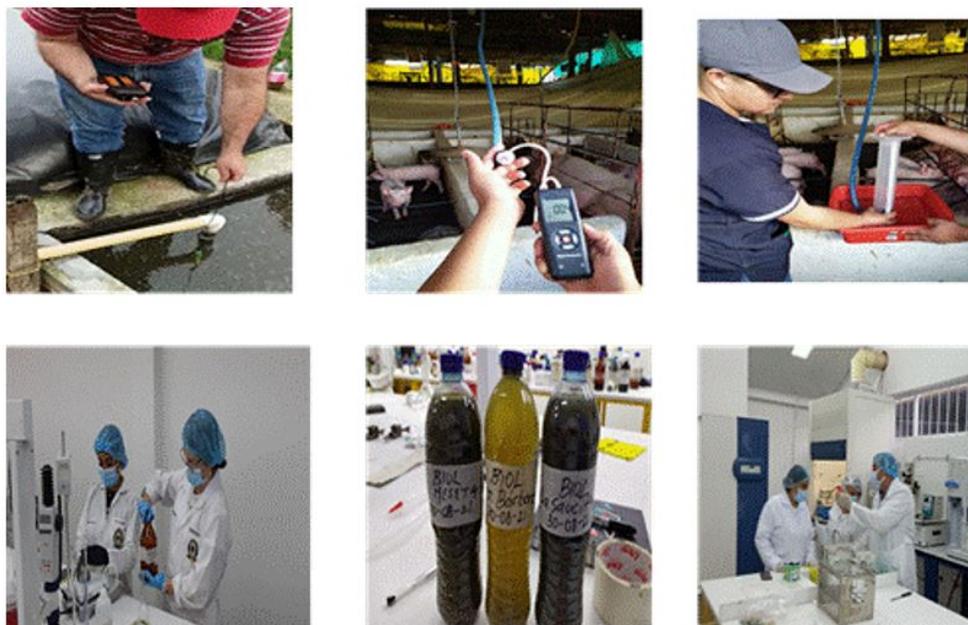


FIGURA 5. Recolección de datos en campo y laboratorio.

Materia prima: excretas y bioles muestreados

Las excretas porcinas y bovinas utilizadas en este estudio experimental se recolectaron en los cuatro predios descritos en la [Tabla 1](#), esta biomasa es un sustrato muy deseable para la digestión anaeróbica debido a su mayor biodegradabilidad y rendimiento de biogás/metano, por la cantidad de materia orgánica que poseen. Además, el análisis del contenido de nutrientes mostró que las muestras contenían nutrientes bien equilibrados para los microorganismos anaeróbicos ([Appels et al., 2011](#)). Las excretas y bioles se mezclaron y empacaron en botellas de plásticos de 1 L esterilizados con anterioridad, luego se depositaron en cavas de icopor con hielo y fueron transportadas a los laboratorios de nutrición de la Universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá, donde se refrigeraron en nevera a 4°C, para su posterior análisis biofísicoquímico

Análisis biofísicoquímico de excretas y bioles

Sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV), demanda química de oxígeno (DQO) del sustrato y digestato se determinaron según el método estándar (APHA, 1992); sólidos disueltos totales-TDS, conductividad eléctrica (CE) y pH en afluente, digestato y bioles, se determinaron usando un medidor multiparamétrico Hanna instruments (2019); Carbono orgánico (CO), se determinó mediante método espectrofotométrico modificado de Walkey Black según [García y Ballesteros \(2005\)](#), mientras que N-NO₃ y P-PO₄, se hallaron en fotómetro multiparamétrico de Hanna Instruments - HI 83399. La composición de: CH₄, CO₂, H₂S y NH₃ en el biogás se midió utilizando analizador digital

multiparamétrico de gases A-ALT5X-ALK; Los valores de producción de biogás (V_{ac}) y metano (μ_{CH_4}), se analizaron mediante modelos matemáticos cinéticos de Gompertz modificado y Moned ([Nopharatana et al., 2007](#); [Pommier et al., 2007](#); [Deepanraj et al., 2015](#)).

RESULTADOS Y DISCUSION

Análisis fisicoquímico de materia prima

El análisis de las excretas porcinas indicó que poseen pH entre 8.36 y 8.53, conductividad eléctrica en rango de 1,04 mS/cm a 1,85 mS/cm; sólidos totales disueltos en intervalo de 0.98% a 1,33%; oxígeno disuelto (3.16 g/dL-6.10 g/dL); humedad(52.54%-70.45%); carbono orgánico en rango de 1.89% hasta 2.57%; Nitrógeno total en intervalo de: 1,97% hasta, 2,98%; Fósforo (0.57ppm -0.75ppm) y potasio (0.11%-0.13%) y demanda química de oxígeno (55,65g/L-62.76g/L); estos resultados están en los rangos informados por [Gutierrez y Ochoa \(2019\)](#), quienes determinaron el potencial energético para producción de biogás, a partir de la co-digestión anaerobia del co-sustrato cascarilla de arroz con excretas porcinas

El análisis de excreta bovinas mostró pH entre 7.70 y 7.6, conductividad eléctrica en rango de 1,33 mS/cm a 1,76 mS/cm; sólidos totales en intervalo de 15.33% a 17,04%; oxígeno disuelto (3.31 g/dL-4.00 g/dL); humedad (52.54%-70.45%); carbono orgánico en rango de 1.84% hasta 2.01%; Nitrógeno total en intervalo de: 1,77% hasta, 1,98%; Fósforo (0.32ppm -0.92ppm) , potasio (0.52%-1.05%) y demanda química de oxígeno (51,76g/L-60.97g/L); los

valores obtenidos en este experimento son similares a lo reportado por [Ampudia \(2011\)](#) en un experimento que investigó la biodigestión anaeróbica de desechos orgánicos agroindustriales y estiércol vacuno

Comportamiento de la Temperatura-T(°C)

Los promedios de temperatura de todos los predios por cada día muestreado no exhibieron diferencias amplias, ni una tendencia clara con relación a los días, tal como se muestra en la [Figura 6](#), la temperatura a los 45 días estuvo en $25.26 \pm 1.26^\circ\text{C}$ siendo más baja que la presentada a los 60 días con un valor de $25.51 \pm 1.43^\circ\text{C}$. la temperatura promedio más alta se alcanzó a los 30 días con un valor de $25.66 \pm 1.51^\circ\text{C}$ y la más baja a los 45 días con $25.26 \pm 1.26^\circ\text{C}$. Teniendo en cuenta que las variaciones de temperatura no presentaron grandes diferencias, siendo el predio La Meseta el que presentó la más baja temperatura promedio, por otra parte, el coeficiente de variación estuvo por debajo del 10%. El predio la Meseta fué el que presentó la menor temperatura promedio durante toda la fase experimental con 25.20°C seguido por Santa Bárbara con 25.47°C , aunque se observó cierta variabilidad entre los promedios, el análisis de varianza determinó que no se detectaron diferencias estadísticas ($P > 0.050$) entre los biodigestores para la variable temperatura.

Calidad biofísicoquímica de los bioles obtenidos en los cuatro biodigestores evaluados

La [Tabla 2](#), presenta valores fisicoquímicos y concentración de nitrógeno, fosfatos, fósforo disponible y potasio en los abonos líquidos-bioles estudiado

Cuando se analizan los resultados mostrados en la [Tabla 2](#), comparando con el cuadro de interpretación de análisis suelos del instituto geográfico Agustín Codazzi-IGAC se deduce que los bioles obtenidos en estos cuatro biodigestores son ligeramente alcalinos ([Pantoja Cleves y Méndez Duarte, 2017](#)). En lo referente a conductividad eléctrica, los biodigestores de LST y EMD generaron bioles tipo S_3 con alta salinidad lo cual es limitante para cultivos tolerantes, mientras que bioles de LMS y STB, clasificaron como S_2 con mediana salinidad, también limitantes para

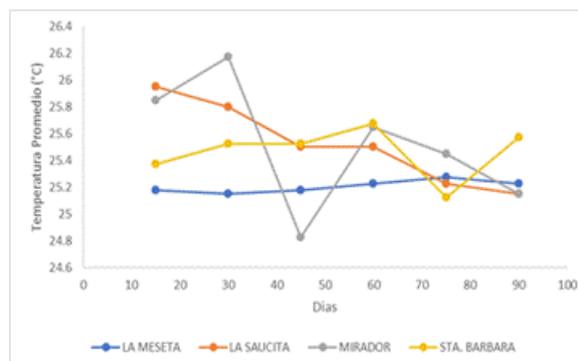


FIGURA 6. Comportamiento de la temperatura en el tiempo para los predios estudiados

cultivos medianamente tolerantes; estos valores se corresponden con los porcentajes de sólidos totales disueltos, dado que al incrementar CE también aumenta TDS, efecto similar ocurre cuando descende CE, causando decaimiento en los sólidos disueltos en bioles provenientes de LMS y STB;

Respecto al nitrógeno total descrito en la [Tabla 2](#), se observó que el biodigestor de LMS mostró un biol con alta concentración de este bioelemento, en contraste, EMD indicó biol con baja concentración de N, mientras que los biodigestores LST y STB generaron biomasa residual similar con mediana concentración. La cantidad de fósforo analizada señaló que los biodigestores de los predios: LST, LMS y STB, produjeron bioles con mediana concentración de P, en contraste EMD mostró alta concentración de este importante indicador de fertilización; en relación al contenido de Potasio, se destacó que el biol de LST reveló una muy alta concentración de K, LMS generó biol con alta concentración y los biodigestores STB y EMD originaron abono líquido con mediana concentración de potasio. Conductividad eléctrica y contenido de nitrógeno de los bioles evaluados en esta investigación, resultaron con valores superiores a los reportados por [Acosta, R\(2019\)](#) en un trabajo que evaluó características físicas, químicas, microbiológicas y efectividad agronómica del abono líquido biol obtenido por digestión anaerobia de estiércol porcino; en contraste, al comparar la concentración (ppm) de Fosfato, Fósforo y potasio en los bioles, se encontró que lo determinado por [Acosta \(2019\)](#) arrojó valores superiores

TABLA 2. Indicadores fisicoquímicos de los abonos líquidos-bioles, provenientes de los cuatro biodigestores evaluados

Predio	pH	CE (dS /m)	TDS (%)	N (ppm)	PO ₄ ⁽³⁻⁾ (ppm)	P(ppm)	K (ppm)
LST	7.79	19.73	1.01	2300	51.90	16.70	1440
LMS	7.52	13.40	0.64	3100	59.03	19.40	970
STB	7.61	12.85	0.65	2100	49.20	15.80	530
EMD	7.55	19.05	0.75	1500	78.30	25.00	540

Comportamiento de la conductividad eléctrica (CE) de los bioles obtenidos en los efluentes de biodigestores del Sumapaz

La conductividad eléctrica corresponde a una variable fisicoquímica relacionada con la capacidad que tienen las soluciones para transportar y permitir el flujo de electrones generando corriente eléctrica, por lo tanto, entre más electrolíticas sean las soluciones existirá más potencial de conducción, tal propiedad depende de la concentración y movilidad de electrolitos, como minerales (cationes), sales (aniones), ácidos y bases disociadas, las cuales producen flujos de electrones en solución acuosa.

Luego, CE está influenciada fuertemente por temperatura, sólidos totales disueltos (TDS), pH y concentración de sales y minerales que están presentes en la muestra evaluada (Figura 7).

Lo descrito en la Figura 7, indica que la conductividad eléctrica de los bioles muestreados en las 6 épocas, mostró un marcado descenso en los 4 predios evaluados resultando más notorio en Santa Bárbara y mirador, en contraste, meseta y Saucita se comportaron de forma similar, de tal forma que en este último predio los valores máximos de CE, ocurrieron a los 30 días (24.50 mS/cm) y 45 días (25.90 mS/cm), respectivamente; cuando se observa en detalle la gráfica, se aprecia que al inicio del muestreo (15 días) los valores fueron similares, sin embargo, a los 45 días Santa Bárbara incrementó la CE (25.90 mS/cm), mientras que Santa Bárbara (17.83 mS/cm) y meseta (15.83 mS/cm) obtuvieron valores relativamente intermedios en esta misma fecha de muestreo; los valores de CE finales, revisados a los 90 días correspondió en orden ascendente así: Sta Bárbara(0.67 mS/cm), Mirador (2.65 mS/cm), Meseta (4.85 mS/cm) y Saucita (11.51 mS/cm)

Comportamiento del pH de bioles obtenidos en efluentes de biodigestores del Sumapaz

Teniendo en cuenta que pH es una variable fisicoquímica relacionada con el potencial de hidrogeniones movilizados en una solución, permitiendo definir la acidez ó basicidad de la misma en virtud de la constante de disociación del agua: K_w , los bioles fueron examinados potenciométricamente para caracterizar esta propiedad, encontrándose el comportamiento mostrado en la Figura 8

Al observar el comportamiento del pH de los bioles en las seis (6) fechas de muestreo expuestas en la Figura 8, se puede analizar lo siguiente: Santa Bárbara mostró valores en rango desde neutro hasta fuertemente alcalino, Meseta estuvo en intervalo de neutro a ligeramente alcalino, mientras que los bioles de Saucita y Mirador, presentaron en todas las épocas de muestreo, pH ligeramente alcalino; es importante destacar la variabilidad del pH en los bioles obtenidos de la finca Santa Bárbara, puesto que los valores

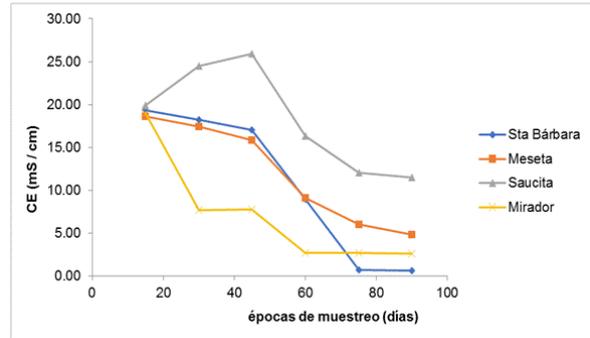


FIGURA 7. Comportamiento de la conductividad eléctrica de los bioles obtenidos a partir de efluentes de los cuatro biodigestores evaluados.

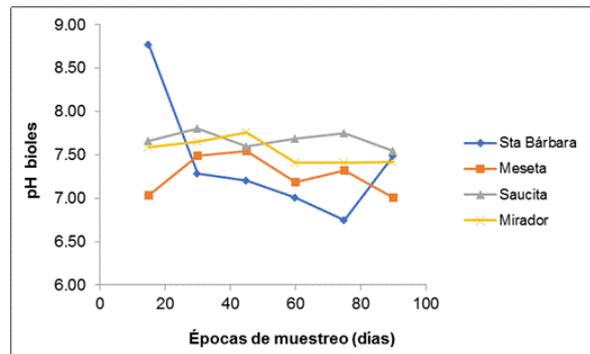


FIGURA 8. Comportamiento del pH de los bioles obtenidos a partir de efluentes de los cuatro biodigestores evaluados.

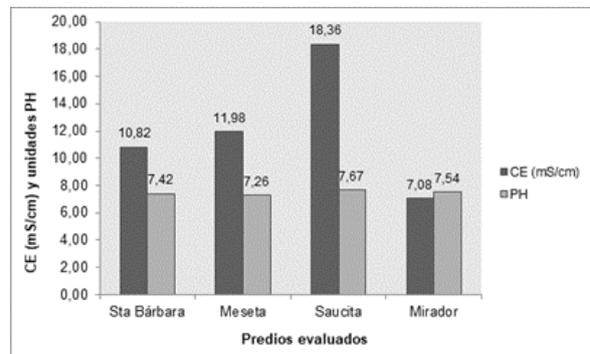


FIGURA 9. Valores promedio de pH y CE de los bioles obtenidos a partir de efluentes de biodigestores, región del Sumapaz.

indican un fuerte descenso desde 8.75 hasta 6.75 en 75 días, finalizando en 7.49

Con base en los anteriores valores se determinaron los promedios de pH para los bioles generados por los biodigestores de cada predio, obteniéndose que son abonos líquidos de tipo ligeramente alcalino

La Figura 9, muestra valores promedios de conductividad eléctrica y pH de los bioles muestreados en cada finca.

Acorde a la Figura 9, se puede deducir que la CE promedio de los bioles provenientes de Saucita (18.36 mS/cm) exhibió el mayor valor, seguido por

Meseta (11.98), Santa Bárbara (10.82) y Mirador (7.08) con la CE más baja, por lo tanto, los bioles de saucita presentaron salinidad alta, lo cual puede ser limitante para cultivos tolerantes, mientras que bioles de Santa Bárbara y Meseta poseen salinidad media que los hace limitantes para cultivos moderadamente tolerantes y Mirador generó bioles con salinidad baja; con relación al pH promedio se destaca que los valores corresponden a bioles ligeramente alcalino, como se advirtió en párrafos anteriores.

Comportamiento Sólidos Totales disueltos (TDS) en los bioles evaluados, provenientes del Sumapaz

Los sólidos totales disueltos corresponden a la masa (g, mg) de sólidos (minerales, sales orgánicas e inorgánicas) que están presentes en un volumen determinado del biol (1L ó 100 mL), de esta forma sus unidades se pueden expresar como: gTDS/100 mL, equivalente a %TDS ó mg TDS/L, que es lo mismo que ppm TDS.

La [Figura 10](#) muestra el comportamiento de los valores TDS de bioles obtenidos en efluentes de biodigestores del Sumapaz, en las épocas muestreadas.

El TDS de los bioles muestreados en las 6 épocas, mostró un marcado descenso en los 4 predios evaluados resultando más notorio en Santa Bárbara y Meseta, en contraste, Mirador y Saucita obtuvieron valores de TDS, superiores a los demás, de tal forma que en esto últimos predios mencionados el dato máximo de TDS, ocurrió a los 45 días (0.98% y 1.48%) respectivamente; cuando se observan en detalle las gráficas, se aprecia que al inicio del muestreo (15 días) los valores fueron similares Mirador, Meseta y Santa Bárbara, sin embargo, en Saucita fue notoriamente superior (1.27%); los valores de TDS finales, revisados a los 90 días correspondió en orden ascendente así: Meseta (0.24%), Mirador (0.30%), Santa Bárbara (0.34%) y Saucita (0.56%): Los promedios de TDS para los bioles obtenidos en los biodigestores de cada predio se indican en la [Figura 11](#).

De acuerdo a la [Figura 11](#), se puede deducir que la TDS promedio de los bioles provenientes de Saucita (1.00%) exhibió el mayor valor, seguido por Mirador (0.75%), Santa Bárbara (0.65%) y Meseta (0.64%) con TDS más bajo, por lo tanto, los bioles de saucita presentaron salinidad alta, lo cual puede ser limitante para cultivos tolerantes, mientras que bioles de Santa Bárbara y Meseta poseen salinidad media que los hace limitantes para cultivos moderadamente tolerantes ([Figura 13](#))

Concentración de gas metano en el biogás producido en los biodigestores evaluados

En la [Figura 12](#), se muestran gráficas comparativas del comportamiento cinético del gas metano en los biodigestores ubicados en las fincas La Saucita y El Mirador.

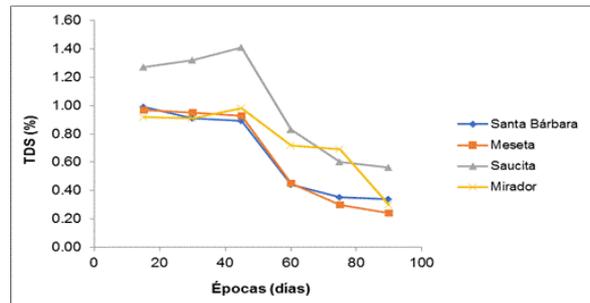


FIGURA 10. Comportamiento del TDS de los bioles obtenidos a partir de efluentes de biodigestores, región del Sumapaz.

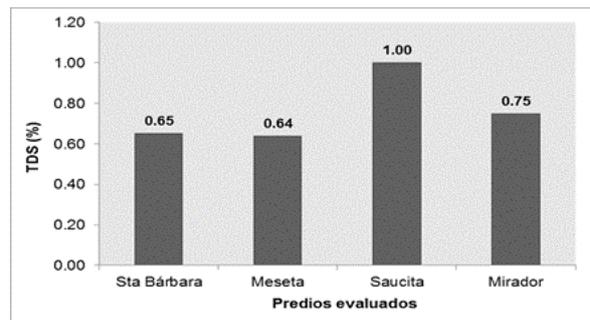


FIGURA 11. Valores promedio de TDS en los bioles obtenidos a partir de efluentes de biodigestores, región del Sumapaz.

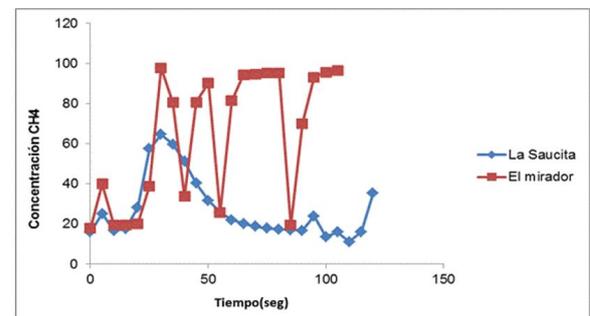


FIGURA 12. Valores de concentración de gas metano evaluados en los biodigestores de La Saucita y El Mirador.

La [Figura 12](#), muestra que a pesar de que el gas metano en la Saucita se comportó de forma sostenida con tendencia polinómica, marcando valor máximo de 64,6 a los 30 s y un valor límite de 35,3 en dos min, la finca El Mirador, presentó mayores concentraciones de gas metano en rango de 80,7 hasta 95,7, con descensos marcados en forma ondulatoria hasta valores mínimos con rango desde 19,5 hasta 33,8.

Cuando se saca el promedio de concentración de gas metano en cada finca, se obtiene la gráfica indicada en el [Figura 14](#).

Los promedios presentados en la [Figura 14](#), señalan que los biodigestores instalados en los predios Santa Bárbara y El Mirador generaron mayor concentración y calidad de gas metano, de tal forma que el

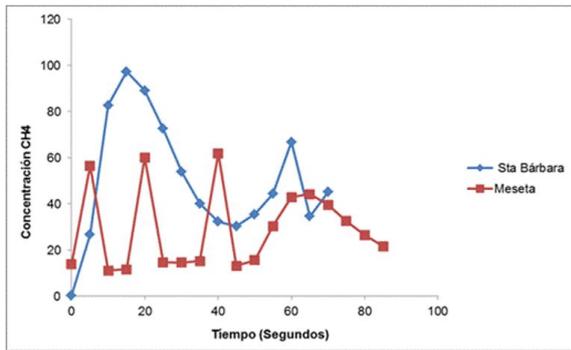


FIGURA 13. Valores de concentración de gas metano evaluados en los predios Santa Bárbara y la Meseta.

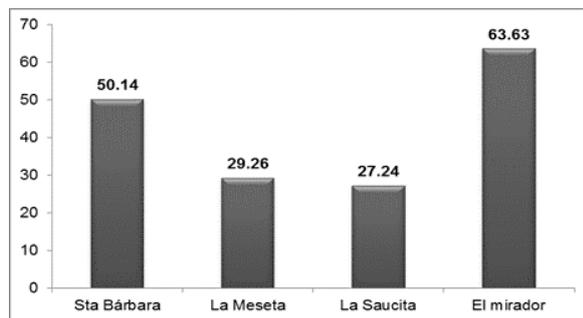


FIGURA 14. Concentración promedio del gas metano en los biodigestores evaluados en Fusagasugá

comportamiento fue como sigue: mirador superó a Santa Bárbara en 13.49, lo mismo que a meseta y Saucita en 34.37 y 36.9 respectivamente, luego el biogás producido por los biodigestores implementados en estos predios, resultó de mayor calidad en el mirador, seguido por Santa Bárbara, La Meseta y La Saucita, determinado esto por la concentración del gas metano

CONCLUSIONES

- Los sustratos evaluados como materia prima para abastecer los biodigestores mostraron diferencias apreciables en su composición, de tal forma que las excretas porcinas mostraron mayor alcalinidad que el estiércol bovino, así mismo, nutrientes como CO, NT, P y K, presentaron valores más altos en la excreta porcina, lo cual las hace más atractivas para la biodigestión anaeróbica
- Variables como Temperatura, pH y humedad relativa, afectaron significativamente las reacciones bioquímicas enzimáticas en las etapas de la biodigestión anaeróbica de los cuatro biodigestores evaluados, lo cual se evidenció en concentraciones altas de gas metano, específicamente en predios Mirador y Santa Bárbara
- Los indicadores biofísicoquímicos determinados en abonos líquidos-bioles, obtenidos a partir de la biodigestión anaeróbica de los cuatro biodigestores estudiados en el municipio de Fusagasugá,

mostraron valores de pH ligeramente alcalinos, CE y TDS altos, contenidos de nitrógeno disponible y potasio medianamente concentrados y valores de Fósforo ligeramente inferiores a lo reportado en otros trabajos similares, lo cual permite recomendarlos para su uso como biofertilizantes líquidos en cultivos moderadamente tolerantes

- El comportamiento cinético de variables fisicoquímicas como CE, TDS y pH mostraron tendencias al descenso en el tiempo, con modelamiento logarítmico ó exponencial, que se sugiere analizar en detalle
- El biogás producido en los biodigestores Mirador y Santa Bárbara, presentaron la mayor concentración de gas metano, superando de forma significativa ($P < 0.050$) al CH_4 obtenido en Meseta y Saucita, lo cual se puede explicar por el tipo de sustrato utilizado (estiércol porcino y bovino) y las condiciones climatológicas de los predios estudiados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOSTA, V.R.: Características físicas, químicas, microbiológicas y efectividad agronómica del abono líquido Biol obtenido por digestión anaerobia de estiércol de animales con rastrojo, **Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Tesis de grado para optar al título de magister en ciencias ambientales**, Lambayaque, Perú, publisher: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2019.
- AMPUDIA, M.M.J.: Investigación de la condiciones óptimas y de la cinética del proceso de biodigestión anaerobia de desechos orgánicos agroindustriales y estiércol vacuno, Universidad San Francisco de Quito, Tesis de grado en Ingeniería Química, Quito, Ecuador, publisher: Quito: USFQ, 2011, 2011.
- APPELS, L.; LAUWERS, J.; DEGRÈVE, J.; HELSEN, L.; LIEVENS, B.; WILLEMS, K.; VAN IMPE, J.; DEWIL, R.: "Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9): 4295-4301, 2011, ISSN: 1364-0321.
- CERDÁN, M.J.M.A.: Potencial de producción de ácidos grasos volátiles en lodos de Ptar, residuos urbanos y agroindustriales: enfoque hacia una economía circular, Universidad Agraria la Molina, Tesis para optar el grado de Magister Scientiae en ciencias ambientales, Lima, Perú, publisher: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2020.
- DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V.; JAYARAJ, S.: "Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 121: 100-104, 2015, ISSN: 0147-6513, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.04.051>.

- ESQUIVEL, M.A.; MERINO, M.; RESTREPO, J.; NARVÁEZ, A.; POLO, C.; PLATA, J.; PUENTES, V.: "La pesca y la acuicultura en Colombia", Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca, 2014.
- GARCÍA, G.J.; BALLESTEROS, G.M.I.: "Evaluación de parámetros de calidad para la determinación de carbono orgánico en suelos", Revista colombiana de Química, 34(2): 201-209, 2005, ISSN: 0120-2804.
- GUTIERREZ, N.L.C.; OCHOA, N.L.D.: Determinación del potencial energético para la obtención de biogás, a partir de la co-digestión anaerobia del co-sustrato cascarilla de arroz con excretas porcinas, Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Ambiental, Tesis Ingeniería Ambiental, Villavicencio, Colombia, publisher: Universidad Santo Tomás, 2019.
- LÓPEZ, A.A.M.; RUÍZ, R.C.: Evaluación de la producción de biogás a partir del buchón de agua mediante codigestión anaerobia con estiércol bovino, Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Procesos, Tesis (en opción al título de Ingeniería de Procesos), Medellín, Colombia, publisher: Universidad EAFIT, 2014.
- MEDINA, V.A.M.: Evaluación de la calidad de biol de segunda generación de estiércol del ovino producido a través de biodigestores, Inst. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima (Peru), 2013.
- NOPHARATANA, A.; PULLAMMANAPPALLIL, P.C.; CLARKE, W.P.: "Kinetics and dynamic modelling of batch anaerobic digestion of municipal solid waste in a stirred reactor", Waste management, 27(5): 595-603, 2007, ISSN: 0956-053X.
- ORJUELA, C.G.C.: Producción de biogás mediante la fermentación anaerobia de los residuos orgánicos de la cadena de restaurantes Wok, Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química, Tesis Ingeniería Química, Bogotá D.C., Colombia, publisher: Uniandes, 2015.
- PANTOJA CLEVES, C.J.D.; MÉNDEZ DÚARTE, C.L.E.: Propuesta basada en el funcionamiento del almacén de equipos geodésicos y topográficos para la transición e implementación de un laboratorio de geodesia y topografía en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Inst. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Colombia, 2017.
- POMMIER, S.; CHENU, D.; ACOSTA, M.M.; LEFEBVRE, X.: "A logistic model for the prediction of the influence of water on the solid waste methanization in landfills", Biotechnology and bioengineering, 97(3): 473-482, 2007, ISSN: 0006-3592.
- VALLADARES, C.F.: Modelamiento del proceso de digestión anaeróbica de estiércol vacuno y cáscara de cacao, Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica, Tesis en Ingeniería Mecánico-Eléctrica, Piura, Perú, publisher: Universidad de Piura, 2017.
- YU, L.; WENSEL, P.C.; MA, J.; CHEN, S.: "Mathematical modeling in anaerobic digestion (AD)", J Bioremed Biodeg S, 4(2), 2013, DOI: <http://dx.doi.org/10.4172/2155-6199.S4-003>.
- ZAPATA, E.I.V.: Valorización de residuo alimentario como fuente potencial de producción de biogás y ácidos grasos volátiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Santiago de Chile, Chile, 2019.

Jairo Enrique Granados Moreno, Profesor Titular, Universidad de Cundinamarca, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Prog. Zootecnia, Sede Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia, GRIPEZ, e-mail: jegranados@cundinamarca.edu.co

Diego Andrés Abril Herrera, Profesor Titular, Universidad de Cundinamarca, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Prog. Zootecnia, Sede Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia, SISPROS, e-mail: adiago@cundinamarca.edu.co

Andrés Mogollón Reina, Profesor Titular, Universidad de Cundinamarca, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Prog. Zootecnia, Sede Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia, SISPROS, e-mail: amogollon@cundinamarca.edu.co

AUTHOR CONTRIBUTIONS: Conceptualization: J. E. Granados, D. A. Abril, A. Mogollón. **Data curation:** J. E. Granados. **Formal Analysis:** J. E. Granados, D. A. Abril. **Funding acquisition:** J. E. Granados, D. A. Abril, A. Mogollón. **Investigation:** J. E. Granados, D. A. Abril, A. Mogollón. **Methodology:** J. E. Granados. **Project administration:** J. E. Granados. **Resources:** J. E. Granados, D. A. Abril, A. Mogollón. **Software, Supervision, Validation:** J. E. Granados, D. A. Abril. **Visualization:** J. E. Granados, D. A. Abril. **Writing - original draft:** J. E. Granados, D. A. Abril, A. Mogollón. **Writing - review & editin:** D. A. Abril, A. Mogollón.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.