

Diseño de un modelo de biodigestor anaerobio como alternativa para la generación de metano

Design of an anaerobic biodigester model as an alternative for methane generation

Canales-Gutiérrez, Ángel; Quispe-Aucca, Blanca Jacqueline; Romero-Loaiza, Ricardo; Villafuerte-Prudencio, Nazario; Ramos Pineda, Janette Rosario; Aguilar, José Martín; Canqui-Flores, Bernabé

 Canales-Gutiérrez, Ángel *

acanales@unap.edu.pe

Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú

 Quispe-Aucca, Blanca Jacqueline

blancaquispe@unap.edu.pe

Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú

 Romero-Loaiza, Ricardo

romerol@unap.edu.pe

Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú

 Villafuerte-Prudencio, Nazario

dg.investigacion@unap.edu.pe

Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú

 Ramos Pineda, Janette Rosario

janetteramos@unap.edu.pe

Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú

 Aguilar, José Martín

josemartinfeuillet@gmail.com

Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú

 Canqui-Flores, Bernabé

bcanqui@unap.edu.pe

Universidad Nacional del Altiplano de Puno, Perú

Journal of the Selva Andina Biosphere

Selva Andina Research Society, Bolivia

ISSN: 2308-3867

Periodicidad: Bianaual

vol. 9, núm. 2, 2021

directoreditorbiosphere@gmail.com

Recepción: 01 Agosto 2021

Corregido: 01 Octubre 2021

Aprobación: 01 Octubre 2021

Publicación: 01 Noviembre 2021

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/71/712918004/>

DOI: <https://doi.org/10.36610/j.sab.2021.090200081>

Resumen: La aplicación de biodigestores anaeróbicos en lodos de aguas residuales municipales es importante para la generación de metano siendo una alternativa para la generación de energía renovable, la investigación es peculiar debido a que se realiza a 3812 msnm, en el área circundante al lago Titicaca a una variación de temperatura entre -1.3 a 16.8 °C. Los objetivos fueron: i) Diseñar un biodigestor de digestión anaerobia para la generación de metano, ii) Evaluar la cantidad de metano producido en el biogás generado por lodos residuales de tres lagunas de estabilización de aguas residuales municipales. La metodología consistió en construir un diseño prototipo de un biodigestor anaeróbico con un funcionamiento adecuado para la generación de metano a través de lodos residuales (LR), para lo cual se cargó los biodigestores con 11 kg de LR recolectados de tres lagunas de estabilización. Los resultados indican que el biodigestor anaeróbico funciona adecuadamente para la generación de metano, producido en los biodigestores, alcanzaron hasta 36.7 % en 33 días de tiempo de retención a temperatura termofílica entre 50 a 60 °C, los factores que influyeron en la baja generación de metano son la baja relación C/N y la baja concentración de materia orgánica, la que varió entre 21.0 a 51.10 %.

Palabras clave: Biodigestor anaerobio, diseño, lodos residuales, materia orgánica, metano.

Abstract: The application of anaerobic biodigesters in municipal wastewater sludge is important for the generation of methane being an alternative for the generation of renewable energy, the research is peculiar because it is carried out at 3812 masl, in the area surrounding Lake Titicaca at a temperature variation between -1.3 to 16.8 °C. The objectives were: i) Design an anaerobic biodigester for methane generation and ii) Evaluate the amount of methane contained in the biogas generated by the LR of the three wastewater stabilization ponds. The methodology consisted of constructing a prototype design of an anaerobic biodigester with adequate performance for methane generation from sewage sludge (SWL), for which the biodigesters were loaded with 11 kg of SWL collected from three stabilization ponds. The results indicate that the anaerobic

Selva Andina Research Society

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial 4.0 Internacional.

biodigester works adequately for methane generation, produced in the biodigesters, reached up to 36.7 % in 33 days of retention time at thermophilic temperature between 50 to 60 °C, the factors that influenced the low methane generation are the low C/N ratio and the low concentration of organic matter, which varied between 21.0 to 51.10 %.

Keywords: Anaerobic biodigester, design, sewage sludge, organic matter, methane.

INTRODUCCIÓN

En los próximos años el suministro de combustibles fósiles será escaso y costoso¹, entonces es necesaria la búsqueda de energía sostenible alternativa, como la generación de biocombustibles (BC)². El uso de BC, es una demanda creciente para el transporte³, permite sustituir el combustible diésel procedente del petróleo⁴. La sostenibilidad de BC de primera generación como el etanol y biodiesel han recibido fuertes críticas ya que pondrían en peligro la seguridad alimentaria⁵. En consecuencia, la generación de biogás ha aumentado, habiéndose desarrollado diversos procesos de tratamiento seguros y eficaces⁶⁻⁸, siendo importante la obtención de biogás a partir de lodos de aguas residuales (AR)⁹, lodos de fábrica de cerveza¹⁰, estiércol de ganado^{7,11}, que a través de un proceso de digestión anaeróbica (DA) producen metano, el cual puede ser transformado en energía limpia, siendo una solución al problema de contaminación del agua y emisión de gases de efecto invernadero (GEI)¹². Dicha DA puede darse a través de biodigestores anaeróbicos de una sola fase, en éstas todas las etapas de la DA (hidrólisis, citogénesis, acidogénesis y metanogénesis), se llevan a cabo en un ambiente, pero requieren un control estricto del pH¹². Produciéndose en él biogás, además de metano, dióxido de carbono, nitrógeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno y oxígeno⁶.

Para analizar si el biogás producto de la DA de lodos, una alternativa viable de generación de energía, es necesario determinar la cantidad de metano producido, ya que diversos estudios han señalado que la concentración mínima de metano, debería contener entre 55 a 78 % y, para alcanzar esta concentración óptima, la temperatura requerida debe estar entre 30 a 60 °C y su relación C/N 25 a 35^{6,11,13}.

Las lagunas de estabilización (LE) son tecnologías ampliamente utilizadas para el tratamiento de AR en América Latina, principalmente por su bajo costo de construcción y operación. Sin embargo, la mayoría de las veces representan un problema ambiental y social, por la acumulación de lodos, éstos pueden ser utilizados en la generación de biogás, siendo una fuente de energía alternativa que no tiene limitaciones geográficas ni tecnológicas¹⁴. Por ejemplo, en México se genera alrededor de 640 000 t anuales de lodos residuales (LR), que pueden ser utilizados en la producción de energía⁹.

Investigaciones sobre la obtención de metano a partir del pretratamiento de pasto ensilado y alcalino en biodigestores, registraron 0.6 y 11.2 % de metano en el biogás producido, mientras que con hierba cruda ensilada en el biodigester y pH alcalino registrando de 6.5 a 11.3 % de metano¹⁰, también en el proceso de lixiviados frescos y AR domésticas, durante 90 días, los resultados reportaron una producción de biogás¹⁵. El sistema de DA con biodigestores incluye procesos de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

NOTAS DE AUTOR

* Dirección de contacto: Ángel Canales-Gutierrez Universidad Nacional del Altiplano de Puno. Escuela Profesional de Biología. Jirón Ramis 11 Puno, Perú. Tel: +51 951592123 E-mail: acanales@unap.edu.pe

Por tanto, el proceso de digestión depende de la interacción de temperatura, pH, nutrientes, condiciones de operación y el tipo de biodigestor¹⁶.

Por otra parte, la DA, es un proceso bioquímico que consiste en la degradación de materia orgánica (MO) provenientes de AR¹⁷, asimismo, la co-digestión de lodos de AR es una estrategia para optimizar la digestión de los LR, en condiciones mesofílicas (35 °C) usando biodigestores por lotes, para obtener la máxima producción de metano¹⁸. El control, uso del metano requieren estimar, con una certidumbre razonable, la producción diaria y acumulativa¹⁹, siendo importante el control del pH alrededor de 7, temperatura promedio de 40 °C²⁰, a través del uso de biodigestores experimentales a escala de laboratorio, que utiliza lodos provenientes de lagunas de tratamiento del AR²¹.

Los residuos sólidos urbanos presentan un alto problema ambiental, sin embargo, pueden obtenerse y aprovecharse para la generación de metano²², a través de un proceso de DA, el material biodegradado genera gases como el dióxido de carbono y el metano. La intensidad y duración del proceso anaerobio varían dependiendo de diversos factores: la temperatura, el pH del sustrato biodegradado, en promedio se puede obtener 17.33 L/d de biogás y 53 % de metano²³, evitando la acumulación de los residuos sólidos y emisiones de GEI como el metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂)²⁴, también se puede obtener biogás utilizando un biodigestor anaerobio doméstico a partir de la generación de residuos orgánicos domiciliarias en zonas urbanas y rurales^{25,26}, que principalmente contengan residuos como vísceras, sangre y heces que son ricos en sustratos esenciales los que producen biocombustible generando hasta 87 % de metano en 28 días de incubación²⁷.

La región de Puno se ubica a los 3812 msnm, el mes con temperatura más alta es noviembre (16.8 °C), la temperatura más baja se registra en julio (-1.3 °C), una limitante para la aplicación de tecnologías que dependen de la temperatura, para la generación de metano. Las AR se tratan a través de LE, que tienen acumulados altos volúmenes de LR, actualmente un recurso sin utilizar. Esta acumulación ha ocasionado que el tiempo de retención de las AR sea menor, en consecuencia, es bajo o nulo su tratamiento. Por otra parte, es frecuente la generación de olores desagradables que afectan a la salud de la población circundante. Entonces, una alternativa de solución a estos problemas, es la generación de metano a partir de estos LR con el uso de biodigestores adaptados a estas condiciones de clima.

Los objetivos de esta investigación fueron: i) Diseñar un biodigestor anaerobio para la generación de metano y ii) Evaluar la cantidad de metano contenido en el biogás generado por LR de las tres lagunas de estabilización de AR.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los biodigestores se instalaron en el laboratorio de Ecología de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional del Altiplano.

Diseño de los biodigestores. Se diseñó tres biodigestores, tipo incubadora de madera cuya área de la base fue 50 x 50 cm², siendo la altura de 60 cm, cuyo espacio interior aislado térmicamente con poliestireno cubierta de triplay. En su recinto interior se colocó un tanque biodigestor consistente en un bidón cilíndrico de polietileno con capacidad de 16 L en el espacio de 2/3 de bidón se utiliza para la biodegradación de lodos en condiciones anaeróbicas¹⁷, el volumen restante sirvió para almacenar el biogás, un agitador manual, llaves de paso, un sensor de pH, sistema de homogenización, para lo cual se construyó un agitador de alambre galvanizado de forma mariposa con soporte de aluminio, finalmente el tanque de biodigestor cerrado herméticamente para generar un sistema estrictamente anaeróbico^{9,12}. Luego fue colocado en la caja tipo incubadora, calefaccionados e iluminados por dos focos de 25 watts c/u, a temperatura termofílica en el rango de 50 a 60 °C controlado por un termistor TC-1000, humedad relativa del ambiente instalado varía entre

44 a 60 %. A cada biodigestor se le insertó una manguera de gas para facilitar el registro de la concentración de metano durante la DA. Se realizó tres pruebas de 33 días de tiempo de retención cada uno (Figura 1).

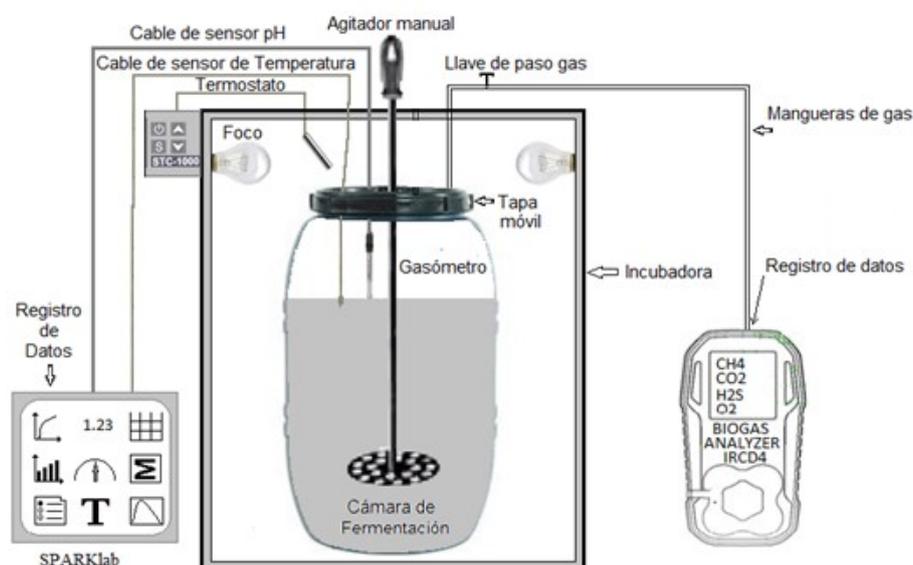


FIGURA 1

Esquema del biodigestor diseñado para el proceso de digestión anaeróbica de los LR

Colección y caracterización de LR. De las LE que se encuentran en las ciudades de Puno, Juliaca e Ilave, se obtuvo las muestras de lodo. La LE Espinar de Puno tiene 23 ha, la LE Challacollo, de Ilave tiene 21 ha y la LE Chilla de Juliaca tiene 30 ha. Los muestreos y los procesos de DA en los biodigestores se realizaron en febrero (primer muestreo), mayo (segundo muestreo) y julio (tercer muestreo) del 2018 (Tabla 1).

TABLA 1

Ubicación geográfica de los puntos de muestreo de LR en las lagunas de estabilización para aguas residuales de las ciudades Puno Juliaca e Ilave

Ciudad	Coordenadas UTM		Distancia (m)	Altitud (msnm)	Observaciones	
	Norte	Este				
Puno	1	8 246 702	392 673	434	3812.00	A orillas del lago Titicaca
	2	8 246 953	392 592		3812.00	
	3	8 246 916	392 786		3812.00	
	4	8 247 038	392 637		3811.50	
Ilave	1	8 222 796	433 096	800	3832.00	A orillas del río Ilave
	2	8 222 846	433 016		3832.50	
	3	8 222 852	433 112		3832.00	
	4	8 222 800	433 190		3 831.50	
Juliaca	1	8 286 432	382 010	600	3834.00	Cerca al río Coata
	2	8 286 370	382 096		3834.00	
	3	8 286 327	382 034		3834.00	
	4	8 286 392	381 990		3834.00	

La recolección de muestras de LR se realizó entre las 06:00-08:00 h en las tres LE simultáneamente, utilizando implementos de seguridad personal. En cada laguna, se tuvo cuatro puntos de muestreo: i) en la entrada, ii) en la salida y iii) dos laterales. Las muestras se recolectaron con una pala a 1 m de distancia del borde de la orilla y a una profundidad de 0.30 a 1.20 m. Se recolectó 3 L de LR en cada punto de muestreo, originando 12 L de muestra compuesta, 11 L se utilizaron para cargar los biodigestores y 1 L fue enviado al laboratorio para el análisis fisicoquímico. En la muestra compuesta de cada laguna, se registró *in situ* una

temperatura en el rango de 7 a 11 °C (siendo mayor en febrero y menor en julio) y pH entre 6.5 y 7.0 (básico cercano a neutro) utilizando el equipo SparkLab.

Medición del biogás. Para mantener las condiciones de DA, se monitoreó la temperatura (rango de medida -35 a 135 °C, resolución 0.01 °C), pH (rango de medida 0 a 14 pH, resolución 0.001), con el equipo digital SparkLab. El biogás generado se midió con un Biogas Analyzer IRCD4 serie M18814014, que mide CH₄ (rango de medida 0 a 100 %, precisión ±3 %) y CO₂ (rango de medida 0 a 100 %, precisión ±3 %). Para homogenizar la mezcla compuesta en la cámara de fermentación se realizó la operación de agitación manual, 30 min antes de registrar los datos, no se pudo registrar la carga microbiana, debido a que nuestro principal objetivo fue determinar las concentraciones de metano.

Análisis estadístico. Para comparar el porcentaje de metano generado a partir de los LR de las tres lagunas de estabilización, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, ya que los datos no cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Además, se aplicó una prueba de regresión para determinar la relación entre porcentaje de metano y tiempo (días). Los análisis se realizaron en el programa INFOSTAT versión 2018, con licencia de uso E001-280.

RESULTADOS

Características de los LR. La concentración de fósforo varió de 0.24 a 1.68 %, potasio de 0.15 a 3.48 %, MO de 21.00 a 51.10 %, carbono de 12.17 a 29.60 %, nitrógeno de 1.44 a 6.77 % y la relación C/N alcanzó hasta 12.67 (Tabla 2).

TABLA 2
Fósforo potasio materia orgánica carbono nitrógeno y relación CN de los LR provenientes de las tres lagunas de estabilización de la región Puno Primer experimento febrero a marzo segundo experimento mayo a junio y tercer experimento julio agosto 2018

Experimento	Laguna	Fosforo %	Potasio %	Materia orgánica (%)	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	C/N
Primer	Puno	1.68	3.48	22.60	13.09	6.23	2.10
	Juliaca	1.50	3.55	21.00	12.17	6.08	2.00
	Ilave	1.41	3.38	23.16	13.42	6.77	1.98
Segundo	Puno	0.88	0.14	37.90	21.96	2.39	9.20
	Juliaca	0.87	0.17	39.40	22.85	2.47	9.25
	Ilave	0.48	0.15	30.20	17.52	1.44	12.17
Tercer	Puno	>1	0.38	51.10	29.60	3.04	9.74
	Juliaca	0.61	0.40	43.90	25.50	2.22	11.49
	Ilave	0.24	0.31	35.20	20.40	1.61	12.67

Generación de metano. A partir de los LR, provenientes de las LE Juliaca, se obtuvo 29.21 % en promedio de metano, Ilave 11.45 % y de Puno 25.78 % (Figura 2).

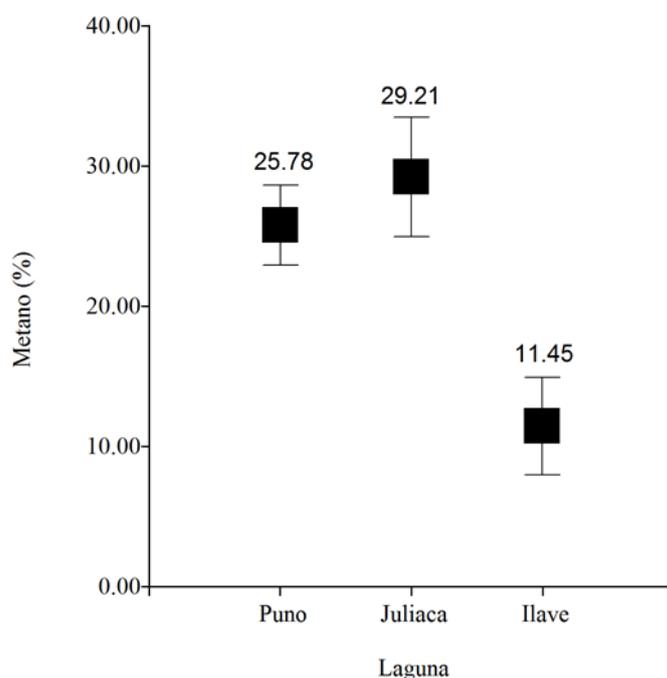


FIGURA 2

Porcentaje de Metano generado a partir de los LR provenientes de las lagunas de estabilización de Puno, Juliaca e Ilave, a través de un proceso de digestión anaeróbica en biodigestores termofílicos n= 4285

No se encontró diferencias significativas de la generación de metano entre los LR de las tres LE ($H = 3084.34$, $P = 0.0001$). El comportamiento de la generación de metano en las tres LE, tuvieron diferentes coeficientes de regresión en relación al registro de datos con relación al tiempo (días). Por ejemplo, para Puno, se determinó un $r^2 = 0.71$, $a = 30.41$, $b = -0.28$, para un total de 1395 registros de datos de generación de metano (%), para Juliaca $r^2 = 0.62$, $a = 27.79$, $b = 0.38$, para un total de 1479 datos y finalmente para Ilave $r^2 = 0.06$, $a = 13.08$, $b = -0.10$ para un total de 1411 datos (Figura 3 y Tabla 3).

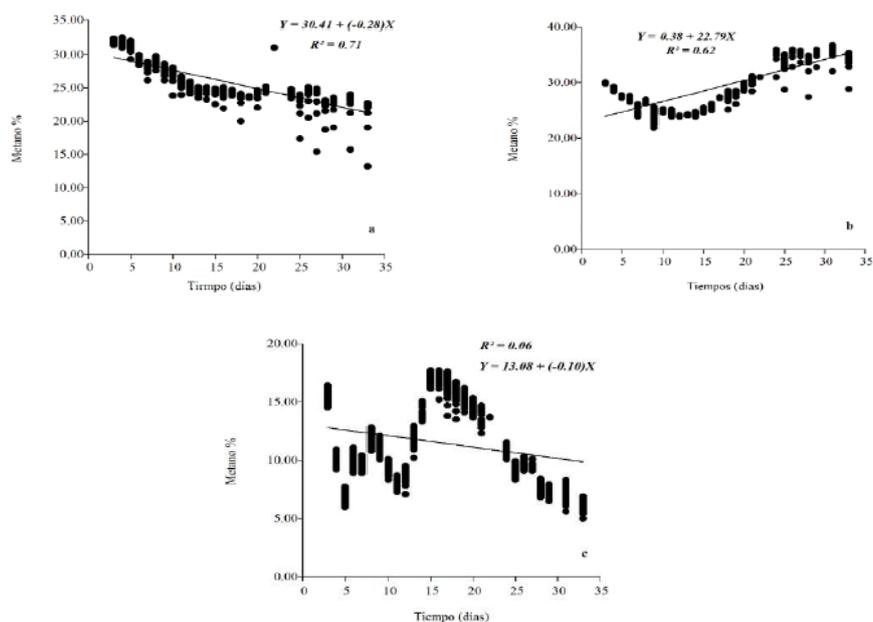


FIGURA 3
Variación de Metano (%) en relación a 33 días de monitoreo en biodigestores termofílicos de lodos de lagunas de estabilización de Puno (a), Juliaca (b) e Ilave (c)

TABLA 3
Análisis de regresión $Yabx$ de metano % en relación a tiempo retención de 33 días en sistema de biodigestores termofílicos para LR de las lagunas de estabilización de Puno Juliaca e Ilave 2018

Lagunas	a	b	r ²	<P	Datos
Puno	30.41	-0.28	0.71	0.0001	1395
Juliaca	27.79	0.38	0.62	0.0001	1479
Ilave	13.08	-0.10	0.06	0.0001	1411

DISCUSIÓN

Diseño del biodigestor. Los tres biodigestores, son el resultado de tres ensayos, los dos diseños anteriores, tuvieron fallas con el control de temperatura, pH y metano. El tercer diseño de biodigestor, funciona adecuadamente en condiciones de 3812 msnm, sin embargo, para incrementar el porcentaje de metano en el biogás, es importante controlar el pH, temperatura que no debe exceder 60 °C, realizar un proceso de co-digestión con otros materiales como: estiércol de ganado porcino, vacuno y camélidos sudamericanos. El costo económico de la construcción de cada biodigestor fue alrededor de 180 US\$.

Los diseños que se hicieron, están en base a la información existente de biodigestores anaerobios de fase completa (hidrólisis, acetogénesis y metanogénesis) y otras que pueden modificarse de acuerdo al volumen de tratamiento de la biomasa¹².

Caracterización de LR. Las LE de AR, presentan diversas composiciones de MO, principal insumo para la generación de metano fluctúa para Puno desde 22.60 a 51.10 %, Juliaca de 21.0 a 43.90 % e Ilave de 23.16 a 35.20 %. Son las plantas de tratamiento de AR, la materia prima para generar metano de las LE de Puno, Juliaca e Ilave. Esta forma de energía, permitiría en un futuro disminuir el uso de combustibles fósiles¹, es importante que LR acumulados en las LE puedan ser transformados en metano, por tanto, estas infraestructuras son una fuente principal para la generación de energía renovable (ER) segura y eficaz⁶⁻⁸. El

metano, que se pueda obtener de las LE, sean utilizadas como fuente de energía^{9,14}, por la disponibilidad de LR en las LE y/o plantas de tratamiento de AR de la región de Puno, utilizando una tecnología de bajo costo como la DA.

Sin embargo, los LR que se obtuvieron en las lagunas en estudio estuvieron por debajo de los parámetros recomendados de C/N no alcanzando los parámetros de la relación C/N, que son entre 25 y 35⁶, además, para una mayor producción de metano se podría adicionar con desechos de ganado vacuno y algas tras un proceso de co-digestión anaerobia²⁸.

Generación de metano a partir de LR. La baja generación de metano registrado hasta un máximo de 29 %, no permite obtener una buena calidad de metano para la producción de energía, comprendida en un rango de 55 a 75 %⁷, no obstante, a través de un proceso de co-digestión, se puede incrementar el porcentaje en la generación de metano⁸.

Respecto a la LE de Juliaca, ésta posee mayor porcentaje de generación, por presentar mayor cantidad de MO, que las lagunas de Puno e Ilave, esta diferencia es probable que esté relacionada por el mayor número de habitantes que generan AR, asimismo, la influencia del tiempo (días), es importante, por ejemplo, para la LE de Puno entre los primeros 5 días se obtuvo 32.09 % de metano y disminuyó hasta el día 33 a 22.6 %, con una variación mínima de 13.2 hasta 32.5 % de metano. Para Juliaca entre los primeros 5 días se inicia con 29.9 % de metano registrando un incrementando hasta el día 33 con 36.7 %, con una variación mínima de 21.8 % y máxima de 36.7 % de metano. Finalmente, Ilave entre los primeros 5 días se inicia con 14.5 % de metano, registrando una disminución hasta el día 33 con 6.9 % de metano, con una variación mínima de 5.0 hasta 17.7 % de metano. Estas variaciones están relacionadas con la cantidad de MO que posee cada LE. Sin embargo, otros autores registran hasta 85 % de metano en los primeros de 15 a 18 días, con un rango de pH 5.5 a 8.5, temperatura de 30-60 °C y relación C/N entre 25 y 35⁶, estos registros están muy por debajo de los porcentajes hallados en la investigación de las LE de Puno, Juliaca e Ilave, existen diversas posibilidades para incrementar el porcentaje de metano, como: co-digestión de estiércol de vacuno, lodo de la fábrica de cerveza, incremento de amoníaco^{6,7,13}, entre los 15 a 30 días, el estiércol de ganado vacuno, genera un mayor porcentaje de metano¹¹, con gramíneas se logra hasta un 76.5 % de metano, con forrajes podemos generar más metano²⁹.

La construcción de los biodigestores para esta investigación, fue adecuada en su diseño y funcionamiento, la limitación en la generación de metano fue la cantidad de MO en los LR. Como recomiendan otros autores, los biodigestores, estuvieron controlados a una temperatura de 50 °C, a 60 °C³⁰. Sin embargo, en otros estudios también obtuvieron registros bajos de 0.6 a 11.2 % de metano a partir del pretratamiento de pasto ensilado¹⁰, también con AR domésticas en 90 días, la producción de biogás fue insignificante¹⁵. Comparativamente en nuestra investigación, se logró obtener hasta 37 % de metano, debido al incremento de MO, considerado como un proceso de co-digestión. Lo innovador en la investigación fue diseñar y construir un biodigestor para la producción de metano, que posteriormente se pueda convertir en generador de ER. En el biodigestor, es importante controlar los procesos de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis y estas están relacionadas con la temperatura, pH, nutrientes, condiciones de operación³¹.

Los resultados de esta investigación, se pueden aplicar para disminuir la emisión total de GEI en el futuro³¹, ya que en los biodigestores se eliminan o se convierten los contaminantes en alternativas de energía viable. Esta eliminación es a través de sistemas anaeróbicos y aeróbicos con control de temperatura y pH³². Es la razón principal que impulsa a muchos países en desarrollo a buscar tecnologías de conversión de desechos en energía, que eliminan al mismo tiempo la acumulación de grandes cantidades de residuos, por lo tanto, muchos países buscan tecnologías modernas para convertir los desperdicios generados en energía³³, también los restos agrícolas tienen un enorme potencial en forma de recuperación de energía y nutrientes³⁴.

Finalmente, el aprovechamiento de los LR de las plantas de tratamiento, LE, residuos sólidos, tienen la posibilidad de generar energía como los combustibles alternativos, por ejemplo, metano³⁵.

En la mayoría de las ciudades, existe un inadecuado manejo de LR, que finalmente ingresan a los ríos, lagos y lagunas, degradando sus ecosistemas. Entonces una alternativa viable es tratar dichos lodos a través del proceso de DA¹⁷, obteniendo como energía limpia metano. En el estudio el control del pH tuvo limitaciones, solo se controló al inicio y al final del proceso, sin embargo, es fundamental monitorear el pH en forma permanente a través de mecanismos de inducción anaeróbico²⁰. El aprovechamiento de residuos orgánicos y obtener biocombustible, es una alternativa viable para disminuir la acumulación de los residuos sólidos y emisiones de GEI como el metano CH₄, dióxido de carbono CO₂²⁴.

La DA, usada para los desechos orgánicos de los restaurantes, también genera biogás a través de biodigestor anaeróbico de 200 L durante 240 días, con pH entre 4.8 a 6.3 y el rendimiento del biogás fue de 0.22 m./kg³⁶, las comparaciones con la investigación realizada, fueron menores en tamaño del biodigestor y tiempo de retención, esta situación es probable que haya afectado en una menor generación de metano. Pero, también es importante para incrementar la generación de metano ensayar con proceso de DA de estiércol de porcino, considerando la relación C/N ya que esta relación es fundamental para el desarrollo microbiano y para la estabilización de la MO³⁷, adicionalmente se puede seguir investigando el proceso de DA con estiércol de aves de corral, desperdicios de cebolla, que permitan aumentar la relación C/N³⁸

Se esperaba obtener entre 50 a 80 % de metano en los biodigestores diseñados, una de las limitaciones importantes fue el bajo contenido de MO que registraban las tres LE, una alternativa, es continuar con investigaciones a través de un proceso de DA que permitan incrementar el porcentaje de metano para convertir en energía útil.

LITERATURA CITADA

1. Acaroglu M, Kocar G, Hepbasli A. The potential of biogas energy. *Energy Sources*. 2005;27(3): 251-9. DOI: <https://doi.org/10.1080/00908310490441656>
2. Santana Artiles F. La pared celular vegetal en la producción de biocombustible. [tesis licenciatura] [La Laguna]: Universidad de La Laguna; 2016. [citado 26 de octubre de 2020]. Recuperado a partir de: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/2690>
3. Biocombustibles [Internet]. Organization for Economic Cooperation and Development. 2017 [citado 9 de abril de 2020]. Recuperado a partir de: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/8d79647e-es/index.html?itemId=/content/component/8d79647e-es>
4. Sánchez L, Llano B, Ríos L. Producción de diésel renovable a partir de aceite de higuera mediante catalizadores de Níquel-Molibdeno soportados sobre alúmina. *Inf Tecnol* 2017;28(1):13-24. DOI: <http://doi.org/10.4067/S0718-07642017000100003>
5. Ahumada LM, Verdeza A, Bula AJ, Lombana J. Optimización de las condiciones de operación de la microgasificación de biomasa para producción de gas de síntesis. *Inf Tecnol* 2016;27(3):179-88. DOI: <http://doi.org/10.4067/S0718-07642016000300017>
6. Demirbas A, Taylan O, Kaya D. Biogas production from municipal sewage sludge (MSS). *Energy Sources A: Recovery Util Environ Eff* 2016; 38(20):3027-33. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2015.1124944>
7. Berktaş A, Nas B. Biogas production and utilization potential of wastewater treatment sludge. *Energy Sources A: Recovery Util Environ Eff* 2007; 30(2):179-88. DOI: <https://doi.org/10.1080/00908310600712489>
8. Demirbas A, Edris G, Alalayan WM. Sludge production from municipal wastewater treatment in sewage treatment plant. *Energy Sources A: Recovery, Util Environ Eff* 2017;39(10):999-1006. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1283551>

9. Rojas Remis R, Mendoza Espinosa LG. Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Rev P +L* 2012;7(2):74-94.
10. Kullavanijaya P, Chavalparit O. The effect of ensiling and alkaline pretreatment on anaerobic acidification of Napier grass in the leached bed process. *Environ Eng Res* 2019;25(5):668-76. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2019.231>
11. Esposito G, Frunzo L, Panico A, Pirozzi F. Enhanced bio-methane production from co-digestion of different organic wastes. *Environ Technol* 2012 ;33(22-24):2733-40. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.676077>
12. Consejería de Economía, Innovación y Ciencia. Estudio Básico del Biogás. Andalucía: Agencia Andalucía de la Energía; 2011. p.166.
13. Pecharaply A, Parkpian P, Annchhetre AP, Jugsujinda A. Influence of anaerobic co-digestion of sewage and brewery sludges on biogas production and sludge quality. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng* 2007;42(7):911-23. DOI: <https://10.1080/10934520701369818>
14. Balat M, Balat H. Biogas as a renewable energy source-a review. *Energy Sources A: Recovery Util Environ Eff* 2009;31(14):1280-93. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567030802089565>
15. Moujanni A, Qarraey I, Ouattmane A. Anaerobic codigestion of urban solid waste fresh leachate and domestic wastewaters: Biogas production potential and kinetic. *Environ Eng Res* 2019;24(1):38-44. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2018.082>
16. Dinh PV, Fujiwara T, Bach LT, Toan PPS, Minh GH. A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends. *Environ Eng Res* 2020;25(1):1-17. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2018.334>
17. Parra Huertas RA. Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *P+L* 2015;10(2):142-59.
18. Julio Guerrero IC, Peláez Jaramillo CA, Molina Perez FJ. Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos. *Rev ION* 2016;29(1):63-70. DOI: <http://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016005>
19. Aguilar-Virgen Q, Taboada-González PA, Ojeda-Benítez S. Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás. *Ingeniería* 2011;15(1):37-45.
20. Terry Calderon VM, Taramona Ruiz L, Candela Diaz J. Modelo matemático para la generación de gas metano por tratamiento anaeróbico de vinaza en proceso semi-continuo. *Rev Tayacaja* 2020;3 (1):40-52. DOI: <https://doi.org/10.46908/rict.v3i1.69>
21. Garzón P, Ochoa-Herrera V de L, Peñafiel R. Estudio de la generación de gas metano a partir del agua residual del proceso de extracción de aceite crudo de palma en biodigestores experimentales. *Av Cienc Ing* 2015;7(2):C130-7. DOI: <https://doi.org/10.18272/aci.v7i2.274>
22. Ibarra-López BE, Narváez-Castro ML, de la Rosa A. Análisis de la disposición de los desechos sólidos y generación de biogás en el relleno sanitario de Ambato, Ecuador. *Rev AIDIS Ing Cienc Ambient* 2020;13(3):988-1006. DOI: <http://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.3.68441>
23. Lagunes-Paredes Y, Montes-Carmona MaE, Vásquez-Márquez A, Cárdenas-Guevara GE. Evaluación de la generación de metano y la estabilidad de proceso de codigestión de lodos residuales y fracción orgánica provenientes de un centro comercial. *Rev Cienc Ambient Recur Nat* 2016;2 (5):26-35.
24. Martin-Calvo J, Castañeda-Gomez J. Estimación de metano, dióxido de carbono y compuestos orgánicos en el relleno de Doña Juana en Bogotá, Colombia. *Ciencias Ambientales* 2021;55(2):326-39. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.16>
25. Aguilar-Virgen Q, Ojeda-Benítez S, Taboada-González P, Quintero-Núñez M. Estimación de las constantes k y L0 de la tasa de generación de biogás en sitios de disposición final en baja california, México. *Rev Int Contam Ambient* 2012;28(Suppl 1):45-51.

26. Quechulpa P, Herrera Meza R, Guarneros Nolasco LR, Terron Mejía KA, Itehua Feria JA. Estudio de la generación de biogás de basura orgánica usando un biodigestor doméstico. *JEEOS* 2020;4(1):43-61. DOI: <https://doi.org/10.19136/jeeos.a4n1.3480>
27. Sandoval A, Santacruz F, Chuquer D, Astorga D. Análisis de inóculos microbianos para la optimización de la producción de biogás a partir de fangos residuales. *Revista Alfa*. 2020;4(12):255-86. DOI: <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v4i12.88>
28. Das A, Mondal C. Biogas production from co-digestion of substrates: A Review. *Int Res J Environment Sci* 2016;5(1):49-57.
29. Reinartz M, Yepes K, Sarmiento F, Arroyave J, Pineda D. Dietary effects on pH, temperature and ruminal methane emission by Holstein cows. *Rev Fac Nac Agron Medellín* 2018;71(1):8437-43. DOI: <https://10.15446/rfna.v71n1.69590>
30. Schirmer WN, Jucá JFT, Schuler ARP, Holanda S, Jesus LL. Methane production in anaerobic digestion of organic waste from Recife (Brazil) landfill: evaluation in refuse of different ages. *Braz J Chem Eng* 2014;31(2):373-84. DOI: <http://doi.org/10.1590/0104-6632.20140312s00002468>
31. Popli K, Lim J, Kim HK, Kim YM, Tuu NT, Kim S. Prediction of greenhouse gas emission from municipal solid waste for South Korea. *Environ Eng Res* 2020;25(4):462-9. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2019.019>
32. Akhbari A, Kutty PK, Chuen OC, Ibrahim S. A study of palm oil mill processing and environmental assessment of palm oil mill effluent treatment. *Environ Eng Res* 2020;25(2):212-21. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2018.452>
33. Shareefdeen Z, Youssef N, Taha A, Masoud C. Comments on waste to energy technologies in the United Arab Emirates (UAE). *Environ Eng Res* 2020; 25(1):129-34. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2018.387>
34. Vaish B, Srivastava V, Singh P, Singh P, Singh R. Energy and nutrient recovery from agro-wastes: Rethinking their potential possibilities. *Environ Eng Res* 2020;25(5):623-37. DOI: <https://doi.org/10.4491/eer.2019.269>
35. Aliaghaei F, Pazoki M, Farsad F, Tajfar I. Evaluating of refuse derived fuel (RDF) production from municipal solid waste (case study: Qazvin Province). *EEER* 2020;4(2):97-109. DOI: <https://doi.org/10.22097/EEER.2020.187286.1088>
36. Granzotto F, Aita C, Silveira DD, Mayer FD, Pujol SB, Pinas, JAV, Hoffmann R. Use of anaerobic biodigester in the treatment of organic waste from a university restaurant. *J Environ Chem Eng* 2021; 9(5): 105795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105795>
37. Veroneze ML, Schwantes D, Gonçalves Jr AC, Richart A, Manfrin J, da Paz Schiller A, et al. Production of biogas and biofertilizer using anaerobic reactors with swine manure and glycerin doses. *J Clean Prod* 2019;213:176-84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.181>
38. Iocoli GA, Zabaloy MC, Pasdevicelli G, Gómez MA. Use of biogas digestates obtained by anaerobic digestion and co-digestion as fertilizers: Characterization, soil biological activity and growth dynamic of *Lactuca sativa* L. *Sci Total Environ* 2019;647:11-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.444>

NOTAS

Fuente de financiamiento: Financiado por la Universidad Nacional del Altiplano- Puno a través del Vice Rectorado de Investigación. Contrato 208- 2018- R-UNA

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos: Los autores desean agradecer el apoyo financiero de la Universidad Nacional del Altiplano- Puno a través del Vice Rectorado de Investigación.

Consideraciones éticas: La investigación cumplió con las normas éticas del proceso de información.

Contribución de los autores: *Angel Canales-Gutiérrez*, participó en la idea, diseño del proyecto, redacción del manuscrito y proceso de datos estadísticos. *Blanca Jacqueline Quispe-Aucca*, participó en la Instalación, recolección de datos, redacción del manuscrito y revisión final. *Ricardo Romero-Loaiza*, en instalación, recolección de datos y redacción del manuscrito. *Nazario Villafuerte-Prudencio*, en el diseño, redacción del manuscrito y revisión final. *Janette Rosario Ramos-Pineda*, participó en la redacción del manuscrito y revisión final. *José Martín Aguilar*, participó en la recolección de datos y redacción del manuscrito. *Bernabé Canqui-Flores*, participo en la redacción del manuscrito y revisión final.

Nota del Editor: *Journal of the Selva Andina Biosphere (JSAB)* se mantiene neutral con respecto a los reclamos jurisdiccionales publicados en mapas y afiliaciones institucionales.

ID del artículo: 108/JSAB/2021

ENLACE ALTERNATIVO

http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-38592021000200081&lng=es&nrm=iso (html)