

GESTIÓN DE RIESGOS AMBIENTALES Y CAMBIO CLIMÁTICO

Evaluación de la producción de metano de vinazas mediante digestor anaerobio tipo batch.

Evaluate the stillage methane production with a batch type anaerobically digester.

Michelle Stefany García Salazar¹, Sandy Pamela Intriago Zambrano, Julio Abel Loureiro Salabarría y Carlos Ricardo Delgado Villafuerte

¹Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, Ecuador
michellegs-95@hotmail.com

Recibido: 17/06/2019

Aceptado: 20/11/2019

Publicado: 27/12/2019

RESUMEN

En la industria azucarera los efluentes líquidos del proceso de producción de etanol, como la vinaza, tienen potencial para ser empleado en digestión anaerobia por la cantidad de materia orgánica que contiene. En esta investigación se realizó un diseño experimental unifactorial a escala laboratorio entorno a la concentración de sólidos volátiles con cinco tratamientos y tres repeticiones. En un total de 15 reactores Batch se introdujo inóculo y la concentración deseada de vinaza en dilución como sustrato durante 21 días. El propósito es evaluar la producción de biogás y metano en relación al contenido de sólidos volátiles y demanda química de oxígeno. Se determinó que el tratamiento (T5) tuvo una mayor producción de biogás de 2.87 L y metano 1.52 L, representando el 51.9% de su composición. Esto se debe a que el inóculo fue adaptado previamente con vinaza concentrada. Se demostró que la vinaza puede ser aprovechada por su potencial para producir biogás además de que el tratamiento contribuye a la disminución del impacto ambiental que provoca la industria azucarera.

PALABRAS CLAVE: biogás, digestión anaerobia, inóculo, metano, vinaza.

ABSTRACT

On the sugarcane industry the liquid effluents of the ethanol production, such as stillage, can be used on the anaerobically digestion. On this research we realize an experimental design at a lab scale regarding volatiles solid concentration with five treatments and three repetitions. We put in fifteen Batch reactors the desire concentration stillage in dissolution as a substrate for twenty-one days. The purpose is to evaluate the biogas and methane production on relation with volatiles solids and the chemical demand of oxygen. We determinate that the (T5) treatment had a higher biogas and methane production, representing the 51.9% of its composition. This was possible because the inoculum was previously adapted on concentrated stillage. It was proved that stillage can be used due to its capacity to produce biogas furthermore it contributes to reduce the environmental impact of the sugarcane industry.

KEYWORDS: anaerobically digestion, biogas, inoculum, methane, stillage.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial los residuos agroindustriales aumentan de forma constante a causa del crecimiento poblacional y su gran demanda (Dormond *et al.*, 2011), lo cual trae consigo un aumento en los desechos que se genera de manera diaria en las plantas procesadoras industriales, que a su vez se incrementan en todo el orbe.

Ecuador como país productor de caña de azúcar aprovecha sus recursos produciendo etanol a partir de las destilerías de alcohol (Galindo, 2016). El alcohol producido en la fermentación contiene una gran cantidad de impurezas, por lo que es sometido a varias etapas de separación por destilación, terminando las impurezas más pesadas en las aguas residuales, denominadas vinazas (Rennola *et al.*, 2007), las cuales tienen un gran impacto ambiental por su alto contenido orgánico y elevada cantidad de demanda química (40 000 mg/litro) y bioquímica de oxígeno (12 000 mg/litro) (Salazar, Sánchez y Aucatoma, 2009).

Dicha situación requiere dar una gestión adecuada a estos residuos mediante la determinación de su composición, propiedad y cantidad, de forma que pueda definirse la tecnología más apropiada para su conveniencia y crearse alternativas de reutilización para disminuir el impacto ambiental que estos residuos provocan (Dormond *et al.*, 2011; Gavilanes, 2014).

Según González *et al.* (2015) se pueden aprovechar estos residuos del sector agroindustrial mediante la tecnología de la digestión anaerobia, siendo utilizados con frecuencia en el proceso de la co-digestión y que involucra la transformación de los mismos en biogás. Desde el punto de vista ambiental, la «metanización» mitigaría el impacto ambiental y posibilita su aplicación agrícola por el contenido valioso de nutrientes inorgánicos presentes en los lodos residuales del tratamiento (Moraes, Zaiat y Bonomi, 2015; Valeiro *et al.*, 2017).

Por estas razones planteadas, el trabajo que se presenta tiene como propósito evaluar la producción de biogás de la vinaza, mediante tratamiento anaerobio, como forma de aprovechamiento de este efluente producto de destilerías.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación

El proyecto se realizó en los Laboratorios de Agroindustria, de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López (ESPAM MFL), situados a 0°49'35.166" latitud Sur y 80°11'11.496" latitud Oeste.

Diseño experimental

El factor en estudio considerado para el proceso de digestión anaerobia fue el porcentaje de dilución de concentración de la vinaza y las variables a medir fueron la producción de metano y biogás.

Tabla 1. *Diseño experimental realizado.*

Diseño experimental	DCA-unifactorial				
Número de tratamientos	5				
Número de repeticiones	3				
Factor	Porcentaje de dilución de la vinaza				
Nivel	10%	20%	30%	40%	100%
Tratamiento (T)	1	2	3	4	5

Nomenclatura (réplica)	T ₁ R ₁	T ₂ R ₁	T ₃ R ₁	T ₄ R ₁	T ₅ R ₁
	T ₁ R ₂	T ₂ R ₂	T ₃ R ₂	T ₄ R ₂	T ₅ R ₂
	T ₁ R ₃	T ₂ R ₃	T ₃ R ₃	T ₄ R ₃	T ₅ R ₃

Fuente: Elaborada por los autores.

Toma de muestra

Se tomó una muestra de las aguas residuales (vinaza) obtenida de una destilería ubicada en la comunidad Mocerita, en el cantón Junín. Para su manejo y recolección de muestra, se consideró la siguiente norma del Instituto Ecuatoriano de Normalización (2013): *NTE INEN 2169:13*.

Caracterización de la vinaza

Se caracterizó la vinaza en el Laboratorio de Química Ambiental y Suelos, de acuerdo con *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association [APHA], 2012). Los parámetros fueron: temperatura, pH, sólidos volátiles, demanda química de oxígeno y sulfatos.

Adaptación de inóculo

La adaptación del inóculo se fundamentó en la metodología de (Guevara, 1999). Se utilizó un recipiente de 1.35 L, desinfectado con hipoclorito de sodio de acuerdo a Camacho, Villada y Hoyos (2017). En cada uno de los reactores se prepararon 200 g de estiércol vacuno y se disolvieron hasta un volumen total de 1 000 mL con agua destilada. Las condiciones y características que se estipularon fueron:

Tabla 2. Condiciones de operación del reactor.

PARÁMETROS	VALORES	UNIDADES	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS
Condiciones de operación del digestor			
Tipo de reactor	BATCH		(Vásquez y Riveros, 2013)
Tipo de digestión	anaerobia		(Lorenzo y Obaya, 2005)
Volumen total	1.35	L	-
Volumen de biogás (26% v/v)	0.35	L	-
Volumen mezcla E+A (74% v/v)	1	L	(Guevara, 1999)
Volumen de estiércol (E)	0.2	L	(Guevara, 1999)
Volumen de agua (A)	0.8	L	(Guevara, 1999)
Condiciones iniciales fijas			
Temperatura	32	°C	(Sanabria, Durán y Gutiérrez, 2012)
Fermentación	Mesofílico		(Vásquez y Riveros, 2013)
Tiempo de fermentación	21	días	(Bermúdez, Hoyos y Rodríguez, 2000)
Agitación	manual		(Galarza y Gutiérrez, 2013)
pH controlado	6.5 - 8		(Aristizábal, 2015)

Fuente: Elaborada por los autores.

Caracterización de inóculo

Se caracterizó el inóculo adaptado previamente de acuerdo con *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Los parámetros fueron: temperatura, pH, sólidos volátiles y demanda química de oxígeno.

Preparación de las unidades experimentales

Se prepararon 15 digestores de acuerdo al diseño experimental en base a la metodología adaptada de los autores Lorenzo y Obaya (2005) y Vásquez y Riveros (2013). Las condiciones y características que se estipularon fueron:

Tabla 3. Condiciones de operación del digestor.

Parámetros	Valores	Unidades	Referencias bibliográficas
Condiciones de operación del digestor			
Tipo de reactor	BATCH		(Vásquez y Riveros, 2013)
Tipo de digestión	anaerobia		(Lorenzo y Obaya, 2005)
Volumen total	3	L	-
Volumen de biogás (30% v/v)	0.9	L	-
Volumen mezcla I:S (70% v/v)	2.1	L	-
Volumen de inóculo (I)	0.84	L	-
Volumen de sustrato (S)	1.26	L	-
Condiciones iniciales fijas			
Concentración de inóculo	2	g SV /L	(Torres y Pérez, 2010)
Temperatura	32	°C	(Sanabria, Durán y Gutiérrez, 2012)
Fermentación	Mesofílico		(Vásquez y Riveros, 2013)
Tiempo de fermentación	21	días	(Bermúdez, Hoyos y Rodríguez, 2000)
Agitación	manual		(Galarza y Gutiérrez, 2013)
pH controlado	6.5 - 8		(Aristizábal, 2015)

Fuente: Elaborada por los autores.

Una vez caracterizados el sustrato y el inóculo, se agregó el volumen de acuerdo a las condiciones de operación del digestor:

- El volumen del inóculo adaptado que se adicionó fue calculado en base a la concentración requerida (2 gSV /L), metodología basada de Torres y Pérez (2010).
- El volumen del sustrato fue dado de acuerdo al porcentaje de dilución de concentración de la vinaza. Los porcentajes de la vinaza diluida son 10%, 20%, 30%, 40% y 100% para T₁, T₂, T₃, T₄ y T₅ respectivamente, considerando al T₅ como vinaza pura o concentrada.
- El volumen requerido de agua para diluir la vinaza fue determinado en base a la fórmula de volumetría (Díaz, Fernández y Paredes, 1997): $V_1 C_1 = V_2 C_2$

Control de las unidades experimentales

Cada siete días se extrajo una muestra por cada unidad experimental en estudio.

Tabla 4. Variables de control de las unidades experimentales.

VARIABLES	METODOLOGÍA	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA
SV	Standard Methods 2540E	(APHA, 2012)
DQO	Standard Methods 5220D	(APHA, 2012)
Biogás*	Método volumétrico	(Pacheco, 2016)
Metano*	Método de purificación de biogás para remoción CO ₂ y H ₂ S.	(Torres y Pérez, 2010) (Viquez, 2010)

Nota: *Estas variables fueron controladas diariamente. **Fuente:** Elaborada por los autores.

Análisis estadísticos

Se realizaron los resultados mediante el Software IBM SPSS Statistics utilizando el análisis de varianza para la valoración de las medias y la prueba de comparación múltiple de medias de acuerdo con el criterio de *Tukey* (HSD) para establecer diferencias significativas ($p < 0.05$). De esta manera se establece cuál es el tratamiento óptimo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del sustrato e inóculo

El siguiente cuadro refleja los resultados obtenidos de la caracterización del inóculo adaptado previamente y además la caracterización de la vinaza (sustrato), el cual coincide con valores similares a otros estudios (Bermúdez, Hoyo y Rodríguez, 2000; Moraes, Zaiat y Bonomi, 2015; Pérez, Pérez y Zumalacárregui, 2017), lo que considera que el sustrato está en rangos típicos por su naturaleza.

Tabla 5. Caracterización del sustrato antes de ser usado en el tratamiento.

PARÁMETROS	UNIDADES	SUSTRATO	INÓCULO
pH		3.25	6.71
T	°C	25.3	29
DQO	g/L	41.6	25
ST	g/L	21.97	21.34
SV	g/L	19.18	17.67
SO ₄	mg/L	273	-

Fuente: Elaborada por los autores.

Además, se muestra un elevado contenido de sulfatos de 273 mg/L en la vinaza. De este resultado se deriva la hipótesis de que pueden desarrollarse con gran intensidad las bacterias formadoras de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en el medio anaerobio, debido a la cantidad sustentable de sulfatos, a menos que se disminuya la concentración existente en el medio. Este valor es considerado un punto importante debido a que excede los 160 mgSO₄/L que los autores Lorenzo y Obaya (2005) consideran como límite, por lo que las bacterias metanógenas tienden a inhibirse durante el proceso y la producción de biogás sería menor, así como su poder calórico (Lorenzo, Chanfón y Pereda, 2013).

Producción de biogás y metano por tratamiento

Se resume el promedio de valor acumulado de biogás y metano por cada tratamiento, de la siguiente manera:

Tabla 6. Producción de biogás y composición de metano

	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Biogás total (L)	1.72	1.21	1.85	1.88	2.87
Metano (L)	0.99	0.60	0.84	1.02	1.52

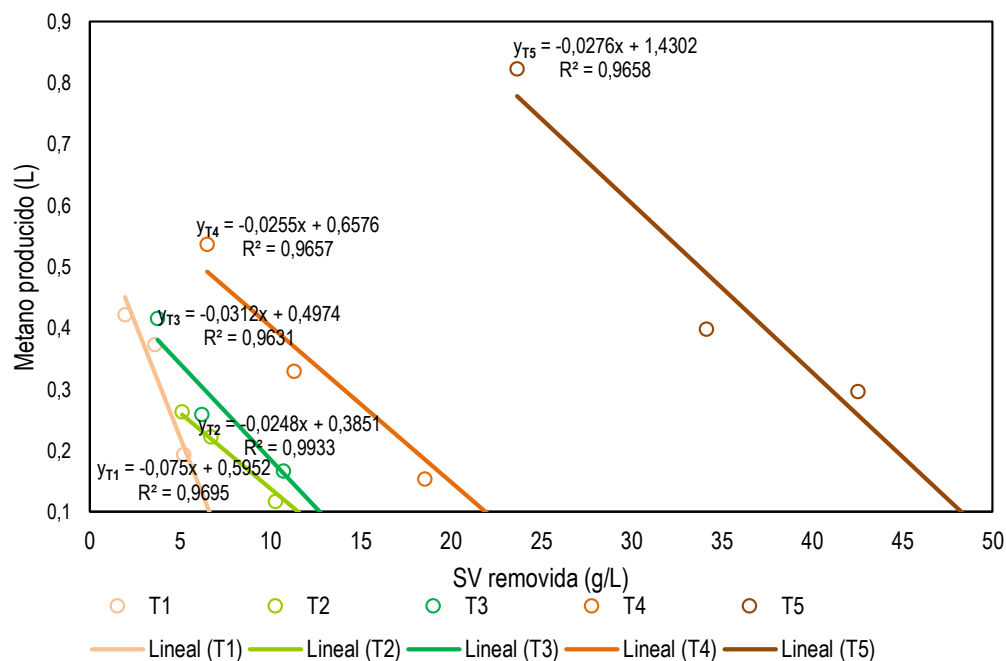
Fuente: Elaborada por los autores.

El tratamiento T₁ obtuvo el mayor porcentaje de CH₄ (57.4%), sin embargo, se recolectó mayor volumen de biogás en el tratamiento T₅, resultando también mayor el volumen de metano. Por lo cual, el tratamiento que mayor producción de biogás produjo fue el T₅ con un valor de 2.87 L y se debe a la mayor cantidad de materia orgánica contenida en comparación con los otros tratamientos (Sánchez *et al.*, 2016). Esto se explica debido a la presencia de sulfuro de hidrógeno dentro de la composición del biogás, pues la vinaza contiene niveles de sulfatos considerables y dependerá de la concentración en que se presente (Lorenzo, Chanfón y Pereda, 2013).

Relación entre las variables controladas

En la *figura 1* se observa la disminución de la concentración de SV (g/L) por cada tratamiento a medida que el volumen de metano (L) aumentaba. Se puede determinar que es una relación inversamente proporcional, debido a que los sólidos volátiles removidos representan la cantidad materia orgánica necesaria para producir metano.

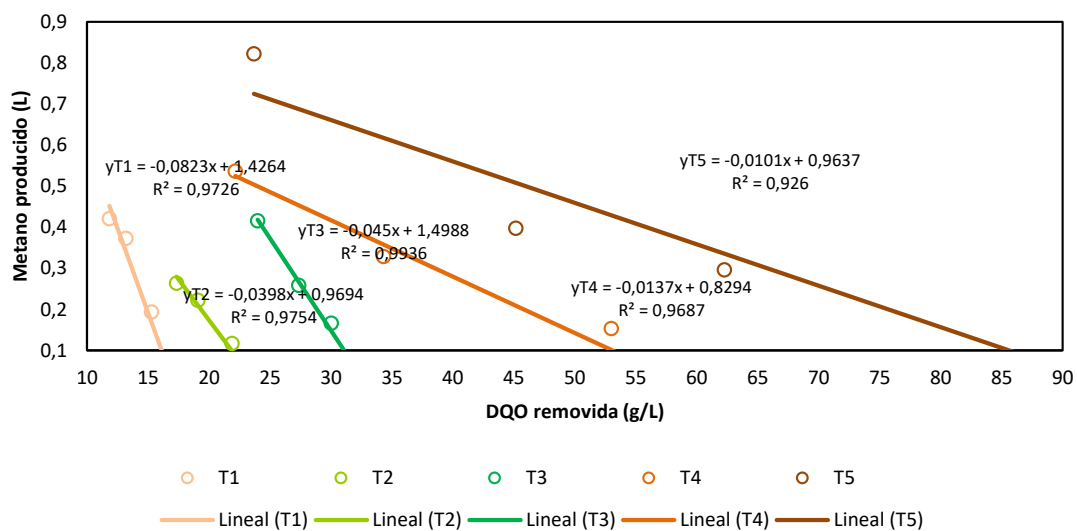
Figura 1. Variación de la producción SV (g/L) vs metano producido (L) durante el proceso de digestión anaerobia de la vinaza.



Fuente: Elaborada por los autores

En la *figura 2* se puede contrastar el aumento del volumen de metano (L) generado por tratamiento a medida que disminuye la cantidad de DQO (g/L). Se determina que la producción de metano acumulado es equivalente a la DQO que ha sido degradada por tratamiento aplicado, a partir de las condiciones iniciales (López, Borzacconi y Passeggi, 2017). De acuerdo con Sánchez *et al.* (2016), esto se debe a que tanto los SV, como la DQO, son proporcionales a la materia orgánica que puede ser convertida a biogás.

Figura 2. Variación de la producción SV (g/L) vs metano producido (L).



Fuente: Elaborada por los autores.

De acuerdo con Martínez (2005), el ajuste lineal por el método de R cuadrados en los cuatro gráficos presentados, determina que $0 < R^2 < 1$. Se considera que la relación entre las variables X y Y es lineal, en base a la información determinada del diseño experimental, y que este modelo es adecuado para describir la relación que existe entre estas variables.

Del T₁ se puede inferir que tenía un grado de contaminación menor que los demás tratamientos por poseer mayor dilución de agua. Se conoce que el T₅ posee vinaza concentrada, por lo que tiene mayor carga orgánica; ha tenido una notable disminución de su contenido tanto en SV y DQO, misma que es atribuida a la hidrólisis del residuo y a la liberación de ácidos durante la etapa acidogénica (Appels *et al.*, 2008).

Puede afirmarse que la vinaza puede ser tratada por reactores anaerobios, y que la biomasa puede aclimatarse y trabajar con sus niveles altos de concentración (López, Borzacconi y Passeggi, 2017).

Por otra parte, pese que el inóculo ha pasado por un proceso de adaptación, la dilución con agua que se aplicó en algunos de los tratamientos hace que disminuya la concentración de SV, lo que influye en el crecimiento de los microorganismos; por lo cual se considera una de las razones del menor aumento microbiológico (Mundhenke, Müller y Schwedes, 2001), así como de la producción de biogás y metano.

En los tratamientos se presentaron problemas operativos, pero no asociados al comportamiento del reactor, sino a la presencia de fugas u obstrucciones, además de posible inhibición. No está claro el factor clave de inhibición, pero el principal inconveniente para el tratamiento del agua residual está asociado al trabajar con vinaza cruda. Sin embargo, es recomendable trabajar con el agua residual de esta manera una vez adaptado el inóculo puesto que el uso del agua en reactores a gran escala trae

consecuencias importantes en los costos asociados al volumen del reactor y a la necesidad de contar con este recurso para dilución (Chernicharo, 2007; López, Borzacconi y Passeggi, 2017). Lo que sí debe resaltarse es la elección del agente neutralizante, pues en el presente trabajo se usó hidróxido de sodio, pero existen otros tipos de menor costo y fácil acceso.

Análisis de Varianza del Diseño Experimental

Se realizó el análisis de varianza, donde se pueden observar los resultados reportados entre las variables a medir. De cada tratamiento se determina que hay un efecto significativo sobre la producción de biogás y metano, debido a que el valor p es menor que 0,05, lo que representa que cada tratamiento influye de forma distinta respecto a otro ($T_1 \neq T_2 \neq T_3 \neq T_4 \neq T_5$), pues responde a un comportamiento condicionado en su operación inicial, esta interpretación concuerda con lo expuesto por los autores (Sanabria, Durán y Gutiérrez, 2012).

De acuerdo con la prueba de Tukey (HSD) se determina que el *tratamiento 5* (T_5) presenta los mejores resultados en cuanto a la producción de biogás y metano, y que el *tratamiento 4* también mostró resultados satisfactorios.

CONCLUSIONES

La caracterización de la vinaza presentó rangos típicos de su naturaleza, tiene un pH de 3.25; DQO de 41.6 g/L; SV de 19.18 g/L y posee un contenido de sulfatos notable de 273 mg/L, lo que significa un posible factor a influir en los tratamientos en cuanto la producción y calidad de biogás por la presencia de sulfuro de hidrógeno en su composición.

Se adaptó el inóculo con un porcentaje de producción de biogás de 81%, lo que determina una gran actividad microbiana.

El tratamiento óptimo de acuerdo al diseño experimental en base a su producción de biogás y metano fue el T_5 , el cual contenía niveles altos de concentración de vinaza, lo que influyó en que existiera una mayor actividad microbiana y mayor producción de biogás (2.9 L).

De acuerdo al análisis de varianza existe significancia entre cada tratamiento, lo que responde a un comportamiento de acuerdo a la condición de operación inicial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Public Health Association. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (22.^a ed.).
- Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J. y Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755-781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
- Aristizábal, C. (2015). Caracterización físico-química de una vinaza resultante de la producción de alcohol de una industria licorera, a partir del aprovechamiento de la caña de azúcar. *Ingenierías USBmed*, 6(2), 36-41. <https://doi.org/10.21500/20275846.1729>
- Bermúdez, R.C., Hoyos, J.A. y Rodríguez, S. (2000). Evaluación de la disminución de la carga contaminante de la vinaza de destilería por tratamiento anaerobio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 16(3), 103-107. <https://cutt.ly/OySze8l>

- Camacho, R., Villada, H. y Hoyos, J. (2017). Evaluación del Estiércol de Vaca como Inóculo en la Digestión Anaerobia Termófila de Residuos Sólidos Urbanos. *Información tecnológica*, 28(3), 29-36. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000300004>
- Chernicharo, C. (2007). *Anaerobic reactors*. IWA Publ.
- Díaz, J., Fernández, M.T. y Paredes, F. (1997). *Aspectos básicos de bioquímica clínica*. Ediciones Díaz de Santos.
- Dormond, H., Rojas, A., Boschini, C., Mora, G. y Sibaja, G. (2011). Evaluación preliminar de la cáscara de banano maduro como material de ensilaje, en combinación con pasto King Grass (*Pennisetum purpureum*). *InterSedes*, 12(23), 17-31. <https://cutt.ly/DyDnFew>
- Galarza, M. y Gutiérrez, M. (2013). *Evaluación del potencial de biometanización en el lactosuero* [Tesis de grado, Universidad de San Buenaventura]. <https://cutt.ly/DySz3y4>
- Galindo, P. (2016). *Sistematización de la experiencia, producción de aceite de piñón para plan piloto de generación eléctrica en Galápagos* [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Ecuador] <http://repositorio.puce.edu.ec:80/xmlui/handle/22000/12495>
- Gavilanes, I. (2014). *Oportunidades y desafíos de la gestión de residuos orgánicos procedentes del sector agroindustrial en América del Sur: Provincia de Chimborazo (ECUADOR)* [Tesis de Maestría, Universidad Miguel Hernández de Elche]. <https://cutt.ly/gySxb6P>
- González, M.E., Pérez, S., Wong, A., Bello, R. y Yañez, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229-235. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>
- Guevara, L (1999). *Caracterización y Digestión Anaeróbica de Vinazas Destiladas del Ecuador* [Tesis de Maestría, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <https://cutt.ly/myScuIq>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). Norma Técnica Ecuatoriana: Agua. Calidad del agua. Muestreo. Manejo y conservación de muestras (NTE INEN 2169:2013). <https://cutt.ly/jySIhTG>
- López, I., Borzacconi, L. y Passeggi, M. (2017). Anaerobic treatment of sugar cane vinasse: treatability and real-scale operation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 93(5), 1320-1327. <https://doi.org/10.1002/jctb.5493>
- Lorenzo, Y. y Obaya, C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XXXIX(1), 35-48. <https://cutt.ly/OyScKgp>
- Lorenzo, Y., Chanfón, J. y Pereda, I. (2013). Estudio de la digestión anaerobia mediante el ensayo de actividad metanogénica empleando vinazas con diferentes contenidos de sulfatos. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 47(1), 45-50. <https://cutt.ly/hySvfeP>
- Martínez, M. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario jurídico y económico escurialense*, (38), 315–331. <https://cutt.ly/dySvbRN>
- Moraes, B., Zaiat, M. y Bonomi, A. (2015). Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 888-903. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.023>

- Mundhenke, R., Müller, J. y Schwedes, J. (2001). Influence of the VS-Content in Digested Sludge on Anaerobic Degradation. *Chemical Engineering y Technology*, 24(6), 635-637. [https://doi.org/10.1002/1521-4125\(200106\)24:6<635::AID-CEAT635>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/1521-4125(200106)24:6<635::AID-CEAT635>3.0.CO;2-P)
- Pacheco, S. (2016). Construcción y evaluación de un digester anaerobio para la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <http://bdigital.unal.edu.co/51702/>
- Pérez, Y., Perez, O. y Zumalacárregui, L. (2017). Caracterización Química, Física Y Microbiológica De Dos Vinazas Cubanas. *Revista EIA*, 14(28), 29-43. <https://cutt.ly/QySvOVv>
- Rennola, L., Yépez, C., Bullón, J. y Salazar, F. (2007). Tratamiento de las aguas residuales de una destilería mediante el uso de coagulantes y membranas. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 30, 11-19. <https://cutt.ly/OySv6Fk>
- Salazar, M., Sánchez, M.A. y Aucatoma, B. (2009). Uso de cachaza descompuesta y porcentaje de sustitución de fertilizante químico en un lote del ingenio Valdez. *Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador*. <https://cutt.ly/mySbuou>
- Sanabria, J., Durán, M.F. y Gutiérrez, N. (2012). Comparación de dos métodos de medición de actividad Metanogénica específica en reactores anaerobios aplicados al tratamiento de Vinazas. *Ingeniería y Región*, 9, 75-82. <https://doi.org/10.25054/22161325.777>
- Sánchez, C., Patiño, M.E., Alcántara, J.L., Reyes-Ortega, Y., Pérez-Cruz, M.A. y Ortíz-Muñoz, E. (2016). Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(2), 191-198. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.05>
- Torres, P. y Pérez, A. (2010). Actividad metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (9), 5-14. <https://cutt.ly/GySbPKw>
- Valeiro, A., Portocarrero, R., Ullivarri, E. y Vallejo, J. (2017). Los residuos de la industria sucro-alcoholera argentina. Serie: Gestión de residuos de la industria sucro-energética argentina. Editorial INTA. <https://cutt.ly/5ySbMWP>
- Vásquez, N. C. y Riveros Jiménez, D.R. (2013). *Diseño y construcción de un prototipo biodigestor tipo mixto para la producción y almacenamiento de gas metano* [Tesis de grado, Universidad de San Buenaventura]. <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/72493.pdf>
- Viquez, J.A. (2010). Remoción del sulfuro de hidrógeno H₂S(g)/ácido sulfhídrico H₂S (aq) en el biogás. *ECAG informa*, 53, 16-20. <https://cutt.ly/oySTA6B>