



Producción de biogás a partir de la co-digestión anaerobia de la mezcla de vinaza proveniente del mezcal con excretas bovinas

F. A Aguilar-Aguilar,^{1*} L Mora-Flores², L. F Juárez-Santillan², V. López-Hernández³, R. A. Limón-Hernández³, I. Hernández-Martínez³

¹Programa de Energías Renovables de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Prolongación Dr. Miguel Patiño s/n, Centro, Gutiérrez Zamora 93556, Veracruz, México.

²Programa de Agrobiotecnología de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Prolongación Dr. Miguel Patiño s/n, Centro, Gutiérrez Zamora 93556, Veracruz, México.

³Programa de Química de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Prolongación Dr. Miguel Patiño s/n, Centro, Gutiérrez Zamora 93556, Veracruz, México.

*Autor de correspondencia: falexaguilar@gmail.com

Recibido 25 de agosto de 2020; aceptado 25 de septiembre de 2020

RESUMEN

Al ser un país megadiverso, México ha generado mucho interés a nivel mundial sobre la exportación de mezcal y carne bovina y sus derivados; sin embargo, durante el proceso de producción de ambos productos se genera vinaza y excretas bovinas, que han contribuido a la contaminación ambiental. La co-digestión anaerobia es un método de tratamiento que aprovecha la sinergia entre dos o más residuos para mejorar la producción de biogás. En este estudio,

se evaluó la combinación de la vinaza del mezcal con las excretas bovinas sobre la producción de biogás, con ensayos realizados en condiciones controladas, es decir, pH entre 7-8 y 30°C. De los resultados obtenidos, se observó que la vinaza del mezcal (vinaza 100) no tiene efecto positivo en la producción de biogás, pero con 25% de vinaza y 75% de excretas bovinas mejora significativamente la producción con 108 ml o bien 60 m³/ton de SV, que podría generar hasta 370.59 kw/m³ o bien 318705 Kcal/m³. Sin embargo, no se observó una mayor producción cuando fue comparado con los resultados obtenidos de 100% de excretas bovinas. La utilización de más de 25% de concentración de vinaza podría generar un efecto negativo y de bajo rendimiento de biogás; por lo que se sugiere el uso de la mezcla 25% vinaza y 75% de excretas bovinas para la producción de biogás, que, en consecuencia, puede generar electricidad como energía en forma de calor, con beneficio directo a la agroindustria y el desarrollo sostenible como lo marca la agenda 2030.

PALABRAS CLAVE: Biogás, co-digestión anaerobia, vinaza, excretas, gestión de residuos.

ABSTRACT

Being a megadiverse country, Mexico has generated a lot of interest worldwide about the export of mezcal and beef and its derivatives. However, during the production process of both products it generates stillage and cattle manure, which have contributed to environmental contamination. Anaerobic co-digestion is a treatment method between the synergy of organic waste to improve the production of biogas, from the treatment of individual waste. In this study, the combination of mezcal vinasse with cattle manure was evaluated in biogas production. These tests were carried out under controlled conditions, that is, pH between 7-8 and 30 °C. From the results obtained, it was observed that mezcal vinasse (vinasse100) has no positive effect on biogas production, but in with 25% vinasse and 75% of cattle manure significantly improves production with 108 mL or 60 m³/ton of SV, which could generate up to 370.59 kw/m³ or 318705 Kcal/m³. However, no higher production was observed when compared to the results obtained from 100% bovine excreta. Higher concentration of 25% stillage could generate a negative effect and low biogas yield; therefore, it is suggested to use the mixture 25% vinasse and 75% bovine excreta to produce biogas, which consequently can

generate electricity as energy in the form of heat, with direct benefit to agribusiness and sustainable development as marks the 2030 agenda.

KEY WORDS: Biogas, anaerobic co-digestion, vinasse, cattle manure, waste management.

INTRODUCCIÓN

La agroindustria es una de las principales actividades en México que ha venido cobrando relevancia en los últimos años. Por un lado, la industria del mezcal resaltado por su consumo nacional e internacional, que ha ido en aumento. Para su elaboración, se han utilizado aproximadamente 330,000 hectáreas de agave de diferentes variedades, tanto del tequilero como del mezcalero, que se emplean para la elaboración de 2.9 millones de litros de tequila y mezcal (Chavez-Parga et al, 2016). Sin embargo, durante el proceso de elaboración de la bebida se genera vinaza como subproducto, que para la industria es un desecho con alto potencial contaminante (Rodríguez et al, 2017).

Por otro lado, la ganadería es una de las principales actividades en el país que suministra carne, leche y sus derivados, la cual ha crecido en los últimos años, sector en el que México se ha colocado como uno de los principales exportadores y consumidores a nivel

mundial (Comino et al., 2009; OECD & FAO, 2017). No obstante, esta situación trae como resultado el aumento de la contaminación por la generación de excretas bovinas (EB) (Safari et al. 2018).

En el 2018, de acuerdo con la SENER (2020), México consumió aproximadamente 6,484 PJ (Penta Jules) de energía, principalmente de fuentes fósiles (84%) y en menor porcentaje de fuentes renovables (16%), de los cuales 6% representó la biomasa (leña y carbón vegetal) y 10% energías renovables modernas (solar, eólica, viento, biomasa, entre otras). Sin embargo, en la actualidad se siguen utilizando fuentes fósiles como el principal combustible, que ha venido contribuyendo a la generación de gases de efecto invernadero (GEIs), que, en consecuencia, ha contribuido a los efectos del cambio climático global (Shuba & Kifle, 2018). En la actualidad, existen numerosos esfuerzos para contrarrestar dichos GEIs (States et al, 2019); uno de ellos ha consistido en adoptar políticas para el desarrollo y promoción de las

fuentes renovables. Asimismo, México es uno de los miembros que ha adoptado la agenda 2030 para llegar al desarrollo sostenible a mediano y largo plazo, por lo que se han adoptado los 17 objetivos que se marcan en la agenda. De esta forma, México busca contribuir a la disminución de los GEIs con el objetivo de la Agenda 2030 “Energías asequibles y no contaminantes”. De acuerdo con los estudios realizados por Gómez (2006), y Valdez et al (2010), en México existe un gran potencial para generar biocombustibles líquidos (biodiesel) y gaseosos (biogás), y es que se estima que México podría generar energía entre 2.63 y 3.77 PJ al año; sin embargo, aún no se cuenta con información y tecnologías disponible para alcanzar dicho nivel energético. Por lo tanto, se buscan tecnologías eficientes, a bajo costo y que puedan proveer de energía a las familias de bajos recursos.

La producción de biogás por digestión anaerobia a bajo costo ha sido una de las tecnologías más accesibles a nivel mundial (Puyol et al, 2017). La digestión anaerobia se ha aplicado a una amplia gama de materiales orgánicos, incluyendo residuos sólidos urbanos, agroindustriales, subproductos de la producción de biocombustibles entre otros, con la

ventaja de ser tratados con bajo requerimiento de energía en la operación (Khalid, 2011; Mao, 2015; Ward et al, 2008; Weiland, 2010); de hecho, la co-digestión anaerobia es un método de tratamiento utilizado para mejorar el rendimiento de la digestión anaerobia por sus innumerables beneficios (Astals et al, 2014), entre los que podríamos mencionar la dilución de componentes tóxicos, el incremento de la carga de materia orgánica biodegradable en el reactor, el mejoramiento del equilibrio de nutrientes y la sinergia entre los microorganismos, además de la estabilidad y el rendimiento de la producción de biogás (Dennehy, 2016; Khalid, 2011).

Por lo tanto, este trabajo evalúa la producción de biogás a partir de la vinaza del mezcal y las EB por digestión anaerobia; además de que pretende encontrar un nicho de oportunidad para generar energía limpia, a bajo costo y que contribuya a la disminución de los GEIs, así como a generar información importante para la transformación de los residuos en productos con valor agregado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sustratos

Todos los reactivos y disolventes utilizados en este

estudio fueron de grado reactivo; la vinaza fue obtenida del proceso de elaboración de la fábrica de mezcal *Amores* en el rancho Cebú (ubicado en el municipio de Oaxaca, Oaxaca), y las EB provinieron de una zona ganadera para la producción de leche, las cuales fueron obtenidas en fresco en zonas aledañas al municipio de Gutiérrez Zamora, Veracruz. Asimismo, todos los ensayos experimentales fueron realizados en el laboratorio de química del Programa de Energías Renovables y Química de la Universidad Tecnológica de Gutiérrez Zamora, Veracruz, México.

Caracterización de los substratos

La vinaza del mezcal y las EB fueron caracterizadas por el contenido de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y pH como base en las técnicas analíticas propuestas por la American Public Health Association en 1995 (American Public Health Association, 1995). Todas las determinaciones analíticas se realizaron en triplicado.

Diseño experimental

El delineamiento experimental adoptado fue completamente al azar, con cinco tratamientos y tres

repeticiones, para evitar los errores experimentales, con un total de 15 reactores. Dichos tratamientos fueron denominados: V100, EB 100, V75, V50, V25, como se presentan a continuación (tabla 1). Todos los ensayos fueron incubados a 30°C durante aproximadamente 30 días, y una vez que los reactores dejaron de producir biogás, el proceso de monitoreo fue detenido.

Tabla 1. Diseño experimental completamente al azar para la producción de biogás a partir de la vinaza del mezcal con EB.

Tratamientos	Vinaza (%)	Excretas bovinas (%)
V100	0	100
EB 100	100	0
V75	75	25
V50	50	50
V25	25	75

Todos los ensayos se realizaron en modo discontinuo, utilizando frascos cilíndricos de vidrio con capacidad 250 ml con tapa de plástico y sellado hermético; cada frasco

fue llenado a un 70% de su capacidad y 30% como reservorio para el almacenamiento del gas. Posteriormente, a cada uno de los reactores se les adicionó 12 gr de sólidos volátiles, variando la concentración de los sustratos de la tabla 3. Al finalizar el llenado de los reactores con la mezcla de los residuos, fue adicionada una solución rica en fosfatos con 2 gr de K_2HPO_4 , 20 gr de KH_2PO_4 y 2 gr de bicarbonato de sodio por cada 1000 ml. Así mismo, antes de cerrar los reactores el pH, fue medido y corregido con una solución de NaOH al 0.5 M hasta obtener un pH de 7.5. El modelo matemático utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = es el valor observado del ensayo que recibió el tratamiento i en repetición j ;

μ = el promedio general de los experimentos;

T_i = el efecto debido al tratamiento i , que fue aplicado al experimento;

ε_{ij} = error experimental (variación debida a los factores no controlados).

Los resultados de la producción acumulada de biogás se sometieron a análisis de varianza ANOVA y los

resultados se compararon mediante la prueba de Tukey al nivel de 5% de probabilidad en el software Statistica 8.0.

Cuantificación del volumen de biogás

El sistema de medición de volumen de gas fue adaptado del trabajo de Aguilar et al (2017) y Aquino et al (2007).

El sistema estuvo compuesto por un frasco de vidrio invertido de 1000 ml, que contenía una solución de NaOH 3 mol/l, cuya función fue la captura de CO_2 ; la tapa del frasco estuvo adaptada con apertura para entrada del gas producido en el reactor anaerobio y otra abertura para la salida del líquido desplazado, por la entrada del gas (figura 1). Las mediciones se realizaron cada 24 horas, después del primer día de incubación, por el método de desplazamiento de líquido; para ello, una probeta anexa recogió el líquido desplazado por la entrada del gas (figura 1), cuyo volumen fue convertido a volumen de biogás normalizado (ml), considerando condiciones normales de presión y temperatura (CNPT, 1 atm, 0°C), de acuerdo con la ley de los gases ideales.

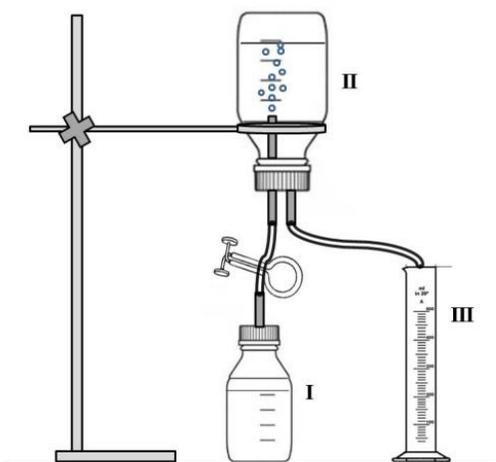


Figura 1. Sistema de medición del volumen de biogás producido: (I) reactor con salida para el biogás, (II) frasco con solución de NaOH 3 mol/l usado para la remoción de CO₂ y (III) probeta para la cuantificación del volumen del líquido desplazado por la entrada del biogás (Aguilar et al, 2017).

RESULTADOS

En la tabla 2 se muestran los resultados de la caracterización fisicoquímica, la vinaza y las EB. La vinaza fue un subproducto del proceso de la destilación del mezcal de agave, la cual se obtuvo a partir del proceso de la fermentación alcohólica (Rodríguez et al, 2017) y, por su naturaleza, presentó pH ácido (5.07). El valor del pH es un indicador para evaluar la estabilidad de los sistemas de digestión anaerobia, ya que afecta a los microorganismos acidogénicos y metanogénicos, por lo que es recomendable que el pH se encuentre en el

intervalo de 6.5 a 7.5 durante el proceso de digestión anaerobia para una óptima producción de biogás (Dennehy et al, 2016; Glanpracha et al, 2016). Los sólidos totales representan la cantidad de materia seca presente en los residuos, por ejemplo, las EB tuvieron 430 gr/kg de materia seca, alta en comparación con la vinaza que presentó 18.11 gr/kg. Sin embargo, el valor de los sólidos volátiles de la vinaza fue alrededor de 18 gr/ kg, superior al contenido SV en las EB de 290.83 gr/kg, respecto al peso de la materia seca. De acuerdo con el estudio de Labatut et al (2011) y Lesteur et al (2010), la relación SV/ST representa la cantidad de materia orgánica que puede ser convertida a biogás, como se observa en la tabla 2 (Panichnumsin et al, 2010), experimento en el que las EB tuvieron 67.44%, mientras que la vinaza presentó 99%. Por su parte, el estudio realizado por Castrillón et al (2011), obtuvo una relación SV/ST de las EB molidas de 48.44%, mientras que las EB cribadas en el mismo estudio tuvieron 66.9%. Cabe señalar que cada sustrato será diferente de acuerdo con las condiciones del lugar y la dieta de los animales, y por ello en este estudio se obtuvieron 67.44% valores cercanos a los encontrados por Castrillón y colaboradores. Esta información puede ser de gran utilidad debido a que demostraría que ambos

sustratos pueden ser mezclados y aumentar su potencial de producción de biogás, ya que las EB tienen una relación c/n (carbono/nitrógeno) de 25:1 (Labatut *et al.*, 2011), y al adicionar la vinaza incrementa dicha relación, con mayor rendimiento de biogás.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica y elemental de la vinaza y las EB utilizadas para la producción de biogás.

Parámetros	Vinaza	Excretas bovinas
pH	5.07±0.2	6.87±0.3
ST (g/kg)	18.11±1.2	430.00±23
SV (g/kg)	18.00±2.2	290.83±15
ST/SV (%)	99.00	67.44

En la figura 2 se ilustran las curvas de progreso de la producción de biogás por gramo de sólidos volátiles. En los resultados obtenidos, se observó una fase "lag" los primeros cinco días, lo que indicó alguna restricción en el inicio inmediato de la producción de gas; consecuentemente, hubo una rápida adaptación de los microorganismos al proceso de co-digestión anaerobia. Después del inicio de la digestión anaerobia y hasta el día 16 se observaron las mayores tasas de producción de gas (Figura 2); a continuación, se generó un período

cuyo progreso de la producción de gas ocurrió con velocidad menor, pero constante. Después del día 17 de producción de biogás todos los sistemas entraron en estado estacionario. Según Kafle y Kim (2013), la degradación microbiana comienza por los sustratos con alto contenido de carbohidratos solubles, seguido de las proteínas y la degradación de las fibras. No obstante, se observa mayor rendimiento solo en EB (100) con 67.4 ml/gr SV, seguido de la combinación Vinaza 25 (25% vinaza, 75% EB) con 52.9 ml/gr SV. El resto de los tratamientos generaron baja tasa de producción de biogás, por lo que es probable que del proceso de producción de biogás con mayor concentración de vinaza (>25%) se generen compuestos que inhiban el crecimiento de las bacterias productoras de biogás; o bien, es probable que el contenido de materia orgánica biodegradable sea bajo, como se muestra en la tabla 1, con 18 gr de SV/ kg de vinaza. De acuerdo con el estudio realizado por López *et al.* (2017), mencionan que la vinaza tiene un bajo contenido de materia orgánica de 1.3 g DQO por litro.

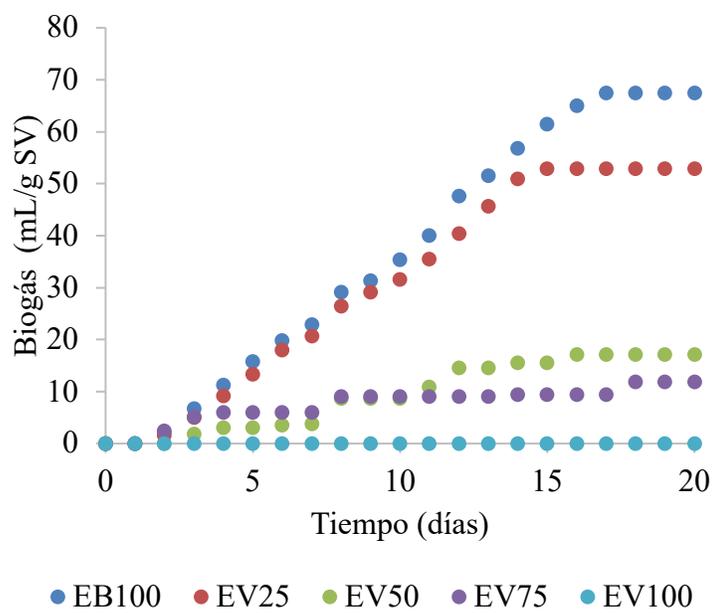


Figura 2. Cinética de producción de biogás a partir de la co-digestión anaerobia de vinazas del mezcal y EB.

El proceso de producción de biogás fue comparando con los controles, sólo vinaza (Vinaza 100) y excretas bovinas (EB 100) con la combinación de ambos residuos en co-digestión anaerobia a una temperatura de $30\pm 1.0^{\circ}\text{C}$. Como se observa en el gráfico de la figura 2, los mejores resultados durante 20 días fueron con 100% de EB, generando 137.5 ml acumulados de biogás, seguido de la combinación de 75% de EB y 25% vinaza con 108 ml, y los demás tratamientos presentaron una producción baja (menor que 40 ml acumulados). Cabe señalar que, solo Vinaza 100 tuvo nulo rendimiento de biogás durante el tiempo de monitoreo.

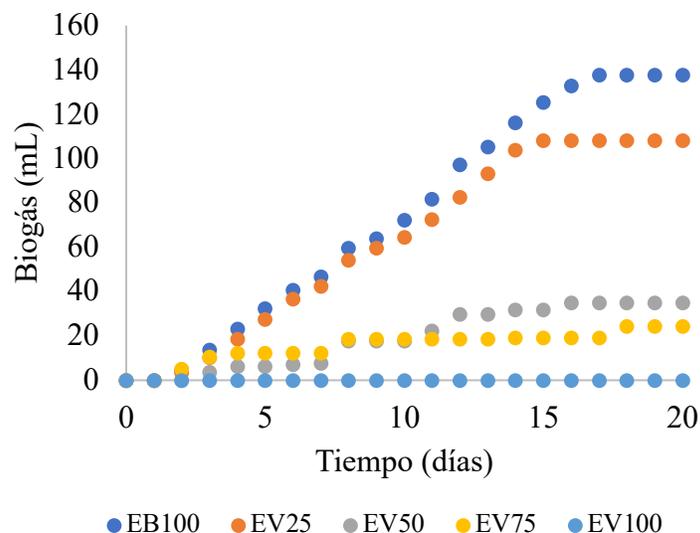


Figura 3. Cinética de producción de biogás a partir de la co-digestión anaerobia de vinazas del mezcal y EB.

En la tabla 3 se ilustran los rendimientos de producción de biogás, donde los mejores rendimientos fueron de solo EB100 (100% excretas bovinas) comparado con los demás ensayos, lo cual pudo confirmarse con el análisis estadístico con nivel de confianza del 5% entre todos los ensayos. En tabla 3 también se observa que todos los tratamientos fueron significativamente diferentes (letras diferentes), y se comprueba que el mejor tratamiento fue EB100 con $67.43 \text{ m}^3/\text{toneladas}$. Cabe señalar que, a pesar de que la producción de biogás fue baja en el tratamiento Vinaza 25 (25% vinaza: 75% EB), su potencial para generar energía es de $370 \text{ kWh}/\text{m}^3$ y $318,705.88 \text{ kcal}/\text{m}^3$ (tabla 3), esto de acuerdo con la relación de que 1 m^3 de biogás puede generar 7 Kw/h de energía y de la conversión de energía eléctrica a valores de energía de

calor (kcal/m³) (FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF, 2011). Dichos valores son de gran relevancia porque podría llevar a un ahorro significativo en la industria del mezcal, en el consumo de energía eléctrica o bien en el proceso de elaboración del mismo mezcal con ahorro en el consumo de gas LP. De esta forma, se le da un aprovechamiento adecuado al agave sin generar residuos y contribuyendo a disminuir los GEIs, además de generar biogás a partir de un proceso biotecnológico barato y energía asequible, cumpliendo con el objetivo de la agenda 2030.

Tabla 3. Producción de biogás a partir de la mezcla de la vinaza y las EB

Tratamientos	Biogás		Energía (kwh/m ³)	Poder calorífico (kcal/m ³)
	Biogás (mL)	Biogás (mL/gSV)		
EV100	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00	0.00	0.00
EB100	137.57±17.1 ^b	67.43±8.4	472.04	405954.41
V25	108.00±8.9 ^c	52.94±4.4	370.59	318705.88
V50	35.00±3.7 ^d	17.16±1.8	120.10	103284.31
V75	24.17±4.7 ^e	11.85±2.3	82.92	71315.36

Letras diferentes tienen una diferencia significativa de acuerdo con nivel de significancia del 5%.

CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado, se comprueba que la

vinaza proveniente del mezcal puede tener un efecto sinérgico con las EB, siempre y cuando no exceda el 25%, lo cual puede dar una disposición final adecuada de los residuos del racho El Cebú. No obstante, mayor concentración de vinaza (>25%) podría generar un efecto negativo y bajo rendimiento de biogás; por lo tanto, este estudio sugiere realizar una evaluación minuciosa utilizando la metodología de superficie de respuesta, con el fin de determinar con precisión la mejor combinación de ambos residuos y maximizar la producción de biogás. Así, el mezcal se puede generar de forma integral, es decir, se aprovecha al máximo toda la planta de agave, no se contamina al ambiente y cumplimos con el objetivo 7 de la agenda 2030 “Energía asequible y no contaminante”, en búsqueda de un desarrollo sostenible en la industria del mezcal, la industria ganadera en la región y en nuestro país.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar-Aguilar, F. A.; Nelson, D. L.; Pantoja, L. A.; Santos, A. S. (2017). Study of Anaerobic Co-digestion of Crude Glycerol and Swine Manure for the Production of Biogas Study of Anaerobic

- Co-digestion of Crude Glycerol and Swine Manure for the Production of Biogas. *Revista Virtual de Química*, 9(6).
<https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170142>
- American Public Health Association. (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA)*. (American Public Health Association Water Works Association, Ed.) (21st ed.). Washington, DC: 21st ed. American Water Environment Federation. Retrieved from <https://smww.aphapublications.org/>
- Aquino, F.S., Chernicharo C.A.L. Foresti E.Florêncio M.L.S., Monteggia, L. O. (2007). Metodologias para determinação da Atividade Metanogênica Específica (AME) em Lodos Anaeróbios. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 12(2), 192–201. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000200010>
- Astals, S., Batstone, D. J., Mata-Alvarez, J., & Jensen, P. D. (2014). Identification of synergistic impacts during anaerobic co-digestion of organic wastes. *Bioresource Technology*, 169, 421–427.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.024>
- Chavez-Parga, M. D. C., Pérez Hernández, E., & González Hernández, J. C. (2016). Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1).
<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552>
- Comino, E., Rosso, M., & Riggio, V. (2009). Development of a pilot scale anaerobic digester for biogas production from cow manure and whey mix. *Bioresource Technology*, 100(21), 5072–5078.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.059>
- Dennehy, C., Lawlor, P. G., Croize, T., Jiang, Y., Morrison, L., Gardiner, G. E., & Zhan, X. (2016). Synergism and effect of high initial volatile fatty acid concentrations during food waste and pig manure anaerobic co-digestion. *Waste Management*, 56, 173–180.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.032>
- Glanpracha, N., & Annachhatre, A. P. (2016). Anaerobic co-digestion of cyanide containing cassava pulp with pig manure. *Bioresource Technology*, 214, 112–121.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.079>

- Kafle, G. K., & Kim, S. H. (2013). Anaerobic treatment of apple waste with swine manure for biogas production: Batch and continuous operation. *Applied Energy*, *103*, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.018>
- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, *31*(8), 1737–1744. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- Labatut, R. A., Angenent, L. T., & Scott, N. R. (2011). Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Bioresource Technology*, *102*(3), 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.035>
- Lesteur, M., Bellon-Maurel, V., Gonzalez, C., Latrille, E., Roger, J. M., Junqua, G., & Steyer, J. P. (2010). Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review. *Process Biochemistry*, *45*(4), 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2009.11.018>
- López Velarde Santos, M., Rodríguez Valadéz, F. J., Mora Solís, V., González Nava, C., Cornejo Martell, A. J., & Hensel, O. (2017). Performance of a microbial fuel cell operated with vinasses using different cod concentrations. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, *33*(3), 521–528. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.03.14>
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *45*, 540–555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- OECD, & FAO. (2017). Meat. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025. Special Focus: Sub-Saharan Africa*. Retrieved from <https://data.oecd.org/agroutput/meat-consumption.htm>
- Panichnumsin, P., Nopharatana, A., Ahring, B., & Chaiprasert, P. (2010). Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure. *Biomass and Bioenergy*, *34*(8), 1117–1124. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.02.018>
- Puyol, D., Batstone, D. J., Hülsen, T., Astals, S., Peces, M., & Krömer, J. O. (2017). Resource recovery from wastewater by biological technologies:

- Opportunities, challenges, and prospects. *Frontiers in Microbiology*, 7(JAN), 1–23. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.02106>
- Rodriguez, A., & De la Cerna, C. (2017). El mezcal, su producción y tratamiento de residuos. *Alianzas y Tendencias*, 2(8), 10–14.
- Safari, M., Abdi, R., Adl, M., & Kafashan, J. (2018). Optimization of biogas productivity in lab-scale by response surface methodology. *Renewable Energy*, 118, 368–375. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.025>
- Secretaría de energía (SENER). Balance energético nacional en 2018. Consultado 14 de septiembre del 2020. <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&subAction=applyOptions>
- Shuba, E. S., & Kifle, D. (2018). Microalgae to biofuels: ‘Promising’ alternative and renewable energy, review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(April 2016), 743–755. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.042>
- States, U., Pischke, E. C., Solomon, B., Wellstead, A., Acevedo, A., Eastmond, A., Lucon, O. (2019). Energy Research & Social Science From Kyoto to Paris: Measuring renewable energy policy regimes in. *Energy Research & Social Science*, 50(November 2018), 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.11.010>
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., & Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928–7940. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>
- Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), 849–860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>