

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

Evaluación de Efluentes Industriales de Harina y Aceite de pescado para la producción de Biogás y metano en pruebas batch

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Paul Jhoedan Quispe Choquehuanca

Yoel Modesto Vargas Huamán

Asesor:

MSc. Rose Adeline Callata Chura

Juliaca, diciembre 2021

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS

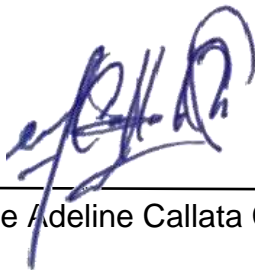
Rose Adeline Callata Chura, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EVALUACIÓN DE EFLUENTES INDUSTRIALES DE HARINA Y ACEITE DE PESCADO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y METANO EN PRUEBAS BATCH”** constituye la memoria que presentan los Bachilleres Paul Jhoedan Quispe Choquehuanca y Yoel Modesto Vargas Huamán para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 20 días del mes de diciembre del año 2021.



MSc. Rose Adeline Callata Chura



146

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 16 día(s) del mes de diciembre del año 2021, siendo las 12:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Ing. Enrique Mamani Guila, secretario: Msc. Juan Eduardo Vigo Rivera, el miembros: Msc. Mateo Alejandro Salinas Mena y los demás miembros: Msc. Rose Adeline Gallata Ghura y el asesor Msc. Rose Adeline Gallata Ghura

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Evaluación de afluentes Industriales de Harina y Aceite de pescado para la producción de Biogas y metano en pruebas batch

de el(los)/a(las) bachiller(es): a) Joel Modesto Vargas Huaman
b) Paul Thordon Quispe Choquehuanca

conducente a la obtención del título profesional de Ingeniería Ambiental
(Nombre del Título Profesional)

con mención en.....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)/las candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/a(las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Joel Modesto Vargas Huaman

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Líteral	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Buena</u>

Candidato (b): Paul Thordon Quispe Choquehuanca

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Líteral	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Buena</u>

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)/las candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente

Asesor

Candidato/a (a)

Miembro

Miembro

Candidato/a (b)

[Firma]
Secretario

Evaluación de Efluentes Industriales de Harina y Aceite de pescado para la producción de Biogás y metano en pruebas batch

RESUMEN

La industria de harina y aceite de pescado genera una gran cantidad de residuos con elevado contenido de materia orgánica el cual puede ser tratado mediante la digestión anaerobia (DA). En este estudio, se evaluó la producción de biogás/metano de dos residuos provenientes de la industria de harina y aceite de pescado, vía pruebas de Potencial Bioquímico de Metano. Los resultados muestran que los residuos provenientes de Chimbote (EPI1) y Chancay (EPI2) presentan una producción de biogás de 1.009 m³/kg SV-adicionado y 0.738 m³/kg SV-adicionado respectivamente. Además, la producción de metano en EPI1 es de 0.62 m³-CH₄/kg SV-adicionado y en EPI2 de 0.47 m³-CH₄/kg SV-adicionado. El proceso de DA en ambos residuos se realizó de manera estable, ya que los valores de pH y AGV/AT se mantuvieron dentro de los valores recomendados. Por ello, la presente investigación demuestra que los residuos de la industria de harina y aceite de pescado pueden ser usados eficientemente para la producción de biogás con un elevado contenido de metano.

Palabras Clave: Materia orgánica, biogás, metano, industria, harina, aceite, pescado.

ABSTRACT

The fishmeal and fish oil industry generates a large amount of waste with a high content of organic matter which can be treated by anaerobic digestion (AD). In this study, the production of biogas / methane from two residues from the fishmeal and fish oil industry was evaluated, via Biochemical Methane Potential tests. The results show that the waste from Chimbote (EPI1) and Chancay (EPI2) present a biogas production of 1,009 m³ / kg SV-added and 0.738 m³ / kg SV-added respectively. In addition, the methane production in EPI1 is 0.62 m³-CH₄ / kg SV-added and in EPI2 it is 0.47 m³-CH₄ / kg SV-added. The DA process in both residues was carried out in a stable manner, since the values of Ph and AGV / AT were kept within the recommended values. This research shows that waste from the fishmeal and fish oil industry can be used efficiently for the production of biogas with a high content of methane.

Key Words: Organic matter, biogas, methane, industry, flour, oil, fish.

1. INTRODUCCIÓN

Los residuos de la industria de harina y aceite de pescado se han vuelto un grave problema ambiental a nivel mundial, ya que debido al tipo de procesamiento y la especie del pescado pueden generar entre 20 a 80% de desechos Ivanovs et al. (2018). Los residuos de pescado son mezclados con las aguas residuales que genera la industria, lo que con lleva a que estos efluentes se caracterizan por el alto contenido de materia orgánica, que por sus características para su tratamiento sería necesario implementar procesos biológicos Alexandre et al. (2011). La producción de biogás a través de la Digestión Anaerobia (DA) podría ser una buena alternativa para este tipo de residuos. Además, Bücker et al. (2019) indican que existen investigaciones que demostraron que los desechos de pescado tienen un alto potencial para la producción de biogás mediante la técnica de la DA.

La DA es una tecnología de microorganismos que degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo digestato y biogás, compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) Ivanovs et al. (2018). El valor energético del biogás se encuentra en el contenido de CH_4 Zappi et al. (2019), por ello es necesario evaluar la producción de metano, el cual se logra mediante pruebas conocidas como Potencial Bioquímico de Metano (PBM). El PBM generalmente se define como el volumen de producción de metano (CH_4) por gramo de sustrato (SV), de la misma forma muestra la biodegradabilidad del sustrato (SV) y su potencial de producción de metano (CH_4) a través de la DA, lo que permite realizar una evaluación de la producción de biogás logrado por el proceso de DA Muzondiwa Jingura & Kamusoko (2017).

Investigaciones enfocadas en evaluar la producción de biogás y metano de residuos de pescado, especialmente residuos de la industria de harina y aceite de pescado son escasos. Bücker et al. (2020) utilizó residuos de la industria de procesamiento de pescado para evaluar la producción de biogás y metano. Sus experimentos mostraron producción de biogás de $0.54 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ para residuo de pescado y $0.43 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$ para residuo crudo de aceite de pescado la investigación realizada por Krishna Kafle, Hun Kim, & Ill Sung (2013) evaluaron la producción de biogás a partir del ensilaje de residuos industriales de pescado. Ellos obtuvieron valores de producción de metano en el rango de 0.44 a $0.76 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$. Además, se realizaron investigaciones con diferentes tipos de

residuos de pescado en donde se obtuvo valores de producción de metano, desde 0.012 m³CH₄/kg SV hasta 0.92 m³CH₄/kg SV, Ivanovs, Spalvins, & Blumberga (2018).

El objetivo principal de nuestra investigación fue evaluar la producción de biogás y metano de los efluentes industriales de harina y aceite de pescado a través de la DA. Para ello se determinó el potencial bioquímico de metano (PBM) en condiciones mesofílicas mediante la metodología de densidad de gases (GD-BMP) y finalmente se modeló el proceso de digestión anaerobia utilizando la ecuación modificada de Gompertz. También se determinó algunas características fisicoquímicas de los sustratos utilizados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1. Sustrato e inóculo

Los efluentes de pescado fueron obtenidos de dos industrias que elaboran harina y aceite de pescado en Perú, de industrias ubicados en Chimbote (EPI1) y Chancay (EPI2). Las muestras fueron colectadas en contenedores de 5L e inmediatamente congeladas a 4°C para ser transportadas al laboratorio para realizar los ensayos. El inóculo fue recolectado de una Planta de Tratamiento de aguas residuales Municipales en Cusco, Perú. Luego, fue transportado al laboratorio y pre-digerido a 30°C por una semana antes de ser usado como inóculo.

2.2. Ensayos PBM.

Los ensayos BMP se llevaron a cabo siguiendo la metodología propuesta por Angelidaki et al. (2009) y Holliger et al. (2016). Todas las pruebas fueron desarrolladas por triplicado en botellas de 120 ml de capacidad, con volumen de trabajo de 60 ml. Un blanco libre de sustrato fue incluido para medir la producción de metano endógena del inóculo. La relación inóculo – sustrato en base a los sólidos volátiles (SV) fue de 2. Después de agregar el inóculo y el sustrato en las botellas, el espacio de cabeza fue gaseado con N₂, luego cerrados con tapones de goma de butilo y sellados con agafes de aluminio para mantener condiciones anaeróbicas. Finalmente, todas las botellas se llevaron a incubar a 35°C. A intervalos de tiempo regular (24 o 48 horas), el volumen de biogás de cada botella.

La producción de biogás y metano fueron cuantificados por el método de densidad de gases (Gas Density Biochemical Potential Test, GD-BMP) (Justesen et al., 2019), con este método se puede obtener el volumen de biogás y la concentración de metano en el biogás (%CH₄). Para el desarrollo de las pruebas utilizando el método GD-BMP se utilizó una balanza analítica (SARTORIUS), con el propósito de medir la pérdida de peso de cada botella. Para la medición de la presión se utilizó un manómetro de agua en U. El volumen de biogás y metano fueron ajustados a condiciones normales (1 atm de presión y temperatura estándar de 0°C).

2.3. Métodos analíticos.

Sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), y pH fueron evaluados por triplicado de acuerdo con Standard Methods (American Public Health Association (APHA) et al., 2017). Por otro lado, Ácidos Grasos Volátiles (AGV), Alcalinidad total (AT) fueron cuantificados mediante el método titrimétrico (Jensen et al., 2011). Todos los tratamientos se analizaron al inicio y final de las pruebas. Los ST y SV fueron determinados por el método gravimétrico utilizando una estufa (BINDER, Alemania) y mufla (PROTHERM), en ambos casos se utilizó una balanza analítica (SARTORIUS). El AGV y AT eran determinados por el método titrimétrico, para la titulación se empleó las soluciones NaOH 0.1N y HCl 0.1N. El pH fue medido manualmente usando un potenciómetro de mesa (HORIBA).

2.4. Estudio cinético

Para este estudio se utilizó el modelo matemático de Gompertz modificado, mostrado en la Eq. (1). Este modelo fue aplicado a las curvas de producción acumulado de CH₄ para predecir el comportamiento de la DA.

$$P = P_o \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{R_o \cdot e}{P_o}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \quad \text{Eq.1}$$

Donde P es la producción acumulada de CH₄ específica (mL CH₄/g SV), P_o es el potencial máximo de CH₄ al final de la DA (mL CH₄/g SV), R_o es la tasa de producción

máxima de CH₄ (mL CH₄/g SV·d), λ es la fase de latencia (d), t es el tiempo de digestión (d) y e es igual a 2.71828.

3. RESULTADOS

3.1. Características fisicoquímicas del inoculo

El inoculo utilizado en las pruebas contiene 42.44 ± 0.30 g ST/kg y 18.95 ± 0.21 g SV/kg. Además, el contenido de pH, AGV, AT son 7.89, 760 ± 34.64 mg CH₃COOH/L y 4116 ± 57.74 mg CaCO₃/L respectivamente, estos valores están dentro del rango recomendado por Holliger et al. (2016), lo cual indica que el inoculo es de buena calidad para ser utilizado en las pruebas PBM.

3.2. Características fisicoquímicas del sustrato

Las características fisicoquímicas de las aguas residuales de la industria de harina y aceite de pescado recolectados en los 2 lugares se muestran en la tabla 1.

Se puede apreciar que el contenido de pH en EPI2 es menor, ligeramente ácido. El contenido de ST, SV y DQO en EPI2 eran ligeramente inferiores que en EPI1, esto indica que EPI2 tiene menos cantidad de materia orgánica disponible. El contenido de AGV en los dos residuos es similar, sin embargo, el contenido de AT difiere notablemente, siendo la de EPI1 mayor, en consecuencia, la capacidad buffer en dicho residuo es mejor.

3.3. Producción de biogás y metano

La producción acumulada de biogás de los dos residuos se muestra en la fig. 1. El periodo de experimentación duro hasta los 36 días, mostrando mayor producción para EPI1 ($1.009 \text{ m}^3/\text{kg SV-adicionado}$) y menor producción para EPI2 ($0.738 \text{ m}^3/\text{kg SV-adicionado}$). En la figura 2, se muestran los porcentajes (%) de CH₄ (a) y la producción de CH₄ acumulado (b) para cada uno de los residuos. El %CH₄ en EPI1 y EPI2 fueron similares, con valores de 62.35 ± 7.29 % y 63.23 ± 6.74 % respectivamente. Además, pudo observar que ambos sustratos presentaban, en varios puntos de la curva de

producción, un elevado contenido de metano, entre 70 – 75 %. resultando en producciones de CH₄ acumulado de 0.62 m³/kg SV-adicionado y 0.47 m³-CH₄/kg SV-adicionado para EPI1 y EPI2 respectivamente. Esto puede ser debido, a que los residuos de pescado, contienen elevado contenido de proteínas y lípidos, esto; según investigaciones realizadas por (Abdul Aziz et al., 2019) debido a que estos residuos frecuentemente producen biogás con un elevado contenido de metano (Bücker et al., 2020). Además, esto puede ser principalmente atribuido al elevado contenido orgánico, que esta expresado como SV/ST (Wu & Song, 2020) en la Tabla 1.

La producción de biogás y CH₄ obtenido en EPI2 es similar a los resultados obtenidos por otros estudios. Kafle et al. (2013) utilizo ensilajes de residuo de pescado para la producción de biogás, estos ensilajes fueron preparados mezclando residuos de pescado con desperdicios de pan y residuos de granos de cervecería. Después de 96 días, la producción de biogás y CH₄ estaban en el rango de 0.671 - 0.763 m³/kg SV y 0.441 - 0.482 m³/kg SV respectivamente. En los experimentos realizados por Bücker et al. (2020), la producción de CH₄ de residuos de pescado y residuo crudo de aceite de pescado fueron de 0.54 m³/kg SV y 0.426 m³/kg SV, respectivamente.

Del mismo modo, la producción de metano en EPI1 es comparable a los valores reportados en estudios previos. Vivekanand et al. (2018) evaluó la producción de CH₄ de tres tipos de residuos (ensilaje se pescado, estiércol y suero) los autores verificaron que el ensilaje de pescado tuvo mayor producción de CH₄ en comparación con los otros dos residuos, llegando a producir 0.691 m³/kg SV. Por otro lado, Wu & Song (2021) utilizo co-digestion de residuos de lodos activados y residuos de pescado, obteniendo la mayor producción de metano (0.683 m³/kg SV) con una mezcla del 3% de residuos de pescado.

El volumen de biogás y metano producidos en los experimentos indican que este tipo de residuos son una alternativa viable para ser utilizados mediante digestión anaerobia, además no requieren ningún tratamiento adicional para generar biogás con elevado contenido de CH₄. Esto se corrobora con los resultados obtenidos por otros autores quienes usan residuos similares a los residuos de pescado como sustrato en la DA (Bücker et al., 2020; Kafle et al., 2013; Velásquez Piñas et al., 2018; Vivekanand et al., 2018).

3.4. Estabilidad de degradación del proceso de DA.

El análisis de estabilidad de las pruebas PBM son llevados por medio de la capacidad buffer (relación AGV/AT) y el pH (Mendieta et al., 2020). La relación AGV/AT mostro poca variación en ambos residuos, como se muestra en la Fig. 3(a). Disminuyo de 0.32 a 0.26 para EPI1 y de 0.33 a 0.29 para EPI2, todos estos valores están dentro del rango aceptable (< 4) para que el proceso se desarrolló de manera estable (Li et al., 2018; Raposo et al., 2006). Mientras más bajo sea el valor de la relación AGV/AT la capacidad buffer es mayor, por consiguiente, el proceso de DA se desarrolla adecuadamente.

Al igual que la relación AGV/AT, el pH también mostro poca variación, (ver Fig 3(b)). En ambos residuos, el pH inicial estaba dentro del rango aceptable para la operación correcta de las poblaciones metanogénicas, 6 – 8.5 (Chandra et al., 2012). Al final de las pruebas PBM, el valor de pH aumento ligeramente en los 2 residuos, de 8.02 a 8.2 y de 7.98 a 8.19 para EPI1 y EPI2 respectivamente. Este aumento en el pH puede ser debido a la disminución en el contenido de AGV (Mao et al., 2017; Nazurally, 2018; Wu & Song, 2020).

El proceso de DA en los residuos estudiados es estable, no es necesario agregar ningún aditivo, realizar co-digestión o hacer algún tratamiento adicional, ya que los valores de la relación AGV/AT y el pH están dentro del rango recomendado para que el proceso se desarrolle adecuadamente sin efectos inhibitorios.

3.5. Modelación cinética

Modelos matemáticos pueden ser aplicados para caracterizar el desarrollo de la DA (El Achkar et al., 2017). Los datos experimentales de las pruebas PBM de los residuos utilizados en esta investigación fueron ajustados a la ecuación de Gompertz modificada. Los parámetros simulados se muestran en la fig. 4. El modelo probado revela que, el rendimiento de metano máximo simulado fue muy similar a los datos experimentales, lo que indica que el PBM experimental tanto de EPI1 y EPI2 encaja muy bien con el modelo de Gompertz modificada. Esto es apoyado por los elevados valores de R^2 , que se acercan a la unidad, cuyos valores son 0.998 para EPI1 y 0.991 para EPI2. Esto significa que el

modelo podría explicar más del 99% la variación total en los datos (Donoso-Bravo et al., 2010).

Las fases de latencia (λ) son 0.205 y 0.249 días para EPI1 y EPI2 respectivamente. La baja duración de la fase de latencia en ambos residuos indica que la materia orgánica es rápidamente consumida por la biomasa anaerobia (Donoso-Bravo et al., 2010) produciendo mayor cantidad de biogás y metano. Lo mencionado implica que la actividad metanogénica y la eficiencia de conversión de la materia orgánica a biogás se desarrolla adecuadamente (Mao et al., 2017). Por otra parte, la baja duración de las fases de latencia revela que el balance en el sistema entre proteínas, lípidos y carbohidratos es adecuado, debido a que la degradación de los carbohidratos es rápida, pero la degradación de lípidos y proteínas podrían requerir varios días o semanas (Kafle et al., 2013).

4. CONCLUSIÓN

Los efluentes de la industria de elaboración de aceite y harina de pescado son una alternativa interesante para la producción de biogás mediante DA, ya que el contenido de metano en el biogás es elevado. Obteniendo en EPI1 $0.62 \text{ m}^3\text{-CH}_4/\text{kg SV-adicionado}$ y en EPI2 $0.47 \text{ m}^3\text{-CH}_4/\text{kg SV-adicionado}$ con porcentajes de metano en el biogás de 62.35 ± 7.29 y 63.23 ± 6.74 % para EPI1 y EPI2 respectivamente. Además, el periodo de adaptación es corto, pues el proceso de DA se desarrolló de manera estable esto debido a que los valores de pH y relación AGV/AT se mantuvieron dentro de los valores recomendados por la literatura.

En base a los resultados obtenidos en este estudio, ambos residuos pueden ser recomendados como sustratos en el proceso de DA para la producción de biogás con elevado contenido de metano.

5. REFERENCIAS

- Abdul Aziz, N. I. H., Hanafiah, M. M., & Mohamed Ali, M. Y. (2019). Sustainable biogas production from agrowaste and effluents – A promising step for small-scale industry income. *Renewable Energy*, *132*, 363–369. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.149>
- Alexandre, V. M. F., Valente, A. M., Cammarota, M. C., & Freire, D. M. (2011). Performance of anaerobic bioreactor treating fish-processing plant wastewater pre-hydrolyzed with a solid enzyme pool. *Renewable Energy*, *36*(12), 3439-3444.
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), & Water Environment Federation (WEF). (2017). *Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed.*
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., & Van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, *59*(5), 927–934. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- Bücker, F., Marder, M., Peiter, M. R., Lehn, D. N., Esquerdo, V. M., Antonio de Almeida Pinto, L., & Konrad, O. (2020). Fish waste: An efficient alternative to biogas and methane production in an anaerobic mono-digestion system. *Renewable Energy*, *147*, 798–805. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.140>
- Chandra, R., Takeuchi, H., & Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(3), 1462–1476. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.035>
- Donoso-Bravo, A., Pérez-Elvira, S. I., & Fdz-Polanco, F. (2010). Application of simplified models for anaerobic biodegradability tests. Evaluation of pre-treatment processes. *Chemical Engineering Journal*, *160*(2), 607–614. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.03.082>
- El Achkar, J. H., Lendormi, T., Hobaika, Z., Salameh, D., Louka, N., Maroun, R. G., &

- Lanoisellé, J. L. (2017). Anaerobic digestion of nine varieties of grape pomace: Correlation between biochemical composition and methane production. *Biomass and Bioenergy*, 107(December 2016), 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.030>
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., De Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J. C., De Laclos, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515–2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- Ivanovs, K., Spalvins, K., & Blumberga, D. (2018). Approach for modelling anaerobic digestion processes of fish waste. *Energy Procedia*, 390 - 396. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.108>.
- Jensen, P. D., Ge, H., & Batstone, D. J. (2011). Assessing the role of biochemical methane potential tests in determining anaerobic degradability rate and extent. *Water Science and Technology*, 64(4), 880–886. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.662>
- Justesen, C. G., Astals, S., Mortensen, J. R., Thorsen, R., Koch, K., Weinrich, S., Triolo, J. M., & Hafner, S. D. (2019). Development and validation of a low-cost gas density method for measuring biochemical methane potential (BMP). *Water (Switzerland)*, 11(12), 0–17. <https://doi.org/10.3390/W11122431>
- Kafle, G. K., Kim, S. H., & Sung, K. I. (2013). Ensiling of fish industry waste for biogas production: A lab scale evaluation of biochemical methane potential (BMP) and kinetics. *Bioresource Technology*, 127, 326–336. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.032>
- Li, W., Khalid, H., Zhu, Z., Zhang, R., Liu, G., Chen, C., & Thorin, E. (2018). Methane production through anaerobic digestion: Participation and digestion characteristics of cellulose, hemicellulose and lignin. *Applied Energy*, 226(July), 1219–1228. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.055>
- Mao, C., Wang, X., Xi, J., Feng, Y., & Ren, G. (2017). Linkage of kinetic parameters with process parameters and operational conditions during anaerobic digestion.

Energy, 135, 352–360. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.050>

Mendieta, O., Madrigal, G., Castro, L., Rodríguez, J., & Escalante, H. (2020). Sugarcane scum as a novel substrate for rapid biogas production from the non-centrifugal cane sugar agribusiness sector in developing countries. *Bioresource Technology*, 297(October 2019), 122364. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122364>

Muzondiwa Jingura, R., & Kamusoko, R. (2017). Methods for determination of biomethane potential of feedstocks: a review. *Biofuel Research Journal*, 573-586. doi: 10.18331/BRJ2017.4.2.3

Nazurally, N. (2018). Anaerobic digestion of fish waste and seagrass/macroalgae: potential sustainable waste management for tropical Small Island Developing States. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(3), 1724–1735. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0738-1>

Raposo, F., Banks, C. J., Siegert, I., Heaven, S., & Borja, R. (2006). Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. *Process Biochemistry*, 41(6), 1444–1450. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.01.012>

Velásquez Piñas, J. A., Venturini, O. J., Silva Lora, E. E., & Calle Roalcaba, O. D. (2018). Technical assessment of mono-digestion and co-digestion systems for the production of biogas from anaerobic digestion in Brazil. *Renewable Energy*, 117, 447–458. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.085>

Vivekanand, V., Mulat, D. G., Eijsink, V. G. H., & Horn, S. J. (2018). Synergistic effects of anaerobic co-digestion of whey, manure and fish ensilage. *Bioresource Technology*, 249(September 2017), 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.169>

Wu, Y., & Song, K. (2020). Process performance of anaerobic co-digestion of waste activated sludge and aquaculture sludge. *Aquacultural Engineering*, 90(December 2019), 102090. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102090>

Wu, Y., & Song, K. (2021). Anaerobic co-digestion of waste activated sludge and fish

waste: Methane production performance and mechanism analysis. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123678>

ANEXOS

TABLAS Y FIGURAS

TABLA 1: caracterización fisicoquímica de los sustratos

PARÁMETRO	EPI1	EPI2	UNIDADES
Sólidos totales (ST)	245.85 ± 1.78	200.49 ± 3.19	g ST/kg
Sólidos volátiles (SV)	192.36 ± 0.9	174.90 ± 2.88	g SV/kg
	78.25 ± 0.74	87.23 ± 0.05	% ST
SV/ST	0.78	0.87	
Ácidos grasos volátiles (AGV)	5790 ± 212.13	5500 ± 34.64	mg CH ₃ COOH/L
Alcalinidad total (AT)	5875 ± 247	5100 ± 86.6	mg CaCO ₃ /L
pH	6.37	5.92	
Capacidad buffer (AGV/AT)	0.99 ± 0.01	1.08 ± 0.02	mg CH ₃ COOH/ mg CaCO ₃
Demanda Química de oxígeno (DQO)	61.84 ± 0.62	57.32 ± 1.13	g/L
Contenido de humedad	75.42 ± 0.18	80.46 ± 0.91	%

FIGURA 1: PRODUCCIÓN ACUMULADA DE BIOGÁS

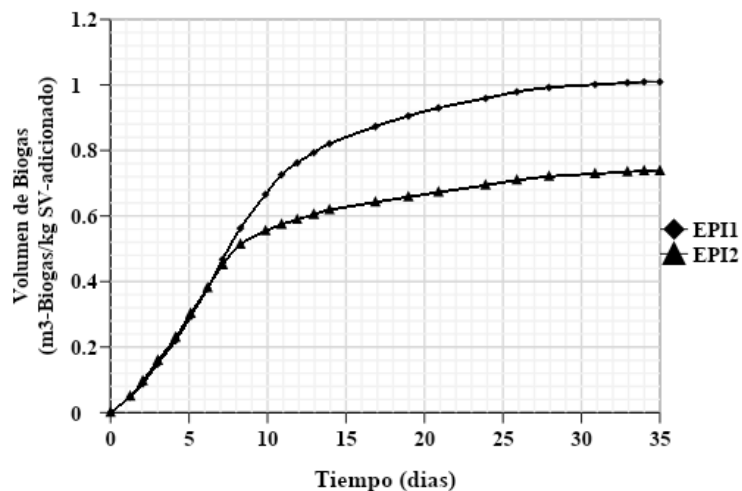


FIGURA 2: PRODUCCIÓN DE METANO Y PORCENTAJE DE METANO

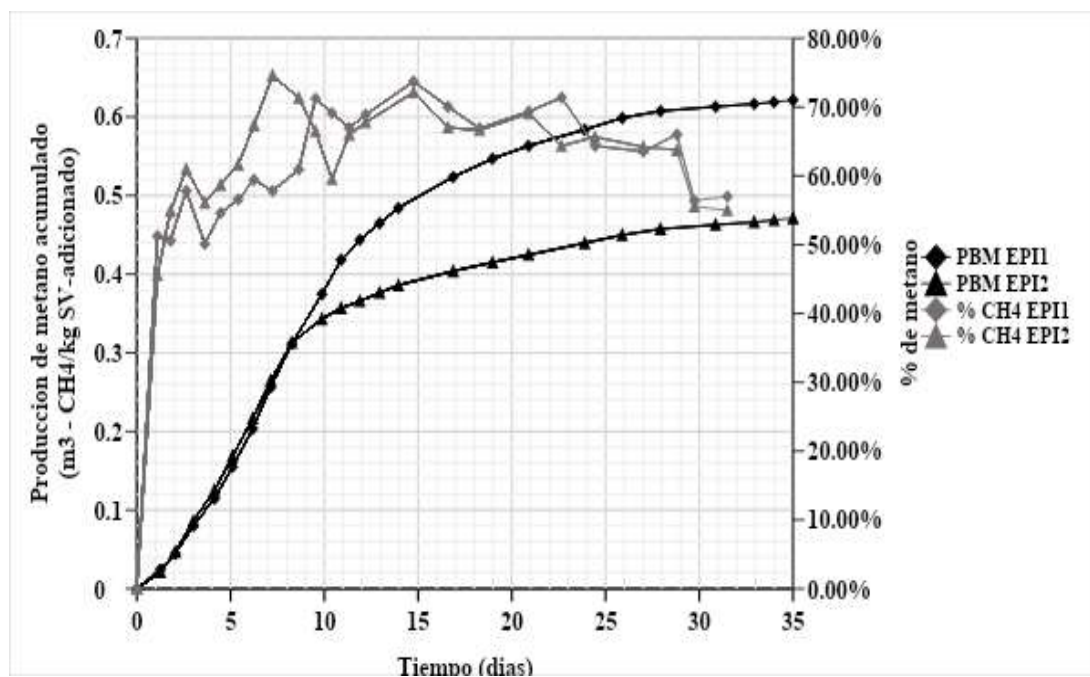


FIGURA 3 a, b: AGV/AT (a), pH (b), con límites de inhibición.

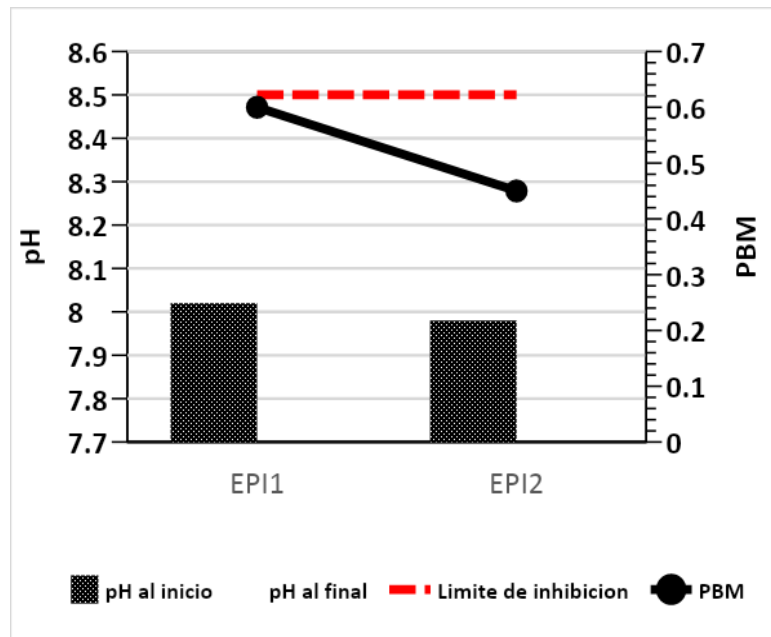
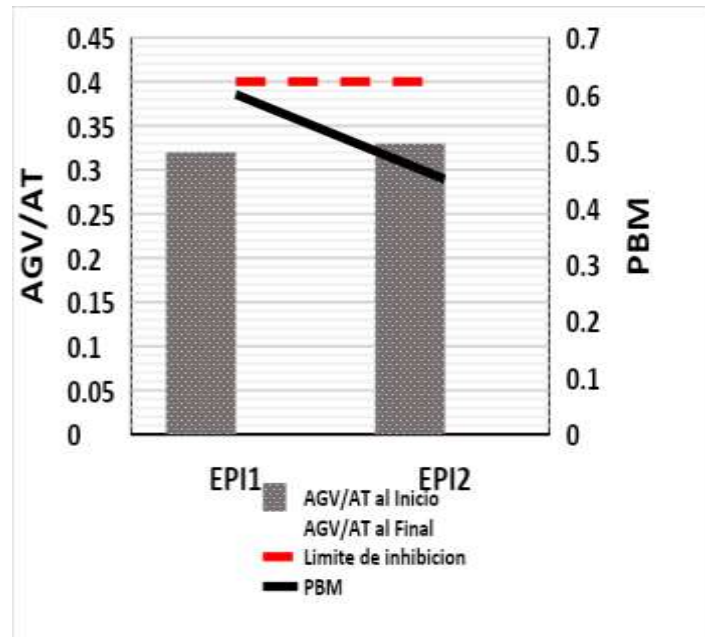


FIGURA 4: ajuste del modelo cinético y PBM

