

# Modelado y simulación de la digestión anaerobia de residuos de la planta de plátano para la producción de biogás

García-Alonso M. E.\* Moguel-Castañeda J. G.\*\* Morales-Cabrera M. A.\*  
Hernández-Martínez E.\*

\*Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Xalapa Veracruz, México.

(e-mail: marga110297@gmail.com; elisehernandez@uv.mx)

\*\*Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, México, D.F. 02200. (e-mail: jazael\_moguel@hotmail.com)

---

**Abstract:** In this work, a mathematical model of anaerobic digestion (AD) that considers the main stages of the process (i.e., hydrolysis, acidogenesis-acetogenesis and methanogenesis) is evaluated. The degradation of different substrate variations belonging to different parts of the banana plant (i.e., pseudostem and peel) was analyzed. The results showed that the model is able to adapt to each substrate predicting the dynamic behavior of classical process variables such as COD, VFA and biogas production. The coefficients of determination obtained were  $R^2 > 0.8$  for the case studies. A parametric sensitivity analysis was also proposed to evaluate different operating conditions. For this, variations in the initial substrate and VFA concentrations were considered. The operating region where substrate degradation is favored, and biogas production is maximized.

*Palabras clave:* Digestión anaerobia, modelado matemático, residuos de plátano.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El plátano es un producto alimenticio de gran consumo a nivel mundial. México es considerado el doceavo productor a nivel mundial, así mismo, dentro del país es el tercer producto más importante en cuanto a frutos (SIAP, 2020). Donde su cultivo transporte y comercialización genera grandes volúmenes de residuos. Actualmente los residuos de plátano no tienen la gestión correcta, ya que por lo general se arrojan en vertederos sin tratamiento o se queman al aire libre. Se han propuesto alternativas como usarlo de alimentación de distintos animales o procesarlo para crear biofertilizantes (Pathak, 2016). Sin embargo, estas alternativas no son del todo utilizadas y en la mayoría de las aplicaciones no se explotan todas las propiedades de los residuos. Por lo que, es necesario otras alternativas para su tratamiento. La digestión anaerobia (DA) es una opción atractiva que no solo permite la degradación de la materia orgánica, sino también genera biogás rico en metano.

La DA es una tecnología aplicable a los residuos de plátano por su alta carga orgánica. Sin embargo, para que esta sea una alternativa viable se deben conocer las condiciones de operación, lo que generalmente se realiza mediante un diseño experimental. Esto lleva a la elaboración de múltiples combinaciones de pruebas experimentales para encontrar condiciones de operación que mejoren la estabilidad del proceso, así como favorecer la tasa de degradación e incrementar la producción de metano. Las pruebas experimentales requieren de instrumentos de medición, recursos de espacio y tiempo, por lo que el estudio y análisis de la DA se vuelve complicado y costoso.

Una alternativa para el estudio de la DA es través del modelado matemático siendo una herramienta que permite complementar el trabajo experimental, reduciendo

significativamente el tiempo de realización y el impacto económico del mismo. Además, los análisis mediante modelos matemáticos permiten identificar los compuestos y etapas más relevantes en el proceso, evaluar los parámetros que intervienen para propuestas de optimización y control (Donoso-Bravo et al., 2011; Fedailaine et al., 2015). Existen modelos simples para la DA aplicados a residuos de plátano basados en modelos de primer orden, modelos de Gompertz y/o los modelos logísticos, que se han aplicado a diferentes residuos de plátano. Por ejemplo, Pavithra & Rajendran (2015) implementaron un modelo cinético de primer orden para la aproximación de concentración de biogás para el tallo de plátano a partir de un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales. Mientras que Thair-Khan et al. (2016) lo implementaron para tallo, cáscara, pulpa y plátano completo con cáscara, obteniendo buenos resultados solo para el tallo.

Más adelante, Kerubo-Oyaro et al. (2021) emplearon un modelo de primer orden, de Gompertz modificado y uno logístico para hoja, tallo y pedúnculo, donde el modelo de Gompertz fue el más adecuado para los tres residuos de plátano. Estos modelos son simples y requieren poca información, sin embargo, no han sido adaptados a todos los residuos de plátano debido a su complejidad y variabilidad. Además, la mayoría solo considera la producción de metano.

Por otro lado, existen modelos que consideran más información del proceso como el ADM1, ya que contempla numerosos fenómenos dentro de la DA. Por ejemplo, Taruyanon & Tejasen (2010) utilizan el modelo ADM1 para el tratamiento de aguas residuales provenientes de un proceso de destilación de etanol. Los resultados de la simulación se compararon con el tratamiento anaeróbico de dos etapas a escala laboratorio obteniendo una precisión razonable del comportamiento dinámico. Más tarde Hernández-Sarabia & Delgadillo (2011) lo modificaron para aguas residuales

vinícolas y residuos sólidos entre los que se encontraban papa, café y arroz. Encontrando que el modelo es eficiente para describir el proceso biológico para diferentes tipos de biorreactores. La aplicación del modelo ADM1 representa un reto debido a la gran información que se requiere, además de su complejidad, por lo que modificarlo y ajustarlo a diferentes residuos puede ser muy difícil. Además, los residuos de plátano al ser un sustrato de composición variable por las diferentes partes que lo componen (e. g., tallo, las hojas, la cáscara, la pulpa del fruto) genera un reto aún mayor.

Por otro lado, se encuentran los modelos no estructurados que se caracterizan por ser robustos y fácilmente de aplicar, por ejemplo, Moguel-Castañeda et al. (2020) describen el comportamiento dinámico de las variables clave de la DA de vinazas de tequila, como son DQO (Demanda Química de Oxígeno), AGV's (Ácidos Grasos Volátiles) y producción acumulada de metano; considerando hidrólisis, acidogénesis-acetogénesis y metanogénesis. Sus resultados mostraron un seguimiento adecuado para diferentes condiciones de pH y temperatura. Por lo que, en el presente trabajo se propone la aplicación de un modelo matemático no estructurado considerando las etapas más importantes de la DA y diferentes partes del plátano. Para ello se emplearon dos casos de estudio, un proceso de la degradación de pseudotallo y otro de la cáscara de plátano, donde se realizó la estimación paramétrica para cada uno y posteriormente el análisis de sensibilidad con variaciones de condiciones iniciales para encontrar rangos de factibilidad para la generación de metano.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Modelo matemático

Para la descripción del proceso de DA de los residuos de plátano se plantea el modelo de DA propuesto por Moguel-Castañeda et al. (2020) que considera hidrólisis, acidogénesis-acetogénesis y metanogénesis en operación por lotes. Las reacciones correspondientes a cada etapa se describen como sigue



donde  $S_1$  son los compuestos de cadena larga, carbohidratos, proteínas y lípidos,  $X_h$  es la biomasa hidrolítica,  $S_2$  son los compuestos orgánicos simples, glúcidos y aminoácidos,  $X_a$  es la biomasa acidogénica,  $A$  corresponde a los ácidos grasos volátiles (AGV),  $X_m$  es la biomasa metanogénica y  $CH_4$  corresponde a la producción de metano.

Los cambios dinámicos de la etapa hidrolítica, es decir, el consumo de  $S_1$ , producción y consumo de  $S_2$  y crecimiento de la biomasa se describe como sigue,

$$\frac{dS_1}{dt} = -\frac{\mu_h X_h}{Y_{X_h/S_1}} \quad (4)$$

$$\frac{dX_h}{dt} = \mu_h X_h - k_{d_h} X_h \quad (5)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = \mu_h X_h Y_{S_2/X_h} - \frac{\mu_a X_a}{Y_{X_a/S_2}} \quad (6)$$

donde  $\mu_h$  es la tasa de crecimiento de las bacterias hidrolíticas y  $Y_{X_h/S_1}$  es el coeficiente de rendimiento de la biomasa hidrolítica con relación al consumo de  $S_1$ ,  $k_{d_h}$  es la constante de muerte de las bacterias hidrolíticas,  $Y_{S_2/X_h}$  es el coeficiente de rendimiento de producción de  $S_2$ ,  $\mu_a$  es la tasa de crecimiento de bacterias acidogénicas representada por una cinética de tipo Monod y  $Y_{X_a/S_2}$  es el coeficiente de rendimiento de consumo de  $S_2$ .

Los cambios dinámicos de la etapa acidogénica-acetogénica, es decir, la producción y consumo de  $A$  y el crecimiento de la biomasa describe como sigue,

$$\frac{dX_a}{dt} = \mu_a X_a - k_{d_a} X_a \quad (7)$$

$$\frac{dA}{dt} = \mu_a X_a Y_{A/X_a} - \frac{\mu_m X_m}{Y_{X_m/A}} \quad (8)$$

donde  $k_{d_a}$  es la constante de muerte de bacterias,  $Y_{A/X_a}$  es el coeficiente de rendimiento de la producción de  $A$  por bacterias acidogénicas,  $\mu_m$  es la tasa de crecimiento de bacterias metanogénicas y  $Y_{X_m/A}$  corresponde al coeficiente de rendimiento del consumo de  $A$  por bacterias metanogénicas.

Finalmente, los cambios dinámicos de la etapa metanogénica, es decir, el consumo de  $A$ , producción de  $CH_4$  y crecimiento de la biomasa describe como sigue,

$$\frac{dX_m}{dt} = \mu_m X_m - k_{d_m} X_m \quad (9)$$

$$\frac{dCH_4}{dt} = \mu_m X_m Y_{CH_4/X_m} \quad (10)$$

donde  $k_{d_m}$  es la constante de muerte de bacterias metanogénicas,  $Y_{CH_4/X_m}$  corresponde al coeficiente de rendimiento de la producción de metano por la biomasa metanogénica.

La tasa de crecimiento de las bacterias hidrolíticas sigue una cinética de primer orden  $\mu_h = k_h S_1$ , mientras que, la tasa de crecimiento de las bacterias acidogénicas se puede representar por una cinética de Monod, tal que

$$\mu_a = \frac{\mu_{\max_a} S_2}{k_{S_2} + S_2} \quad (11)$$

donde  $\mu_{\max_a}$  corresponde a la tasa de crecimiento máxima y  $k_{S_2}$  a la constante de saturación. Por otro lado, la tasa de crecimiento de las bacterias metanogénicas se describe mediante una cinética de tipo Haldane, tal que

$$\mu_m = \frac{\mu_{\max_m} A}{k_A + A + \frac{A^2}{K_I}} \quad (12)$$

donde  $\mu_{\max_m}$  es la tasa de crecimiento máxima,  $k_A$  es la constante de saturación y  $K_I$  es la constante de inhibición.

## 2.2 Estimación paramétrica

La determinación de los parámetros del modelo descrito por las Ecs. (1-12), se realiza mediante mínimos cuadrados no lineales usando el algoritmo de Levenberg-Marquardt implementado en el software Matlab® 2022a. Mientras que, la solución del sistema de ecuaciones diferenciales se realizó mediante el método de Runge-Kutta.

## 2.3 Datos experimentales

Para validar el modelo propuesto, se consideraron dos casos de estudio de residuos de la planta plátano, considerando datos experimentales reportados en la literatura, i) pseudotallos de la planta de plátano con y sin pretratamiento (Pan et al., 2020), y ii) codigestión de cáscaras de plátano con lirio acuático, para cuatro configuraciones de mezcla (Barua et al. 2019). La Tabla 1 muestra las mezclas usadas.

**Tabla 1. Mezclas de lirio acuático y cáscara de plátano (Barua et al. 2019).**

Mezcla	Lirio acuático (g)	Cáscara de plátano (g)	Estiércol de vaca (g)
1	47	187	50
2	36	146	50
3	30	121	50
4	26	104	50

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 DA de pseudotallos de plátano

En las Figuras 1 y 2 se muestran los perfiles dinámicos obtenidos con el modelo propuesto comparados con los datos

experimentales reportados por Pan et al., (2020). Se observa que las tendencias de las variables clave (i.e., DQO, AGV y CH<sub>4</sub>) son correspondientes con los datos experimentales, alcanzando coeficientes de determinación aceptables (0.9 para los perfiles de DQO y CH<sub>4</sub>, y 0.7 para los AGV). Nótese que, el perfil de AGV es el que exhibe menor correlación, debido a la complejidad inherente de la etapa acidogénica-acetogénica. El modelo considera la concentración total de los ácidos formados, sin considerar la generación individual de cada ácido y su ruta de reacción. A pesar de ello, es posible observar que el modelo puede predecir tendencia que se observa en los datos experimentales.

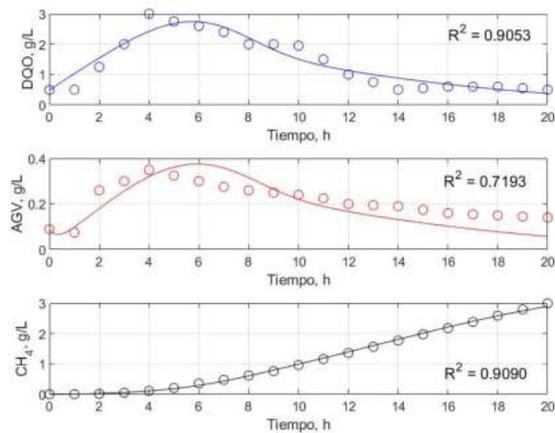


Figura 1. Ajuste paramétrico de la DA de pseudotallos de plátano exprimidos.

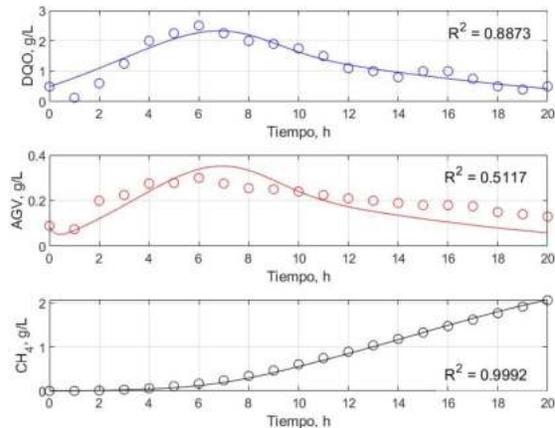


Figura 2. Ajuste paramétrico de la DA de pseudotallos de plátano sin exprimir

En la Tabla 2 se muestran los parámetros obtenidos en la estimación paramétrica.

**Tabla 2. Parámetros de la DA de pseudotallos de plátano**

Parámetro	Pseudotallos exprimidos	Pseudotallos sin exprimir

$\mu_{\max_a}$	0.2342	1.0797
$\mu_{\max_m}$	22.5570	4.4862
$k_h$	0.2246	0.6437
$k_{S_2}$	0.8450	5.7363
$k_A$	35.7821	5.5764
$Y_{x_h/S_1}$	10.1794	27.7406
$Y_{x_a/S_a}$	2.7842	31.5705
$Y_{x_m/A}$	0.5675	0.0249
$Y_{CH_4/x_m}$	0.4621	0.2484
$Y_{S_2/x_h}$	30.8715	4.6631
$Y_{x_a/S_2}$	0.1565	0.4097

### 3.1.1 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realiza sobre las condiciones iniciales, considerando la variación de los valores iniciales de  $S_1$  y  $S_2$ . La Figura 3 muestra los cambios de la DQO respecto al variaciones del sustrato. Como referencia, se considera la concentración de sustrato inicial de los pseudotallos que tuvieron pretratamiento (0.5 g/L), observando que, a mayor cantidad de sustrato añadido, incrementa la concentración de la DQO, lo cual permite incrementar la generación de  $CH_4$ .

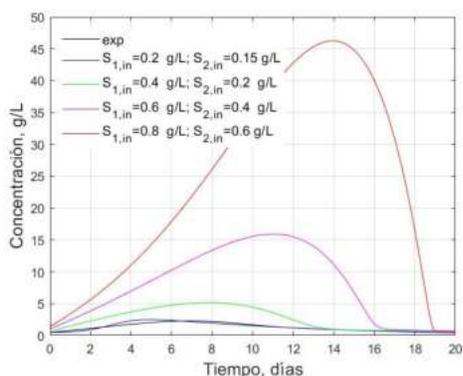


Figura 3. Análisis de sensibilidad en la variable DQO.

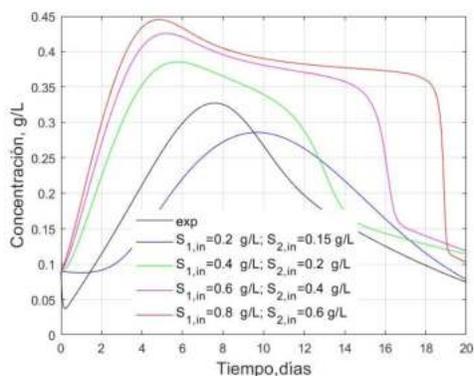


Figura 4. Análisis de sensibilidad en la variable AGV's.

Los perfiles de AGV muestran un punto máximo de concentración en el día 6 y a mayor adición de sustrato inicial se llega a este punto en menor tiempo (Figura 4). Este incremento en la generación AGV es debido a la alta carga orgánica introducida, sin embargo, puede ocasionar problemas de inhibición por la acumulación de AGV.

En el perfil de producción de metano se puede corroborar que, a mayor cantidad de sustrato inicial, incrementa la producción de AGV, y consecuentemente se genera un mayor rendimiento de metano.

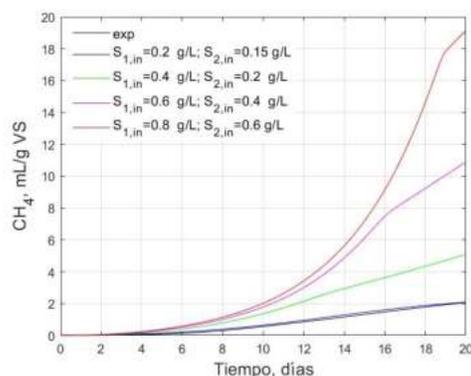


Figura 5. Análisis de sensibilidad en la variable  $CH_4$ .

### 3.2 Codigestión de cáscaras de plátano con lirio acuático

En las Figuras 6–8 se muestra la simulación del modelo propuesto para cada mezcla evaluada por Barua et al. (2019). Los parámetros obtenidos mediante la estimación paramétrica se reportan en la Tabla 3 y se observa que el ajuste del caso 3 tiene la mejor correlación.

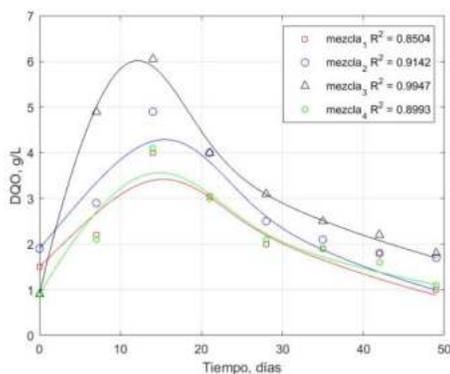


Figura 6. Ajuste paramétrico DQO en cuatro mezclas de codigestión de cáscara de plátano con lirio acuático.

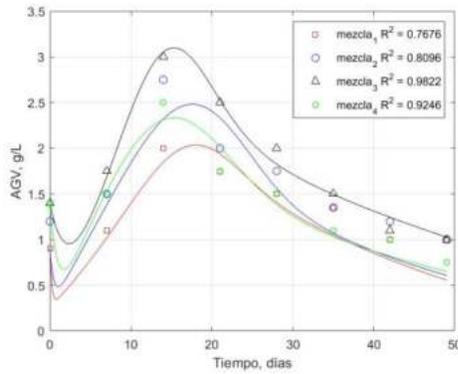


Figura 7. Ajuste paramétrico de AGV para las cuatro mezclas de la codigestión de cáscara de plátano con lirio acuático.

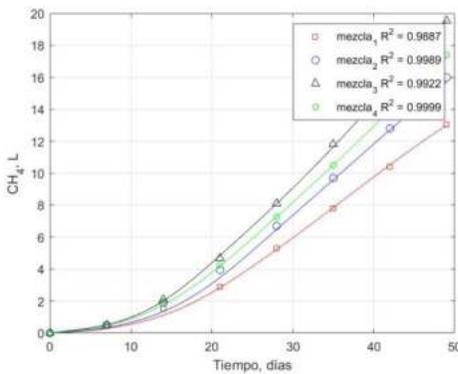


Figura 8. Ajuste paramétrico de CH<sub>4</sub> para las cuatro mezclas de la codigestión de cáscara de plátano con lirio acuático

**Tabla 3. Parámetros obtenidos para codigestión**

Parámetro	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4
$\mu_{max_a}$	0.6060	0.4022	0.5177	0.5273
$\mu_{max_m}$	0.5807	0.4856	1.6885	0.6255
$k_h$	0.0657	0.0524	0.0888	0.0901
$k_{S_2}$	13.466	11.754	25.508	17.064
$k_A$	13.685	11.679	63.903	15.261
$Y_{x_h/s_1}$	5.6824	3.9349	8.2793	7.1706
$Y_{x_m/s_2}$	138.28	106.97	23.156	72.953
$Y_{x_m/A}$	0.0047	0.0092	0.0348	0.0174
$Y_{CH_4/x_m}$	2.9074	2.6480	4.3621	2.9785
$Y_{s_2/x_h}$	8.4310	14.307	46.808	19.070
$Y_{x_m/s_2}$	0.2154	0.1813	0.0623	0.1316

### 3.2.1 Análisis de sensibilidad para la codigestión de cáscaras de plátano y lirio acuático

El análisis de sensibilidad se realiza sobre las condiciones iniciales la concentración de AGV, debido a que la concentración inicial de AGV es distinta para cada residuo de plátano.

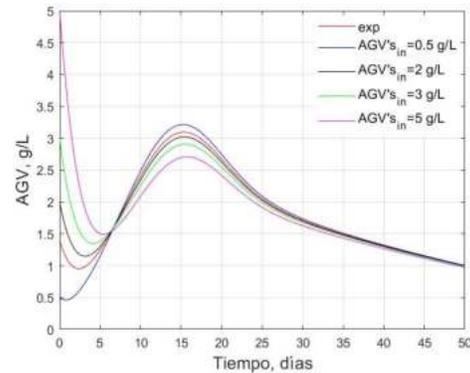


Figura 9. Análisis de sensibilidad de AGV para codigestión.

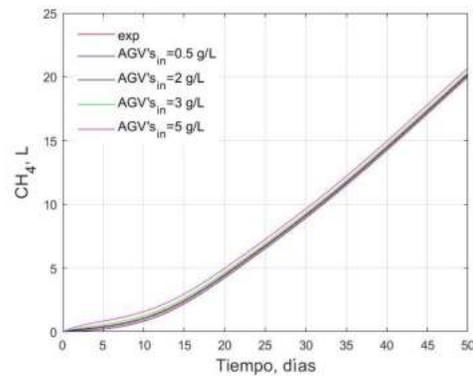


Figura 10. Análisis de sensibilidad de CH<sub>4</sub> para codigestión.

En la Figura 9 y 10 se observa la variación y comportamiento de los AGV. El caso 1 con una concentración de 0.5 g/L presentó el punto máximo de concentración en comparación con los otros casos. El caso 4, a pesar de tener la concentración inicial mayor, tiene un punto máximo de producción de AGV más pequeño y todos los casos tienden a un mismo valor en el rango de 30 – 40 días. El comportamiento dinámico de los AGV para las diferentes cantidades iniciales es el mismo, ya que, al no variar las cantidades iniciales de sustrato, no se tiene una sobrecarga orgánica y no se tiene un exceso de AGV.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un modelo matemático simple y flexible que permite describir la digestión anaerobia de diferentes residuos de la planta de plátano. El modelo propuesto se evalúa considerando el pseudotallo de la planta de plátano y la cáscara del fruto. El modelo se ajustó adecuadamente a los datos experimentales y el análisis de sensibilidad mostró los cambios que podrían presentarse frente a cambios en las condiciones iniciales de las variables clave

del proceso (i.e., sustrato y AGV inicial). Se identificaron las condiciones para aumentar el rendimiento del proceso en los sustratos evaluados.

## REFERENCIAS

- Barua, V. B., Rathore, V., & Kalamdhad, A. S. (2019). Anaerobic co-digestion of water hyacinth and banana peels with and without thermal pretreatment. *Renewable Energy*, 134, 103-112.
- Donoso-Bravo, A., Mailier, J., Martin, C., Rodríguez, J., Aceves-Lara, C. A., & Wouwer, A. V. (2011). Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: a review. *Water research*, 45(17), 5347- 5364
- Fedailaine, M., Moussi, K., Khitous, M., Abada, S., Saber, M., & Tirichine, N. (2015). Modeling of the anaerobic digestion of organic waste for biogas production. *Procedia Computer Science*, 52, 730-737.
- Hernández Sarabia, M. & Delgadillo L. R. M. (2011). Aplicación del modelo ADM1 en la digestión anaerobia de aguas residuales y desechos sólidos. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 1(6).
- Kerubo Oyaro, D. K., Isaboke Oonge, Z., & Meshak Odira, P. (2021). Kinetic Modelling of Methane Production from Anaerobic Digestion of Banana Wastes. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 10 (03), 104-109
- Pan, S., Chi, Y., Zhou, L., Li, Z., Du, L., & Wei, Y. (2020). Evaluation of squeezing pretreatment for improving methane production from fresh banana pseudo-stems. *Waste Management*, 102, 900-908.
- Servicio de Información Agroalimentario y Pesquera (SIAP). 2020. "Panorama Agroalimentario 2020". Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. Gobierno Federal. México.
- Pathak, P. D., Mandavgane, S. A., & Kulkarni, B. D. (2016). Valorization of banana peel: a biorefinery approach. *Reviews in Chemical Engineering*, 32(6), 651-666.
- Pavithra, S., & Rajendran, L. (2015). Approximate Analytical Expression of Concentrations in a Kinetic Model for Biogas Generation from Banana Waste. *Applied Mathematics*, 5(1), 7-14.
- Moguel-Castañeda, J. G., Puebla, H., Méndez-Acosta, H. O., & Hernandez-Martinez, E. (2020). Modeling pH and temperature effects on the anaerobic treatment of tequila vinasses. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 95(7), 1953-1961.
- Taruyanon, K., & Tejasen, S. (2010). Modelling of two-stage anaerobic treating wastewater from a molasses-based ethanol distillery with the IWA anaerobic digestion model no. 1. *Engineering Journal*, 14(1), 25-36
- Thair Khan, M., Brulé, M., Maurer, C., Argyropoulos, D., Müller, J., & Oechsner, H. (2016). Batch anaerobic digestion of banana waste-energy potential and modelling of methane production kinetics. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 18(1), 110-128