



Modelación matemática de la producción de biogás mediante digestión anaeróbica de lodos de aguas residuales de distintas actividades económicas

Félix Tejera¹, Euclides Deago¹, Marian Ramírez¹

¹Universidad Tecnológica de Panamá

INTRODUCCIÓN

Los lodos orgánicos son el resultado de operaciones y procesos unitarios llevados a cabo en el tratamiento de aguas residuales. La disposición de estos puede representar más de la mitad del costo de operación de las plantas de tratamientos de aguas residuales [1]. Antes de realizar la disposición de los lodos, estos deben pasar a través de un tratamiento, ya que estos contienen altas cantidades de patógenos que afectan el medio ambiente. Uno de los métodos más eficientes para el tratado de lodos provenientes de agua residuales es la digestión anaeróbica, ya que requiere menor inversión inicial y gasto operacional; además permite la obtención de biogás que puede ser utilizado luego para satisfacer en cierta medida las necesidades de energía eléctrica de una región [2].

Los procesos que se llevan a cabo durante la digestión anaeróbica son influenciados por varios factores, por eso se recomienda estudiar el proceso aplicando modelos matemáticos cinéticos. Los modelos matemáticos son una herramienta de gran ayuda durante los estudios de digestión anaeróbica. A través de las décadas se han utilizado una variedad de modelos con una gran varianza entre resultados incluso bajo las mismas condiciones experimentales [3].

En este estudio se evalúa la modelación matemática de la producción de biogás producido de distintas actividades económicas a la misma temperatura. Las actividades estudiadas son: Municipal (espesado y digerido), hotelero, avícola e industrial a una temperatura de 25°C.

METODOLOGÍA

a) Recolección de información

Para la realización de este estudio se recolectaron los datos del trabajo realizado por Ramírez, Tejedor & Deago [4], quienes llevaron a cabo la caracterización de los lodos residuales provenientes de PTAR de distintas actividades económicas. Las actividades fueron: Municipal, hotelero, comercial y avícola. Luego de la caracterización, se procedió a los ensayos de digestividad, donde se utilizó el sistema Oxitop, que es capaz de registrar el cambio en las presiones de gas generados por la digestión anaeróbica. Los ensayos se realizaron a una temperatura de 25°C para todas las actividades, además se mantuvieron en agitación constante por 30 días. El contenido de metano en el biogás se obtuvo mediante las ecuaciones basadas en la Ley de los Gases, utilizadas en las investigaciones de Chernicharo et al. [5].

b) Estudio cinético

Para el estudio de la digestión anaeróbica, existen varios modelos que pueden utilizarse dependiendo de los parámetros que hayamos obtenido en el análisis de laboratorio. Para este estudio, se utilizaron el modelo modificado de Gompertz (Eq. 1), el modelo de función logística (Eq. 2) y el modelo de función de transferencia (Eq. 3).

Los tres modelos describen la producción acumulada de biogás de los reactores Batch, asumiendo que la producción de biogás es una función del crecimiento bacteriano, donde 'C' es el acumulado de biogás producido (ml) en el tiempo 't' (días), 'P' es el potencial de producción de biogás (ml), 'R' es tasa máxima de producción de biogás (ml.h⁻¹) y 'λ' es la duración de la fase de retraso (días) [6]. Cada parámetro cinético fue determinado empleando el análisis de regresión no lineal de mínimos cuadrados con la ayuda del programa Matlab R2020b. Se calcularon los indicadores estadísticos de coeficiente de determinación (R²) y el error cuadrático medio (RMSE) para validar la precisión de los modelos.

$$C = P * \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R * \exp(\lambda)}{P} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

$$C = \frac{P}{1 + \exp \left[4R \left(\frac{t}{P} - 1 \right)^2 \right]} \quad (2)$$

$$C = P \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{R}{P} (\lambda - t) \right] \right\} \quad (3)$$

ANÁLISIS DE RESULTADOS

a) Modelo modificado de Gompertz

En la tabla 1 se muestran los resultados de la estimación de parámetros cinéticos y estadísticos utilizando el modelo modificado de Gompertz. Se encontró que el valor del potencial de producción de biogás (P) fue de 175.50ml para el lodo espesado, 336.50ml para el lodo digerido, 6.04ml para el lodo avícola, 89.04 para el lodo comercial y 5.55ml para el lodo hotelero. La duración de la fase de retraso (λ) estimada fue de 2.07 días para el lodo espesado, 4.15 días para el lodo digerido, 0.00 días para el lodo avícola, 16.40 para el lodo comercial y 15.42 días para el lodo hotelero. En la figura 1 se comparan los datos experimentales vs los obtenidos por el modelo. En cuanto a los parámetros cinéticos, se obtuvo un coeficiente de correlación (R²) de 0.9962 para el lodo espesado, 0.9929 para el lodo digerido, 0.9952 para el lodo avícola, 0.9999 para el lodo comercial y 0.9998 para el lodo hotelero. El error cuadrático medio (RMSE) presentó valores de 2.62 para el lodo espesado, 3.33 para el lodo digerido, 0.09 para el lodo avícola, 0.09 para el lodo comercial y 0.01 para el lodo hotelero. Los valores obtenidos para los parámetros cinéticos indican que el modelo modificado de Gompertz se ajusta bien a los datos experimentales.

Tabla 1. Parámetros cinéticos estadísticos determinados utilizando el modelo modificado de Gompertz

MODELO	GOMPERTZ MODIFICADO				
PARÁMETROS	P (ml)	R (ml.días ⁻¹)	λ (días)	R ²	RMSE
ESPESADO	175.5	5.13	2.07	0.9962	2.62
DIGERIDO	336.5	5.073	4.15	0.9929	3.23
AVICOLA	6.04	0.1623	0.00	0.9952	0.09
COMERCIAL	89.04	1.809	16.40	0.9999	0.09
HOTELERO	5.552	0.1092	15.42	0.9998	0.01

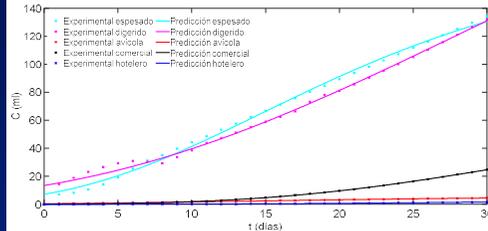


Figura 1. Producción de biogás experimental y predicha utilizando el modelo modificado de Gompertz.

b) Modelo de función logística

En la tabla 2 se muestran los valores estimados de los parámetros cinéticos basados en este modelo. En la figura 2 se muestran los valores predichos por el modelo en comparación con los valores obtenidos experimentalmente. Se encontró que el potencial de biogás fue de 144.30ml, 185.90ml, 4.96ml, 35.76ml y 2.28 ml para el lodo espesado, digerido, avícola, comercial y hotelero respectivamente. La duración de la fase de retraso estimada fue de 3.25 días para el lodo espesado, 3.83 días para el lodo digerido, 1.05 días para el lodo avícola, 14.58 días para el lodo comercial y 13.66 para el lodo hotelero. El coeficiente de correlación fue de 0.9903, 0.9917, 0.9920, 0.9985, 0.9988 para el lodo espesado, digerido, avícola, comercial y hotelero respectivamente. El error cuadrático medio presentó valores de 4.19 para el lodo espesado, 3.50 para el lodo digerido, 0.12 para el lodo avícola, 0.31 para el lodo comercial, 0.02 para el lodo hotelero. Este modelo presentó un ajuste muy bueno a los valores experimentales.

Tabla 2. Parámetros cinéticos estadísticos determinados utilizando el modelo de función logística

MODELO	FUNCIÓN LOGÍSTICA				
PARÁMETROS	P (ml)	R (ml.días ⁻¹)	λ (días)	R ²	RMSE
ESPESADO	144.3	5.523	3.25	0.9903	4.19
DIGERIDO	185.9	5.04	3.83	0.9917	3.50
AVICOLA	4.958	0.1726	1.05	0.992	0.12
COMERCIAL	35.76	1.597	14.58	0.9985	0.31
HOTELERO	2.28	0.09745	13.66	0.9988	0.02

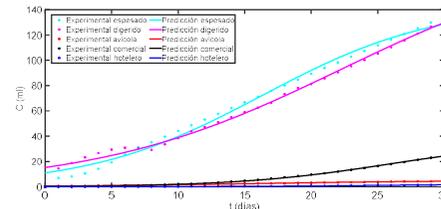


Figura 2. Producción de biogás experimental y predicha utilizando el modelo de función logística.

c) Modelo de función de transferencia

En la tabla 3 se muestran los parámetros cinéticos obtenidos por este modelo. La figura 3 muestra la comparación de los valores obtenidos experimentalmente y los valores predichos por el modelo. Los valores de producción de biogás fueron muy alejados de la realidad. La mayor parte de las actividades presentaba valores superiores a 10⁶ml. Esto puede ser debido a la dificultad del modelo para ajustarse a los datos experimentales. La duración de la fase de retraso fue de 0.25 días para el lodo espesado, 0.00 días para el lodo digerido y el avícola, 5.62 días para el lodo comercial y 5.09 días para el lodo hotelero. Los valores del coeficiente de correlación fueron de 0.9994, 0.9808, 0.9927, 0.8971, 0.9093 para el lodo espesado, digerido, avícola, comercial y hotelero respectivamente. El error cuadrático medio presentó valores de 1.06 para el lodo espesado, 5.32 para el lodo digerido, 0.12 para el lodo avícola, 2.57 para el lodo comercial y 0.16 para el lodo hotelero. Si solo se tiene en cuenta los parámetros estadísticos, se podría decir que el modelo de función de transferencia presenta un buen ajuste, pero al ver los valores del potencial de producción de biogás se aprecia que en realidad no presenta un buen ajuste.

Tabla 3. Parámetros cinéticos estadísticos determinados utilizando el modelo de función de transferencia

MODELO	FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA				
PARÁMETROS	P (ml)	R (ml.días ⁻¹)	λ (días)	R ²	RMSE
ESPESADO	1.042x10 ⁶	4.516	0.248	0.9994	1.06
DIGERIDO	1.178x10 ⁶	4.193	0.00	0.9808	5.32
AVICOLA	13.63	0.1819	0.00	0.9927	0.12
COMERCIAL	1.722x10 ⁷	0.8093	5.62	0.8971	2.57
HOTELERO	1.781x10 ⁶	0.05231	5.089	0.9093	0.16

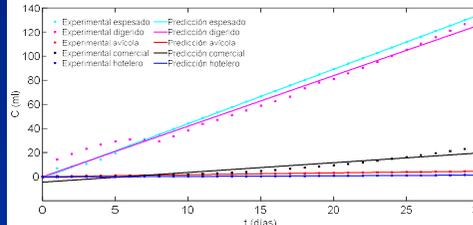


Figura 3. Producción de biogás experimental y predicha utilizando el modelo de función de transferencia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió la modelación de la producción de biogás teniendo como sustrato lodos orgánicos de distintas actividades económicas. Los parámetros cinéticos se obtuvieron utilizando el modelo modificado de Gompertz, el modelo de función logística y el modelo de función de transferencia. Los resultados experimentales se compararon con los valores predichos en esta investigación. El modelo modificado de Gompertz fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales obtenidos por Ramírez, Tejedor & Deago. Esto se pudo demostrar al comparar los parámetros estadísticos de R² y RMSE de los tres modelos. Los valores de potencial de producción de biogás obtenidos en la prueba del modelo de función de transferencia fueron valores muy alejados de los experimentales. Una causa de este resultado es que el modelo en sí no era el correcto para el ajuste de los datos y las herramientas de Matlab trabajan reduciendo al mínimo posible la suma de los cuadrados residuales sin tener en cuenta las condiciones de borde de las ecuaciones. Es recomendable probar otros modelos que se haya puesto a prueba para la producción de biogás mediante digestión anaeróbica, así como también poner a prueba estos modelos con datos obtenido de la codigestión anaeróbica de lodos de aguas residuales y otros sustratos que puedan beneficiar la producción de biogás.

REFERENCIAS

- [1] Guerrero, J., & Consuelo, I. (2016). Evaluación del potencial de biometanización de la co-digestión de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales mezclados con residuos de alimentos.
- [2] Cendales Ladino, E. D. (2011). Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- [3] Parra-Orobio, B. A., Donoso-Bravo, A., & Torres-Lozada, P. (2017). Digestión anaerobia de residuos de alimentos. Predicción de la producción de metano mediante la comparación de modelos cinéticos. *Ingeniería y Computabilidad*, 19(1), 210-218.
- [4] Ramirez, M., Deago, E., & Tejedor, N. F. (2020). Digestividad anaeróbica de biosólidos de aguas residuales usando el sistema Oxitop para estimar la producción de biogás. *Revista de I+D Tecnológico*, 16(2).
- [5] Aquino, S. F., Chernicharo, C. A., Foresti, E., Santos, M. D. L. F. D., & Monteggia, L. O. (2007). Metodologías para determinación de la actividad metanogénica específica (AME) en lodos anaeróbicos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 12(2), 192-201.
- [6] Deepnaraj, B., Sivasubramanian, V., & Jayaraj, S. (2015). Kinetic study on the effect of temperature on biogas production using a lab scale batch reactor. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 121, 100-104.