


Propuesta de un modelo para predecir el comportamiento de la operación de solubilización de residuos sólidos orgánicos

Sarmiento García Elizabeth¹, Vigueras Carmona Sergio Esteban², Chimal Hernández Luis Ángel¹,
Montes García María Monserrat¹, Pérez Montoya Luz Mariana¹, Yáñez Varela Juan Antonio^{1*}

¹Universidad Mexiquense del Bicentenario, Unidad de Estudios Superiores Tultitlán, San Antonio s/n, Colonia Villa Esmeralda, Tultitlán de Mariano Escobedo, Estado de México. C.P. 5491. México.

²Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico s/n, Colonia Valle de Anáhuac, Ecatepec de Morelos, Estado de México, C.P. 55210. México.

*Autor para correspondencia: juan.varela@umb.mx

ORCID : 0000-0002-6478-8090

Recibido:

29/mayo/2022

Aceptado:

30/diciembre/2022

Palabras clave:

Residuos sólidos orgánicos,
Modelo dinámico,
Solubilización

Keywords:

Solid organic waste,
Dynamic model,
Solubilization

RESUMEN

Uno de los retos en la aplicación de la digestión anaerobia para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos son los pretratamientos que necesitan estos sustratos para ser solubilizados y metabolizados eficientemente por los microorganismos. La solubilización es una alternativa viable porque acorta los tiempos de retención en el digestor y no utiliza agentes químicos. El presente trabajo expone la propuesta de un modelo dinámico para predecir la solubilización de residuos de frutas y hortalizas (RFH), la cual es una de las etapas importantes pues de ello depende la cantidad de sustrato soluble provenientes de los RFH que se alimentará al reactor anaerobio. Se considera el sistema de solubilización adaptado a tres distintos escenarios de operación; lote, continuo, y mixto.

ABSTRACT

One of the challenges in the application of anaerobic digestion for the treatment of organic solid waste is the pretreatments that these substrates need to be adequately metabolized by microorganisms. Solubilization is a viable alternative because it shortens retention times in the digester and does not use chemical agents. This work presents the proposal of a dynamic model to predict the solubilization stage, which is one of the important stages because the amount of nutrients in the organic solid waste that will be fed to the anaerobic reactor depends on it. The solubilization system is considered adapted to three different operation scenarios: batch, continuous, and mixed.

Introducción

En México el diagnóstico básico para la gestión de residuos publicado en el 2020 reporta que el 46.42% de los residuos generados a nivel nacional pertenecen a la fracción orgánica, esta fracción tiene como característica principal que es susceptible al aprovechamiento energético. Se presume la existencia de pocas plantas tratadoras de esta fracción a nivel nacional debido al elevado costo de instalación y mantenimiento de las tecnologías de revalorización energética, además de las dificultades que constituye procesar residuos sólidos orgánicos (RSO) por la heterogeneidad de su composición. (SEMARTAT 2020). El tratamiento anaerobio de los residuos sólidos orgánicos puede ser una alternativa válida ya que la digestión anaerobia (DA) es un proceso que convierte biológicamente una matriz orgánica en biogás y digestato, la DA estabiliza a los RSO y permite valorizarlos mediante la recuperación de energía bajo la forma de metano (Mata-Álvarez et al. 2011).

El tratamiento de RSO mediante digestión anaerobia se puede describir en cinco pasos fundamentales: desintegración, hidrólisis, acidogénesis, Acetogénesis y metanogénesis. La desintegración-hidrólisis son las etapas limitantes de la velocidad global del proceso en la DA de RSO. La hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas) del tamaño de partículas, del pH, de la concentración de NH_4^+ , y de la concentración de los productos de la hidrólisis (Peese 1983).

Los pretratamientos son cualquier operación previa al proceso de la DA con el objetivo de debilitar o romper las membranas y estructura celular de los sustratos y favorecer la desintegración de las estructuras que dan consistencia a los sustratos en los RSO, facilitando así la conversión y liberación del carbono de la materia orgánica, así mismo se incrementa la superficie específica disponible de la materia orgánica favoreciendo el acceso directo de las enzimas hidrolíticas al sustrato durante la etapa limitante del proceso (Polo, 2019), por lo que resulta fundamental mejorar la eficiencia de esta etapa.

Existen diferentes estrategias de pretratamiento para maximizar la producción de metano (CH_4), a partir de la DA de RSO, entre las que destacan procesos mecánicos, químicos, biológicos y térmicos (Fernández et al 2002). Los pretratamientos antes mencionados tienen como desventaja la utilización de agentes químicos como lo son ácidos y bases, o altas cantidades de energía. La

trituration, molienda, prensado o cribado del sustrato conduce a una mejora de la producción de biogás hasta en un 40% (Polo, 2019). Sin embargo, los costos energéticos y económicos para su empleo son altos, de tal manera que la producción de biogás debe de ser mayor frente a los costos de inversión y de operación (Castro, 2018). Una alternativa de pretratamiento explorada para el uso de los RFH como sustrato de la DA usando reactores de alta tasa (que deben operarse con baja concentración de sólidos suspendidos) fue propuesta por Montes et al., (2019) ahí los RFH se ponen en contacto con agua para promover la migración de los sustratos solubles al agua, en este trabajo se obtienen buenas eficiencias de remoción de los RFH y de la productividad de metano. Por su parte Vian et al. (2020) reportaron buenas productividades en un reactor anaerobio de alta tasa en el que se integra la solubilización de RFH mediante la corriente ascendente de agua residual (efluente que entra al reactor). Debido a que la solubilización de los RFH ha dado buenos resultados en la producción de metano se han realizado algunas estrategias para mejorar y optimizar este proceso de solubilización (Zarate et al., 2020). El principal problema para la implementación de estas tecnologías a gran escala está en los costos de inversión y operación. En países emergentes no se invierte en el desarrollo de tecnologías propias debido a los altos costo de I+D, estos pueden ser minimizados utilizando técnicas de simulación y optimización. Por lo que parte de la solución asociada a la gestión de residuos puede ser abordada desde esta perspectiva. El empleo de herramientas matemáticas para el modelado de sistemas es de gran utilidad ya que nos ayuda reducir los costos de experimentación, por lo que, el objetivo de este trabajo es modelar un sistema para predecir la solubilización de residuos de frutas y hortalizas a diferentes condiciones de operación.

Metodología

Recolección y reducción de tamaño de partícula

Se recolectaron los residuos de frutas y hortalizas (RFH) en locales de coctelería del municipio de Ecatepec. Posteriormente, se clasificaron para conocer las fracciones por tipo de fruta u hortaliza en porcentaje peso y se redujo el tamaño de partícula para lograr un diámetro promedio de 1 cm.

Se realizó la caracterización fisicoquímica de los RFH se tomó una porción de mezcla seca y se trituró, a la mezcla seca se le determinaron los sólidos suspendidos totales (SST), posteriormente se preparó una solución de 1 g SST/L. Se determinó el pH, conductividad, concentración de sólidos, demanda química de oxígeno (DQO), carbohidratos totales, proteínas, fósforo y nitrógeno.

Solubilización experimental

Para determinar la constante de solubilización de primer orden de los RFH en agua se utilizaron tanques de dos litros en donde se colocó la mezcla de RFH con agua destilada en una relación 1:4. Cada tanque fue operado con un tiempo de contacto distinto (0, 5, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 min). Al finalizar el tiempo de contacto, la fase líquida se separó de los residuos. La fase líquida fue analizada; una muestra tomada directamente del contenedor fue centrifugada a 3500 rpm por 5 min; al sobrenadante se le determinaron los sólidos, considerados como sólidos disueltos (SD).

Modelo Propuesto

Para predecir el comportamiento de la solubilización de los RFH se propuso un modelo dinámico basado en las leyes de conservación. Este modelo describe la migración de la fracción soluble que esta atrapa en la matriz de los residuos sólidos hacia la fase acuosa como una reacción de primer orden. Las variables del modelo son la concentración de sólidos suspendidos $[SS]$ que representan a los sólidos en la mezcla de RFH y los sólidos disueltos $[SD]$ los cuales son sólidos con tamaños de partícula menor a $1.8 \mu\text{m}$ en la fracción líquida. Este modelo se propuso para distintos escenarios de operación. La ecuación general de balance para ambos componentes es representada por las ecuaciones (1) y (2):

$$\frac{d[SS]}{dt} = ([SS]_{Entrada} - [SS]_{Salida}) * D - r_s \quad (1)$$

y

$$\frac{d[SD]}{dt} = ([SD]_{Entrada} - [SD]_{Salida}) * D + r_s \quad (2)$$

donde D es la tasa de dilución (min^{-1}) y r_s es la velocidad de solubilización de primer orden ($k * SD$). Para una operación en lote el modelo se reduce a las ecuaciones (3) y (4):

$$\frac{d[SS]}{dt} = -r_s \quad (3)$$

y

$$\frac{d[SD]}{dt} = r_s \quad (4)$$

El último escenario simulado fue el de la operación del solubilizador en donde el tanque es empacado con residuos orgánicos, por lo que la única entrada y salida es la fase acuosa, de modo que el sistema de ecuaciones diferenciales para este caso es el descrito por las ecuaciones 2 y 3.

Resultados y discusión

Caracterización Experimental

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la caracterización experimental de la mezcla de residuos sólidos orgánicos. Como se aprecia, el pH de la muestra es ácido, por lo que posterior a la operación de solubilización se deberá neutralizar la solución que se desea alimentar al reactor anaerobio con el fin de operar a un pH óptimo para los microorganismos metanogénicos.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de la mezcla de residuos sólidos orgánicos.

Parámetro	Mezcla
pH	4.22
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	228
Humedad (%)	89.0
Sólidos Totales (g/g residuo)	0.110
Sólidos Fijos (g/g residuo)	0.008
Sólidos Volátiles (g/g residuo)	0.102
DQO (g/g ST)	2.62
DQO (g/g SV)	2.57
Carbohidratos (g/g ST)	0.878
Proteínas (g/g ST)	0.130
Fosforo (mg/g ST)	3.20
Nitrógeno (mg/g ST)	17.1
Densidad de empaque (g/mL)	0.828

Otro aspecto interesante de la Tabla 1 es la cantidad de carbohidratos por gramo de sólido, que como era de esperarse es grande, pues cerca del 88% en un gramo de residuo es carbohidrato.

Por otro lado, la relación carbono:nitrógeno:fosforo es de 350:7.8:2.7 y la relación óptima para la DA es 350:5:1 (Montalvo, 2003), por lo que será importante equilibrar esta relación para mejorar la eficiencia de RFH mediante DA. Lo anterior resalta que gran cantidad de la materia de la que se lograría solubilizar, sería carbohidrato, sustrato no difícil de degradar por el consorcio microbiano.

Ajuste Cinético

La concentración de SD a distintos tiempos de contacto RFH:H₂O se muestra en la Figura 1, estos datos se ajustaron con una ley de velocidad de primer orden (ecuación 5).

$$\ln\left(\frac{[SD]}{[SD_0]}\right) = kt \quad (5)$$

Donde $[SD]$ representa la concentración de sólidos disueltos en cualquier tiempo expresados en g/L, $[SD_0]$ es la concentración inicial de sólidos disueltos en g/L (representa los SD en el agua después de un contacto instantáneo RFH:H₂O), t es el tiempo en min, y k es la constante cinética de primer orden en min^{-1} .

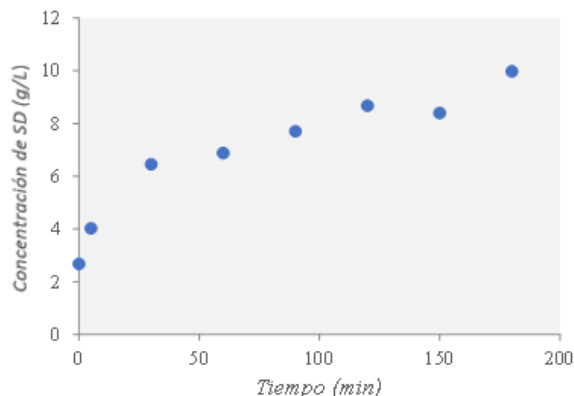


Figura 1. Variación de la concentración de sólidos totales en la fase acuosa en función del tiempo.

En la Figura 2 se muestra el ajuste cinético de estos datos a la ecuación 5. De esta se observa que el coeficiente de correlación es de $R^2 = 0.81$, el cual puede ser justificado por la complejidad del fenómeno heterogéneo. De este ajuste se determina el valor de la constante cinética con la pendiente de la ecuación de la recta generada. Por lo tanto, la constante cinética k es de un valor de 0.0042 min^{-1} .

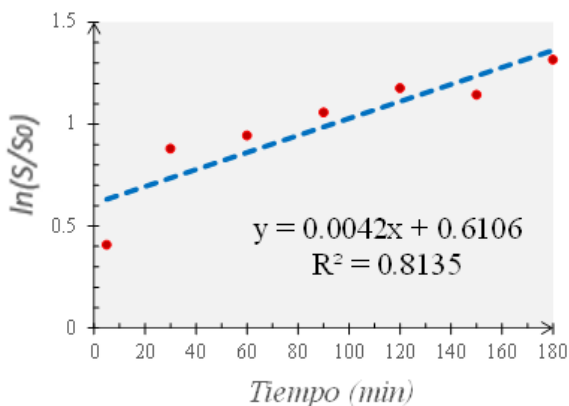


Figura 2. Ajuste de los datos experimentales a la ecuación cinética de primer orden (ecuación 5). De este análisis se concluye que la ley de velocidad que describe la velocidad de migración de los componentes atrapados en el residuo a la fase acuosa es la ecuación 6.

$$r_s = 0.0042[SS] \quad (6)$$

Simulaciones Dinámicas

En la Figura 3, se muestran las predicciones del modelo para el escenario en lote. Para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales (Ecs. 3 y 4) se tomó como condición inicial que $[SS]$ tiene un valor de 20 g/L y nada de $[SD]$ en el agua. Como se puede apreciar el consumo del empaque, que en este caso son los RFH, decae logarítmicamente, mientras que la cantidad de $[SD]$ en el medio líquido incrementan. Este comportamiento es el esperado debido a que en este tipo de operación el sistema no tiene entradas ni salidas.

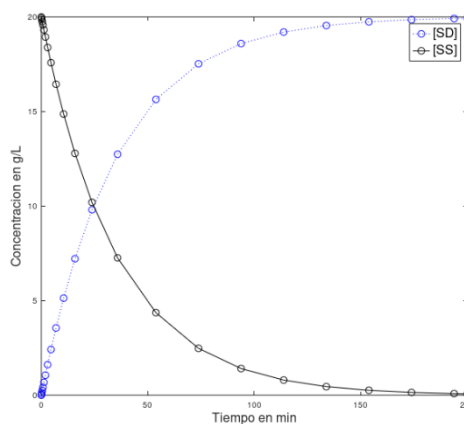


Figura 3. Variación de la concentración de sólidos suspendidos y sólidos disueltos operando el solubilizador en lote.

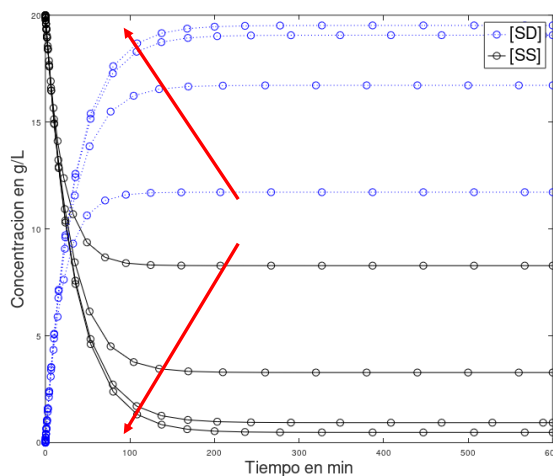


Figura 4. Variación de la concentración de sólidos suspendidos y sólidos disueltos operando el solubilizador en continuo y variando la tasa de dilución.

En la Figura 4 se muestran las concentraciones predichas por la simulación para un escenario de operación en continuo, es decir, alimentando y retirando continuamente tanto agua como residuo sólido del

sistema. Un parámetro que se varió fue la tasa de dilución D , parámetro análogo al tiempo de residencia. En la Figura 4, las flechas rojas son las que indican el incremento del tiempo de residencia (50 – 1440 min).

Como se puede apreciar, la operación en continuo permite lograr una concentración de SD a la salida del sistema de 18 g/L cuando se opera a un TR 1440 min. También se observa en la figura 4 la dependencia de la concentración de SD de la tasa de dilución de operación. A medida que esta tasa de dilución se disminuye (o se incrementa el tiempo de residencia) el comportamiento se va asemejando al escenario en lote. Este aspecto es importante ya que esto determinará la concentración de sustrato que se adicionará al digestor anaerobio, y a su vez, determina la capacidad de tratamiento.

Los resultados del escenario mixto son los de la Figura 5. Una vez más, la flecha roja indica el sentido del incremento del tiempo de residencia. Como en este escenario solo el agua fluye a través de un empaque de RFH, la concentración de los [SS] decae de forma logarítmica, en todos los casos (diferentes tasas de dilución). Por otra parte, el tiempo de contacto agua RFH cambia (50 – 1440 min), provocando el incremento de la concentración de SD a la salida. Este escenario parece ser el más factible, puesto que el controlar operacionalmente la tasa de dilución permitiría controlar la cantidad de sustrato que se alimenta al reactor anaerobio. Además de que operacionalmente sería mucho más factible que alimentar y retirar residuos sólidos continuamente del sistema (escenario en continuo).

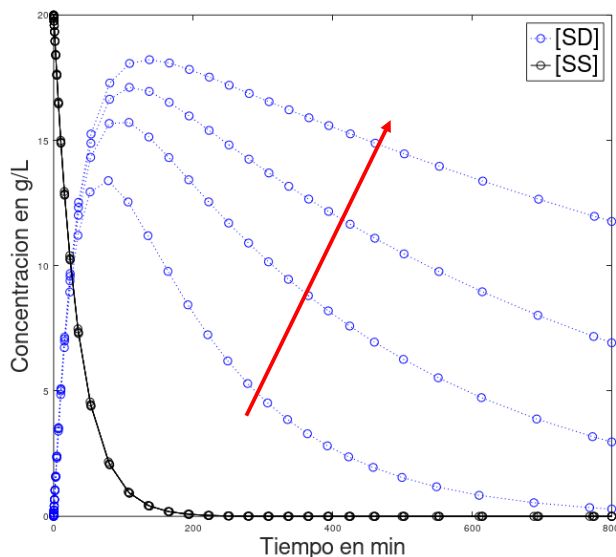


Figura 5. Variación de la concentración de sólidos suspendidos y sólidos disueltos operando el solubilizador en operación mixta (residuos sólidos empacados y agua en continuo) y variando la tasa de dilución.

Conclusiones

En la caracterización de los residuos sólidos se observó una relación de Carbono: Nitrógeno: Fosforo (350:7.8:2.7 respectivamente), los sustratos tienen los requerimientos necesarios para ser tratados por digestión anaerobia.

El comportamiento dinámico del fenómeno de migración de los sólidos suspendidos hacia sólidos disueltos puede ser modelado mediante una cinética de primer orden.

A través de los parámetros establecidos en los diferentes escenarios de operación, se observó que en la operación en lote se alcanza la máxima concentración de SD a los 200 min.

El caso del escenario en continuo la simulación permite determinar los tiempos de la tasa de dilución de la mezcla respecto a las concentraciones de sólidos disueltos requerida, por lo tanto, puede ser establecida en el estado estacionario, aunque la implementación y manejo de este tipo de operación representa un reto en la práctica.

En el escenario mixto se destaca la importancia de la variación de la tasa de dilución sobre el empaque de la mezcla de residuos para la obtención de la concentración deseada de sólidos disueltos, por lo que las condiciones de operación son fáciles de determinar y el tiempo y manejo para el recambio del empaque es más favorable que en los escenarios anteriores.

Las predicciones han sido una herramienta fundamental para la determinación del tipo de operación que regirá en la etapa de solubilización de RFH para entregar la concentración de SD adecuada al reactor anaerobio.

La simulación de la etapa de solubilización nos da información para dimensionar los equipos requeridos en un tren de tratamiento de RFH en reactores anaerobios de alta tasa.

Referencias

- Castro G., A. J. (2018). Estudio bibliográfico del estado del arte de la digestión anaerobia de residuos sólidos orgánicos y mejora del proceso mediante pretratamientos
- Fernández, F., M. Fernández Polanco, P.A. García Encina. (2002). Criterios para la selección de tecnología de digestión anaerobia de residuos sólidos. Latin American
- Montalvo M., S., & Guerrero S., L. (2003). Tratamiento anaerobio de residuos. Valparaíso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.

Mata-Alvarez, J., Macé, S., & Llabres, P. (2000). Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource technology*, 74.

Montes G., M. M., Viguera C., S. E., Pérez V., J., Zafra J., G., Velasco P., A., & Chang S., C. (2019). Two-stage anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Journal of Biotech Research*, 10, 29-37.

Polo, C. M. (2019). Co-digestión anaerobia y pretratamientos de residuos agroalimentarios con fangos UASB de depuradora. Caracterización BMP y análisis (Doctoral dissertation, Universidad Pontificia).

Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. (2020). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Primera edición. Lucart estudio S.A. de C.V.

Vian J., V. C. (2020). A Novel Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket Solid-State Reactor for the Treatment of Fruit and Vegetable Waste. *Environmental Engineering Science*, 373-381.

Workshop and Symposium an anaerobic digestión. Mérida, Yucatán, México

Zarate, C. O. Montes. M. M. Viguera-Carmona. S. E., 2020. Producción de digestato anaerobio a partir de residuos de frutas y verduras. Coloquio de Investigación Multidisciplinaria, CIM2020.

Peece, R. E. (1983). Biotechnology for anaerobic waste treatment. *Science and Technology*, 17, 416A - 427A.