

VALORIZACIÓN INDUSTRIAL Y AGRÍCOLA DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (FORSU)

ÓSCAR GONZÁLEZ BARCELÓ,
HAMILTON MOSQUERA TOSCANO,
JAZMÍN CHÁVEZ MARTÍNEZ,
DIEGO ABONZA SOTRES
Y SIMÓN GONZÁLEZ MARTÍNEZ

La fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU) depende de la región y del país (Campuzano y Gonzalez-Martinez, 2016). En Cd. de México Campuzano y González-Martínez, (2015) y Figueroa-Escamilla *et al.* (2021) reportan DQO de 304 y 294 $\text{gO}_2/\text{kg}_{\text{FORSU}}$; nitrógeno Kjeldahl, 5.4 y 6.1 $\text{g}/\text{kg}_{\text{FORSU}}$; y sólidos totales de 29.7 y 29.0 %ST, con fracción volátil de 0.75 y 0.78, respectivamente.

En la investigación de Castellón-Zelaya y González-Martínez, (2021), las fermentaciones anaerobias de FORSU muestran fermentación heteroláctica (lactato, etanol y acetato), que aumenta el rendimiento de metano (16 %) sobre digestión de FORSU cruda. Una vez digerida la FORSU, es un residuo con alto valor agrícola por sus nutrientes y capacidad de restauración de suelos (Peng y Pivato, 2019; Tampio *et al.*, 2016).

El trabajo aborda dos vías para aprovechamiento de la FORSU, basadas en procesos biológicos anaerobios: a) fermentación de FORSU con levaduras para producción de etanol, previo a digestión anaerobia, con uso del residuo sólido para abastecer el reactor metanogénico (Figura 1-a) (Wang *et al.* 2023) en el cual se incorpora la fermentación después de la digestión anaerobia; y b) digestión de FORSU y uso de fracciones del material residual (líquida y sólida) para fertilizante y mejorador de suelos (Figura 1-b) (van Midden *et al.*, 2023).

Metodología

La FORSU fue colectada de muestras aleatorias en la estación de transferencia Coyoacán, Cd. de México, con metodologías NMX-AA-15-1985, y NMX-AA-19-1985. Las muestras se conservaron a -21°C en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA), y el método de preparación fue de acuerdo a Castellón-Zelaya y González-Martínez (2021) (Figura 2).

El experimento para etanol y metano a partir de FORSU se realizó en frascos de 2L, con salida de biogás a 35°C , sin control de pH por 72 horas (Mosquera-Toscano *et al.*, 2023) (Figura 3-a). Con las tres concentraciones de sólidos totales (10, 20 y 29.2 % ST), cada una a tres concentraciones de levadura comercial *S. cerevisiae* (6, 12 y 24 $\text{g}/\text{kg}_{\text{FORSU}}$). De la fermentación, la fracción líquida fue para separar metabolitos; y la fracción sólida, para abastecer prueba de potencial bioquímico de metano (PBM) (Figura 3-b).

En el experimento de residuo digerido para biofertilizante se usó muestra de suelo franco-arenoso colectada en parcela ubicada al pie de Sierra de Xochitepec, CDMX; el digestato se obtuvo en un reactor semicontinuo a 35°C donde el residuo

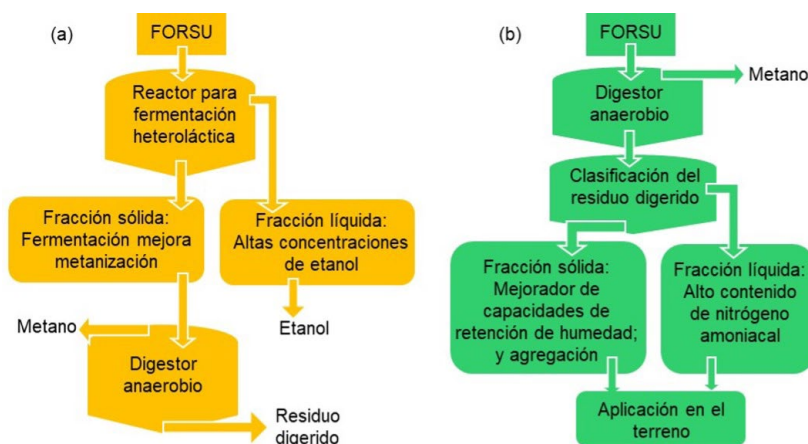


Figura 1. Procesos anaerobios para valorización industrial (a) o agrícola (b) de FORSU. El objetivo general es recuperar recursos de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos con valor agregado para industria (etanol y metano) o agricultura (nitrógeno o mejorador de suelos) mediante procesos anaerobios



Figura 2. FORSU: a) cuarteo en sitio, b) empaquetado a -20°C, c) muestra extrudada



Figura 3. Fermentación (a) y prueba PBM (b) (Mosquera-Toscano *et al.*, 2023)

digerido se clasificó en fracciones sólida y líquida (95 y 5 % ST) (Figura 4 a, b, c y d); y las incubaciones de referencia fueron: suelo, suelo-composta, suelo-FORSU; y de evaluación: suelo-residuo digerido, suelo-fracción líquida digerida y suelo-fracción sólida digerida; las proporciones como masa fresca promediaron 676 g: 152 g a 20° C y 20 a 35 % de humedad (Figura 5).

El experimento para mejoramiento de suelo arenoso consistió en: trituración de FORSU; digestión anaerobia para obtención de residuo digerido; mezclas suelo-residuo digerido (a 500g de arena de sílice se añadieron 5.3, 15, 27 y 70 g de residuo digerido espesado) (Figuras 6 a, b, c y d) (Tampio *et al.*, 2016); correspondientes a relaciones residuo digerido/suelo (masa/masa) de 1.06, 3, 5.4 y 14 %.

Resultados

El experimento de digestión anaerobia se realizó en dos etapas para selectividad de etanol y metanización, el cambio más significativo en la etapa de fermentación heteroláctica fue para 20 % ST que, de predominar ácido láctico en fermentación sin levaduras ($0.70 \text{ gDQO}_{\text{eq-láctico}}/\text{gDQO}_{\text{eq-}\Sigma\text{metabolitos}}$) es desplazado por etanol ($0.62 \text{ gDQO}_{\text{eq-etanol}}/\text{gDQO}_{\text{eq-}\Sigma\text{metabolitos}}$), al inocular $24 \text{ g}_{\text{S.cerevisiae}}/\text{kgFORSU}$ se obtienen 38.9 getanol/L. Además, al espesar el residuo digerido,

el potencial bioquímico de metano fue $318 \text{ NL-CH}_4/\text{kg}_{\text{FORSU}}$, 4 % menor que el PBM de la FORSU.

El experimento de residuo digerido e incubado en suelo para evaluar especies de nitrógeno tuvo una duración de 60 días. En incubaciones de referencia: a) suelo-FORSU, se cuantificaron amonificación (14 %) y pérdida de nitrógeno orgánico (6 %) que se atribuyen a actividad de bacterias hidrolíticas y posible volatilización como amoníaco; b) suelo-composta, la nitrificación (19 %) y pérdida mínima (1 %) indican presencia y rápida actividad de bacterias nitrificantes.

En incubaciones de residuos digeridos: a) suelo-residuo completo, finalizó con alta pérdida de nitrógeno (30 %), de donde dos tercios es debido a la pérdida del nitrógeno amoniacal, manteniendo una tercera parte al producir nitratos; b) suelo-fracción sólida digerida, el comportamiento es similar a residuo anterior, pero finaliza con mayor pérdida (45 %); y c) suelo-fracción líquida digerida, se mantiene el comportamiento, sólo que la pérdida disminuye 20 % al lograr mayor índice de nitrificación (27 %). Al igual que en el presente trabajo De la Fuente *et al.* (2013) destacan una gran pérdida inicial de nitrógeno que atribuyen a una rápida inmovilización por crecimiento de microorganismos, volatilización de amoníaco y posible desnitrificación.



Figura 4. Experimento biofertilizante: a) suelo, b) reactor digerido C) sólido, y d) líquido



Figura 5. Incubaciones en suelo para evaluación del nitrógeno. Las capacidades de retención de humedad y formación de agregados se determinaron con métodos de Yu *et al.* (2013) y Kaurichev (1984), respectivamente

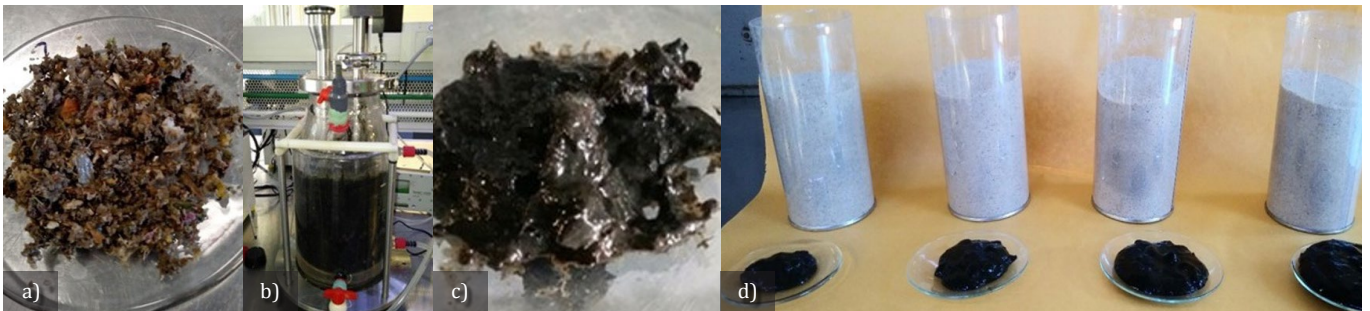


Figura 6. Experimento para mejoramiento de suelo: a) FORSU triturada; b) reactor; c) residuo digerido; d) componentes de arena y sustratos para incubaciones

En el experimento de mejoramiento de un suelo arenoso, para los ensayos 1, 2, 3 y 4 de residuos-digeridos espesados (5.3, 15, 27 y 70 g) incubados en 500 g de arena: a) los agregados entre 0.25 y 10 mm, que resistieron la prueba de tamizado en seco, aumentaron de 42, a 54, a 62 y a 76 % (masa/masa), que de acuerdo a la prueba de Kaurichev el estado estructural mejoró de malo, a bueno, a satisfactorio y a bueno, respectivamente. La mejora del suelo se comporta como los contenidos correspondientes de materia orgánica (2.0, 2.3, 3.0 y 7.7 gCOT/kg_{ST}). También, destacan los aumentos en la capacidad de reten-

ción de humedad de 35, a 46, a 47 y a 47 %, respectivamente; mientras que para arena fue de 25 %.

Conclusiones

La digestión anaerobia en dos etapas, donde hay fermentación previa que se bioaumenta con levadura comercial, permite obtener etanol en la primera etapa; la digestión anaerobia de la fracción sólida de la fermentación permite igualar o incrementar el potencial bioquímico de metano, en comparación al que se obtiene a partir de FORSU.

Después de la digestión anaerobia de FORSU, la incubación en suelo del residuo líquido digerido conservó más nitrógeno, útil para cultivos, que las mezclas del residuo completo o la fracción sólida digerida, atribuible a una menor concentración de bacterias con capacidades de amonificar o desnitrificar.

La aportación de materia orgánica con las características del residuo, espesado, de digestión anaerobia de FORSU permitió mejorar en un suelo arenoso las capacidades de retención de humedad y de agregación.

El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) del Instituto de Ingeniería de la UNAM con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S. C.

Créditos

Óscar González Barceló redactó el documento; el trabajo es producto de las tesis de maestría PMyDI(Ambiental)-UNAM de Hamilton Mosquera Toscano, Jazmín Chávez Martínez, Diego Abonza Sotres; y Simón González Martínez quien es el asesor de los temas y jefe de los proyectos PAPIIT y CONAHCYT que aportaron los recursos para la investigación. |

Referencias

1. Campuzano, R. y González-Martínez, S. (2016). Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review. *Waste Management*, 54, 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.016>.
2. Campuzano, R. y González-Martínez, S. (2015). Extraction of soluble substances from organic solid municipal waste to increase methane production. *Bioresource Technology*, 178, 247-253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.042>.
3. Castellón-Zelaya, M. F. y González-Martínez, S. (2021). Silage of the organic fraction of municipal solid waste to improve methane production. *Water Science and Technology*, 83(10), 2536-2548. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.148>.
4. De la Fuente, C.; Albuquerque, J. A.; Clemente, R. y Bernal, M. P. (2013). Soil C and N mineralisation and agricultural value of the products of an anaerobic digestion system. *Biology and Fertility of Soils*, 49(3), 313-322. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0719-9>.
5. Figueroa-Escamilla, L.; González-Martínez, S.; Campuzano, R. y Valdez-Vázquez, I. (2021). METHANE PRODUCTION AND BROMATOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE DIFFERENT FRACTIONS OF ORGANIC MUNICIPAL SOLID WASTE. *Detritus*, 15, 13-23. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2021.15095>.
6. Kaurichev, I. S.; Panov, N.; Stratonovich, M.; Grechim, I.; Savich, V.; Ganzhara, N. y Mershin, A. (1984). *Prácticas de Edafología*. Edición en español. 279pp. MIR, Moscú.
7. Mosquera-Toscano, H. G.; González-Barceló, O.; Valdez-Vázquez, I. y Durán-Moreno, A. (2023). Ethanol and Methane Production from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste in a Two-Stage Process. *Bioenergy Research*. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10610-w>.
8. Peng, W. y Pivato, A. (2019). Sustainable Management of Digestate from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Food Waste Under the Concepts of Back to Earth Alternatives and Circular Economy [Review]. *Waste and Biomass Valorization*, 10(2), 465-481. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0071-2>.
9. Tampio, E.; Salo, T. y Rintala, J. (2016). Agronomic characteristics of five different urban waste digestates [Article]. *Journal of Environmental Management*, 169, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.001>.
10. Van Midden, C.; Harris, J.; Shaw, L.; Sizmur, T. y Pawlett, M. (2023). The impact of anaerobic digestate on soil life: A review. *Applied Soil Ecology*, 191, Article 105066. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105066>.
11. Wang, W.; Chang, J. S. y Lee, D. J. (2023). Anaerobic digestate valorization beyond agricultural application: Current status and prospects. *Bioresource Technology*, 373, Article 128742. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128742>.
12. Yu, OY.; Raichle, B. y Sink, S. (2013). Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. *Int J Energy Environ Eng* 4, 44. <https://doi.org/10.1186/2251-6832-4-44>.