

OPTIMIZACIÓN DEL TRATAMIENTO INTEGRADO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y RESIDUOS GANADEROS CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA.

González, Julián M.^{1,2}

¹Instituto de desarrollo tecnológico para la industria química INTEC (UNL-CONICET)

²Facultad de Ingeniería Química FIQ (UNL)

Directora: Morero, Betzabet

Codirector: Cafaro, Diego C.

Área: Ingeniería

Palabras claves: Codigestión, Recuperación Energética, Optimización.

INTRODUCCIÓN

La generación de residuos continúa creciendo rápidamente debido al aumento de la población y al continuo desarrollo industrial, demandando estrategias de tratamiento más complejas que integren los residuos producidos en una determinada región. En Argentina, cerca del 37% de los residuos sólidos urbanos municipales aún no cuentan con un tratamiento adecuado. En 2017, existían más de 5000 sitios de disposición de residuos irregulares (basurales a cielo abierto) cubriendo un área de 86 km² (SAyDS, 2017). Por otro lado, existen alrededor de 1440 establecimientos de engorde a corral (feedlots), que suman en total 1.3 millones de cabezas de ganado. El 76% de estos establecimientos están concentrados en las provincias de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe (SENASA, 2016). En las áreas donde coexisten los residuos urbanos con los provenientes de la explotación rural (en particular, el estiércol vacuno), el tratamiento conjunto de residuos es una alternativa prometedora. En efecto la viabilidad económica y ambiental de proyectos de bioenergía con énfasis en *feedlots* ha sido demostrada con anterioridad (Castelo Caruana, 2018).

La digestión anaeróbica (DA) es una tecnología madura que permite el uso de biogás como energía renovable y del digestato como fertilizante. Además, la co-digestión de residuos de diferentes fuentes tiene un gran potencial para reducir el impacto ambiental e incrementar los beneficios económicos del tratamiento integrado (Morero et al., 2020). Por lo tanto, es la alternativa comúnmente seleccionada para el tratamiento de los residuos orgánicos.

En este trabajo se propone una formulación matemática para resolver de forma óptima tanto el diseño de procesos como la red de transporte asociada, aprovechando las ventajas de la co-digestión. La formulación se aplica a un caso de estudio real, abarcando el norte de la provincia de Santa Fe, Argentina, donde los establecimientos de feedlots desarrollan sus actividades en ubicaciones cercanas a diferentes ciudades.

OBJETIVOS

El modelo matemático de optimización apunta al diseño de la red logística para la gestión integrada de tratamiento de residuos urbanos y estiércol vacuno. La digestión anaeróbica es la alternativa propuesta para el tratamiento de los residuos orgánicos, considerando las ventajas asociadas al coprocesamiento de ambos flujos (Xing et al., 2020).

El modelo debe proveer el número, localización, tamaño y mix de residuos óptimos de cada digestor, el volumen de residuos tratados y los flujos de transporte entre las fuentes (feedlots/ciudades) y los digestores. Las decisiones deben ser tales que permitan alcanzar el máximo valor presente neto de las inversiones.

METODOLOGÍA

En este trabajo se ha desarrollado una formulación matemática mixta entera no lineal (MINLP) para encontrar la red logística y el diseño de proceso óptimos. Además de las ecuaciones de balance de masa asociadas al proceso, el modelo comprende el cálculo de los flujos de residuos entre las fuentes de generación y los digestores, la determinación del mix de los substratos de entrada a cada digestor, ecuaciones no lineales para estimar el rendimiento de la DA y ecuaciones de economía de escala para dimensionar las instalaciones, entre otras restricciones. Se incluyen también ecuaciones económicas para la evaluación de los procesos de centrifugado y playas de secado para el digestato, a la salida de los digestores, que generan a su vez productos comerciables (fertilizante).

El modelo evalúa la cantidad de residuos que deben ser tratados o enviados a disposición final, determinando la mejor ubicación para las instalaciones de destino en ambos casos. La localización de éstas se establece a partir de un conjunto de ubicaciones sugeridas. El tamaño de las instalaciones es determinado por la cantidad diaria de residuos que se deben tratar y el tiempo de residencia necesario para procesar/digerir los residuos, siendo ambas variables decisiones críticas a definir por el modelo. En lo que respecta a la elección del tratamiento, los residuos urbanos pueden ser enviados hacia DA y/o a rellenos sanitarios, siendo otra decisión importante del modelo la cantidad que envía a cada uno de estos procesos. Para los feedlots las opciones incluyen DA y/o lagunas aireadas.

Otra de las decisiones importantes que toma el modelo es la selección de la proporción de mezcla o mix que se utiliza en cada digestor, la cual es seleccionada de un conjunto de alternativas derivadas de estudios a escala de laboratorio (Xing et al. 2020). En este sentido, para la caracterización de la digestión de los residuos, los parámetros cinéticos se toman de Zhang et al. (2013). Entre las consideraciones adoptadas para la digestión anaeróbica en cada ubicación se incluye el número de digestores que pueden instalarse, con un volumen máximo de 4000 m³ cada uno (Wellinger et al, 2013).

El análisis económico del problema comprende dos términos principales. El primero es el costo de capital asociado a las instalaciones, y el segundo incluye los ingresos y costos de operación anuales del tratamiento integrado. Los resultados óptimos se obtienen a partir de la maximización del valor presente neto (NPV) de las inversiones, sujeto a la necesidad de tratar y/o disponer todas las corrientes de residuos orgánicos consideradas en el modelo.

CONCLUSIONES

La Figura 1a ilustra los datos del caso de estudio, donde las fuentes de residuos se representan con círculos. Estas fuentes están ubicadas al norte la provincia de Santa Fe. El caso abarca veintiséis ciudades (círculos verdes) que producen entre 1.50 y 34.00 toneladas por día de residuos sólidos urbanos orgánicos, y cuarenta y dos establecimientos de feedlot (círculos azules) que generan entre 0.47 y 586.00 toneladas por día de estiércol vacuno. En la Figura 1b puede verse la agrupación de fuentes de residuos que se adoptó, buscando particionar la resolución del problema en clústers, reduciendo así el esfuerzo de cómputo. En la misma Figura 1b se presenta la ubicación óptima de los digestores y el flujo de residuos.

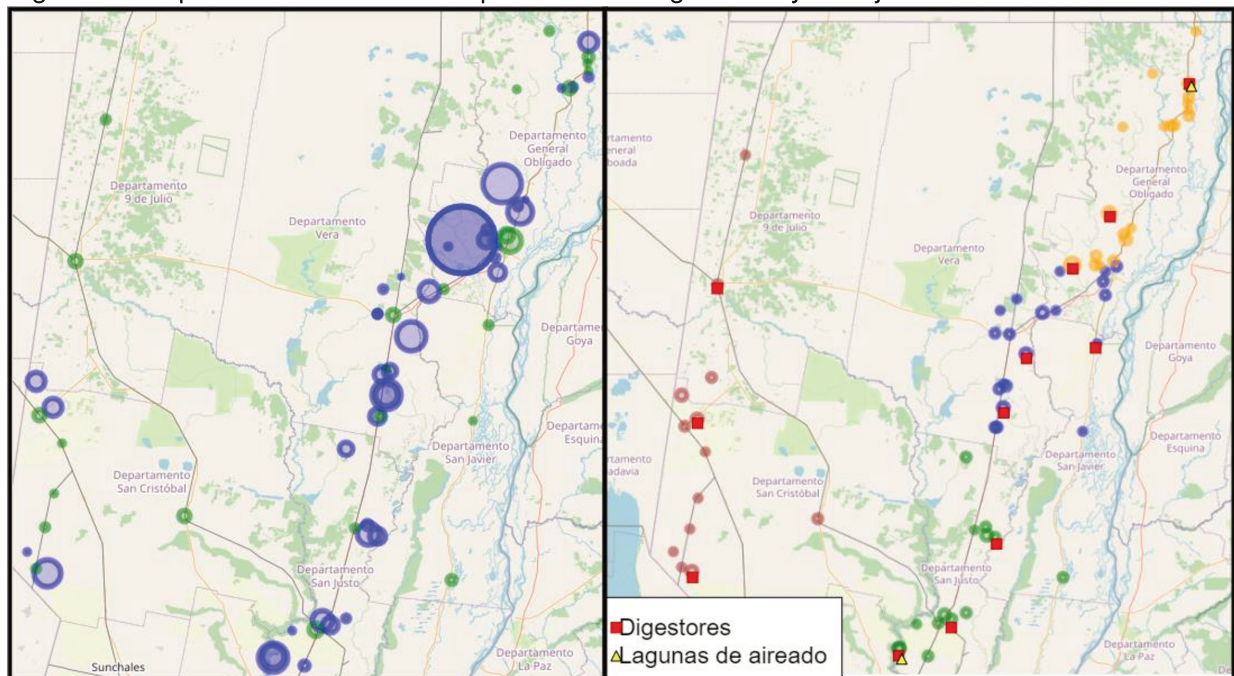


Figura 1a (izq): Localización y tamaño de las fuentes de residuos. Círculos azules: Feedlots. Círculos Verdes: Centros Urbanos. El tamaño de los círculos es proporcional a la producción diaria de residuos. Figura 1b (der): Agrupación de las fuentes en clústers (cada color representa un clúster) y solución óptima obtenida.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Total
Feedlots	5	11	13	12	41
Ciudades	8	3	7	8	26
Residuos [tn/d]	219	420	471	996	2106
Digestores instalados	3	3	3	3	12
Vertederos instalados	0	0	0	0	0
Lagunas instaladas	0	1	0	1	2
NPV	16.7	21.4	85.5	59.7	183.3

Tabla 1: Resumen de la conformación de los grupos y resultados obtenidos

Por otra parte, en la Tabla 1 puede apreciarse la conformación de los clústers o grupos, junto a los resultados obtenidos en la ejecución del modelo de optimización. Es importante destacar

que en la mayoría de los digestores que se instalan el modelo aprovecha las ventajas de la codigestión, combinando las diferentes corrientes de residuos para obtener un mayor rédito económico. Más aún, la solución óptima sugiere no instalar ningún relleno sanitario para residuos orgánicos en la región. Además, se consigue un resultado positivo en el valor presente neto, lo que indica que es una estrategia de procesamiento rentable. El modelo desarrollado y los resultados presentados permiten concluir que la codigestión brinda una mejor solución para el tratamiento de los residuos analizados, escogiendo proporciones de mezcla que no necesariamente producen el mayor rendimiento de metano en el biogás por unidad de materia seca. Los flujos de transporte resultan seleccionados a modo de disminuir las distancias fuente-destino. Finalmente, el modelo matemático propuesto puede usarse para la evaluación y configuración de diferentes redes de tratamiento de residuos, integrando otras alternativas, como el vermi-compostaje.

BIBLIOGRAFÍA BASICA

- Castelao Caruana ME, Preuss S, Picoletti A. (2018) Economía y organización de proyectos de generación de bioenergía en feedlots en Argentina 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: CONICET – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas . Centro de Estudios Urbanos y Regionales - CEUR, 2018.
- Morero B, Montagna AF, Campanella EA, Cafaro DC (2020) Optimal process design for integrated municipal waste management with energy recovery in Argentina. *Renewable Energy*, 146, 2626-2636
- SAyDS (2017) Informe del estado del ambiente 2017. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable Presidencia de la Nación. <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/completo-compressed.pdf> (Accessed 18.02.21)
- SENASA, 2016. Database of cattle stock in feedlots, Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria, Buenos Aires.
- Wellinger A., Murphy J., D.Baxter D., *Biogas handbook: science, production and application*, in: Woodhead Publishing Series in Energy, Woodhead Publishing, 2013.
- Xing B-S, Cao S, Han Y, Wen J, Zhang K, Wang XC (2020) Stable and high-rate anaerobic co-digestion of food waste and cow manure: Optimization of start-up conditions. *Bioresource Technology* 307, 123195.
- Zhang C., Xiao G., Peng L., Su H., Tan T. (2013) The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure. *Bioresource Technology* 129, 170–176