

DISEÑO ÓPTIMO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO INTEGRADO DE RESIDUOS URBANOS Y GANADEROS CON VALORIZACIÓN ENERGÉTICA

Lorenzón, Agustina Belen^{1,2}

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

²Facultad de Ingeniería Química FIQ (UNL)

Directora: Morero, Betzabet del Valle

Codirector: Cafaro, Diego Carlos

Área: Ingeniería

Palabras claves: Optimización, Recuperación Energética, Co-digestión.

INTRODUCCIÓN

El volumen de residuos urbanos se encuentra en constante crecimiento debido al desarrollo económico y la expansión urbana en ciertas regiones, por lo que resulta imprescindible contar con estrategias de tratamiento sustentables. En efecto, Argentina cuenta con un enorme potencial para el aprovechamiento de biomasa con fines energéticos. En el último informe realizado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) se estimó el potencial de energía a partir de fuentes de biomasa húmeda proveniente de actividades ganaderas intensivas y de la vinaza en Argentina. El potencial nacional resultó de 415.860 toneladas equivalentes de petróleo por año, siendo el aporte de *feedlots* bovinos el que representa el mayor porcentaje (44%) (FAO, 2020). Actualmente en Argentina hay inscriptos un total de 1149 establecimientos de engorde a corral, de los cuales el 71.6% se encuentran ubicados en las provincias de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe (SENASA, 2021).

En las zonas donde coexisten los residuos urbanos y rurales (en particular el estiércol vacuno), el tratamiento conjunto es una opción prometedora. De hecho, la viabilidad de proyectos de generación de bioenergía en *feedlots* ha sido demostrada previamente (Castelao Caruana, 2018). La digestión anaeróbica (DA) es una tecnología madura que permite el uso de biogás como energía renovable y de digestato como fertilizante. Además, la generación de energía es constante y se puede almacenar (vía compresión o licuefacción del metano), lo que significa que puede ser utilizada justo cuando sea requerida. A su vez, la co-digestión de diferentes tipos de residuos ha demostrado su potencial para reducir el impacto ambiental del procesamiento e incrementar los beneficios (Morero et al., 2020).

Este trabajo presenta un modelo matemático que permite encontrar la red de tratamiento integrado óptima, evaluando las soluciones mediante una función objetivo económica. La formulación se aplica a un caso de estudio real en el departamento General Obligado de la provincia de Santa Fe, donde los establecimientos de *feedlot* se encuentran próximos a las zonas urbanas.

Título del proyecto: TRATAMIENTO INTEGRADO DE RESIDUOS AGRÍCOLA-GANADEROS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS, POTENCIANDO LA RECUPERACIÓN ENERGÉTICA A PARTIR DE LA CODIGESTIÓN

Instrumento: Investigación Orientada

Año convocatoria: 2019

Organismo financiador: Agencia Santafesina de Ciencia, Tecnología e Innovación

Director/a: Morero, Betzabet del Valle

OBJETIVOS

- Desarrollar un modelo matemático que permita definir el diseño de la red, la logística y la gestión integrada del tratamiento de residuos urbanos y estiércol vacuno proveniente de establecimientos de engorde a corral (*feedlots*), considerando alternativas de digestión anaeróbica, compostaje, rellenos sanitarios y lagunas aireadas, facilitando los efectos sinérgicos del co-procesamiento.

METODOLOGÍA

El modelo considera las tecnologías de digestión anaeróbica (DA), compostaje y disposición en rellenos sanitarios para los residuos urbanos, y las tecnologías de DA y tratamiento en lagunas aireadas en el caso de los residuos rurales. El metano generado durante la DA puede ser convertido en calor y electricidad. El calor se utiliza para mantener la temperatura del digestor y la energía eléctrica puede ser comercializada. Por otro lado, tanto el compost como el digestato obtenido como subproducto de la DA pueden ser vendidos como fertilizantes orgánicos. La superestructura modelada se ilustra en la Figura 1.

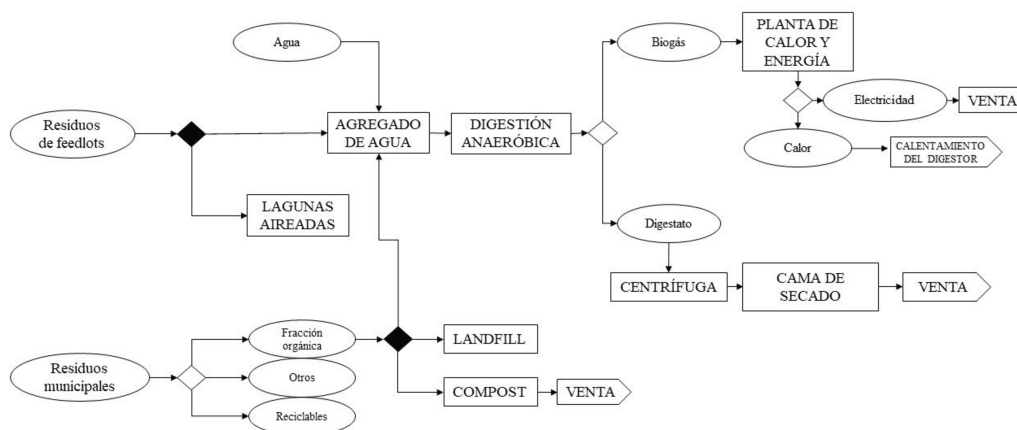


Figura 1: Superestructura de las alternativas de tratamiento de residuos.

El modelo determina la localización óptima de las instalaciones a partir de un conjunto de ubicaciones sugeridas. Las plantas de compostaje y rellenos sanitarios solo pueden instalarse en ubicaciones relativamente cercanas a las ciudades, mientras que las lagunas aireadas se instalan en algún establecimiento de *feedlot* existente. Por su parte, las plantas de DA pueden ubicarse en cualquiera de las ubicaciones anteriores.

La formulación comprende, en primer lugar, una serie de ecuaciones de balance de masa donde principalmente se determinan los flujos de residuos entre las fuentes de generación y las diferentes plantas de tratamiento. Luego, se incluye un conjunto de ecuaciones asociadas a los procesos. Para la alternativa de DA, el modelo define para cada digestor los flujos de residuos de cada tipo necesarios para cumplir con las proporciones de mezcla seleccionada, el caudal de metano generado, el volumen del equipo y el tiempo de residencia de los residuos (Xing et al., 2020; Zhang et al., 2013). En el caso del compostaje, se determina para cada planta la cantidad de agente estructurante (que se compone de hojas secas y ramas) a agregar para lograr el nivel de humedad deseado y el caudal de compost producido a partir de un parámetro de rendimiento esperado (Keng et al., 2020).

Además, se incorporan las ecuaciones de costos de capital y operativos para las diferentes alternativas a partir del ajuste de puntos tomados de la bibliografía (Badgett et al., 2021; ASUE, 2011; U.S. EPA., 1984). En los casos donde se observa la presencia de economías de escala en los costos de capital, se realizan dos alternativas de ajuste: una cuadrática, en la que se captura con mayor precisión el comportamiento de las variables, y una lineal,



donde se compromete la exactitud del ajuste (con coeficientes de Pearson que se reducen de $R^2 = 0.82$ a $R^2 = 0.75$, en promedio) para alcanzar mejores desempeños computacionales en la etapa de solución. Asimismo, se incluyen ecuaciones correspondientes a los costos de transporte y a los ingresos obtenidos por la venta de los productos generados en cada alternativa de tratamiento. Finalmente, como función objetivo se plantea la maximización del valor presente neto (VPN) del proyecto de inversión.

El modelo se evalúa en el departamento General Obligado de la Provincia de Santa Fe, considerando un horizonte temporal de 20 años. Se toma un conjunto de 10 localidades, donde la cantidad de residuos generados varía entre 1.24 y 33.86 toneladas diarias, y es proporcional a la población. A ello se suman 16 establecimientos de engorde a corral, donde el estiércol a tratar varía entre 0.47 y 586.47 toneladas por día, dependiendo de la cantidad de cabezas de ganado.

Al realizar dos ajustes diferentes para las ecuaciones que presentan economías de escala, se tienen dos modelos matemáticos alternativos: un modelo mixto entero cuadrático (MIQCP) y un modelo mixto entero lineal (MILP). Existen, por lo tanto, dos variantes para la solución. En primer lugar, se puede optar por resolver directamente el modelo cuadrático, lo que resulta en elevados tiempos de cómputo, incluso cuando se acepta cierto margen entre la solución encontrada y la mejor solución posible. Por otro lado, es posible resolver el modelo lineal alcanzando rápidamente un resultado óptimo y, a continuación, evaluar la solución encontrada en el modelo cuadrático para asegurar mayor precisión en los costos calculados.

CONCLUSIONES

En la Figura 2 se ilustra la solución obtenida con el modelo MIQCP, donde se propone la DA como la alternativa de tratamiento más conveniente, alcanzando un VPN de $147.6 \cdot 10^6$ USD. Sin embargo, aún después de 9000 segundos de cómputo, el gap de optimalidad es del 3.8%, por lo que se infiere que podrían eventualmente obtenerse aún mayores beneficios. En la Figura 3 se presenta la solución alcanzada con el modelo MILP, con el que se encuentra el óptimo (0% de gap) en 491 segundos de CPU. Nuevamente se selecciona la alternativa de DA, sugiriendo la misma cantidad de plantas de tratamiento y equipos totales, pero con modificaciones en algunos de los puntos de ubicación de las plantas. El VPN conseguido con la red de tratamiento propuesta por el modelo lineal evaluado en el modelo cuadrático es de $147.6 \cdot 10^6$ USD, sin mejoras en el valor de la solución a pesar de una representación un poco más ajustada de las economías de escala consideradas en la formulación MIQCP.

Los resultados muestran que en la zona bajo estudio es posible prescindir de alternativas de tratamiento de residuos menos beneficiosas para el medio ambiente como los rellenos sanitarios y las lagunas aireadas. La solución indica que algunos digestores pueden aprovechar los beneficios de la co-digestión, seleccionando mezclas acordes a la producción conjunta de residuos urbanos y rurales en el área. En otros casos, debido a la mayor cantidad de residuos de *feedlots* en comparación con los urbanos, se procesa el estiércol puro de ganado. La ubicación óptima de los digestores suele ser cerca de las fuentes principales para evitar el costo relacionado con el transporte de residuos. Sin embargo, en algunos casos se envía una baja cantidad de residuos desde fuentes más lejanas para lograr un mejor desempeño en los digestores a través de una relación de mezcla más productiva, logrando una mayor producción de metano.

Finalmente, el caso de estudio demuestra que las aproximaciones cuadráticas no generan mayor impacto en la calidad del diseño obtenido, no siendo posible en este caso incrementar el valor presente neto del plan de inversiones abordando un modelo más preciso. No obstante, resta confirmar si este comportamiento es generalizado, es decir, si no existen ciertos rangos y economías de escala para las cuales esta afirmación sea inválida.

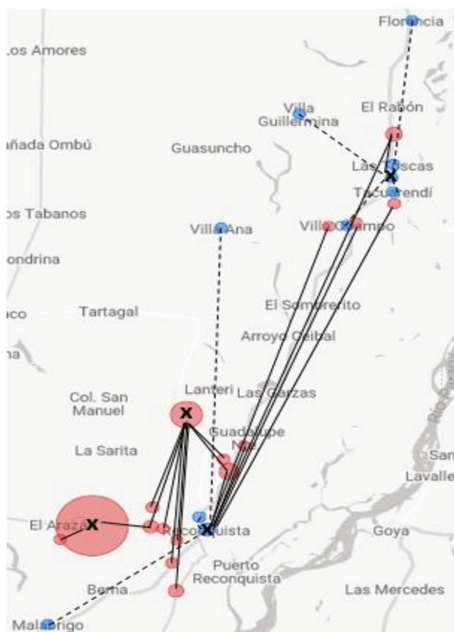


Figura 2: Solución modelo MIQCP.

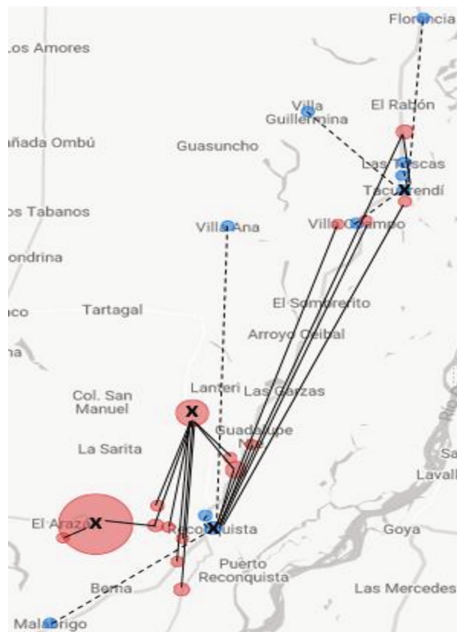


Figura 3: Solución modelo MILP.

Círculos azules: Ciudades. **Círculos rojos:** Feedlots. El tamaño de los círculos es proporcional a la producción diaria de residuos. **X:** Plantas de DA instaladas.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- ASUE, 2011.** BHKW-Kenndaten 2011: Module, Anbieter, Kosten. Stadt Frankfurt am Main. Alemania. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch
- Badgett, A.; Milbrandt, A., 2021.** Food waste disposal and utilization in the United States: A spatial cost benefit analysis. *Journal of Cleaner Production*, 314, 128057.
- Castelao Caruana, M.E., 2018.** Economía y organización de proyectos de generación de bioenergía en feedlots. CONICET – Centro de Estudios Urbanos y Regionales (CEUR), Argentina.
- Keng, Z.X.; Chong, S.; Ng, C.G.; Ridzuan, N.I.; Hanson, S.; Pan, G.T.; Lau, P.L.; Supramaniam, C.V.; Singh, A; Chin, C.F.; Lam, H.L., 2020.** Community-scale composting for food waste: A life-cycle assessment-supported case study. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121220.
- Morero, B; Montagna, A.F.; Campanella, E.A.; Cafaro, D.C., 2020.** Optimal process design for integrated municipal waste management with energy recovery in Argentina. *Renewable Energy*, 146, 2626-2636.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2020.** Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina. Doc. Técnicos N° 19.
- Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA), 2021.** Caracterización de establecimientos de engorde a corral. Dirección Nacional de Sanidad Animal, Argentina.
- Supramaniam, C.V.; Singh, A; Chin, C.F.; Lam, H.L., 2020.** Community-scale composting for food waste: A life-cycle assessment-supported case study. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121220.
- U.S. EPA., 1984.** Handbook: Estimating Sludge Management Costs. EPA/625/6-85/010.
- Xing, B.S.; Cao, S.; Han, Y.; Wen, J.; Zhang, K.; Wang, X.C, 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.