

Gestión Integral Sostenible de Residuos Agroindustriales

A.E. Sorichetti^{1,2[0000-0002-2650-2207]}, M. González Prieto^{1,2,4[0000-0002-9123-5301]}, A.M. Blanco^{3,4[0000-0003-2190-8619]}, A.A. Savoretti^{1,2[0000-0001-5098-8641]}, y M.S. Moreno^{3,4[0000-0001-5744-5586]}

¹ Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, 8000, Argentina

² Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible -CEDETS (UPSO-CIC), Bahía Blanca, 8000, Argentina

³ Planta Piloto de Ingeniería Química-PLAPIQUI (UNS - CONICET), Bahía Blanca, 8000, Argentina

⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
antonela.sorichetti@upso.edu.ar

Resumen. La gestión sostenible de residuos agroindustriales presenta desafíos ambientales, económicos y logísticos. La creciente generación de residuos y su dispersión geográfica dificultan soluciones centralizadas para su gestión, la cual puede verse beneficiada por la adopción de modelos matemáticos y herramientas computacionales para optimizar la infraestructura y la eficiencia del sistema. En este contexto, los modelos de localización de instalaciones, gestión de inventarios y ruteo de vehículos son clave para mejorar la logística de recolección, reducir costos y minimizar el impacto ambiental. Esta investigación integra modelos de optimización, Sistemas de Información Geográfica (SIG) y ciencia de datos para apoyar la toma de decisiones en la localización de plantas de tratamiento y valorización de residuos. El estudio se focaliza inicialmente en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, considerando una red integrada de generación, acopio, reciclaje y tratamiento de residuos (incineración, pirólisis, biogás, compostaje, entre otros). Se busca minimizar costos, reducir la huella de carbono y maximizar el impacto social mediante el desarrollo de modelos matemáticos y el análisis espacial con SIG. Los resultados preliminares sobre la logística inversa para el caso particular de envases vacíos de fitosanitarios muestran un potencial de mejora significativa en eficiencia, reducción de costos y emisiones de CO₂. La integración de estas herramientas permite diseñar estrategias adaptadas a condiciones locales. Futuras líneas de trabajo incluyen la aplicación de esta metodología a otros residuos y regiones, fortaleciendo la sostenibilidad agroindustrial y la economía circular.

Palabras clave: Sostenibilidad, Gestión de Residuos Agroindustriales, Programación Matemática.

Sustainable Integrated Management of Agro-industrial Waste

Abstract. The sustainable management of agro-industrial waste presents environmental, economic, and logistical challenges. The increasing waste generation and its geographical dispersion hinder centralized management solutions, which could benefit from adopting mathematical models and computational tools to optimize the infrastructure and efficiency of the management system. In this context, facility location, inventory management, and vehicle routing models are key to improving collection logistics, reducing costs, and minimizing environmental impact. This research integrates optimization models, Geographic Information Systems (GIS), and data science to support decision-making in the location of treatment and recovery plants. The study initially focuses on the southwest of the Buenos Aires province, considering an integrated network of waste generation, collection, recycling, and treatment (incineration, pyrolysis, biogas, composting, among others). The objective is to minimize costs, reduce the carbon footprint, and maximize social impact through the development of mathematical models and spatial analysis with GIS. Preliminary results on reverse logistics for empty pesticide containers show significant improvements in efficiency, cost reduction, and CO₂ emissions. The integration of GIS and mathematical models allows for the design of strategies tailored to local conditions. Future lines of work include applying this methodology to other waste products and regions, strengthening agro-industrial sustainability and the circular economy.

Keywords: Sustainability, Agro-industrial Waste Management, Mathematical Programming.

1 Motivación y relevancia

Argentina produce alrededor del 5% del total de granos del mundo, lo que representa casi 125 millones de toneladas de cereales y oleaginosas¹. En particular, la producción agropecuaria de la provincia de Buenos Aires abarca una amplia variedad de cultivos, como soja, maíz, trigo y girasol, entre otros, así como la ganadería, con la cría de ganado bovino y ovino. Los desechos orgánicos que se generan a partir de estas actividades (He et al., 2019 y Koul et al., 2022) y los residuos sólidos asimilables a urbanos (de Moraes Lima et al., 2018; Mihai, 2018; Pöldnürk, 2015) son los residuos agroindustriales más estudiados en la literatura. Sin embargo, las actividades agrícolas, ganaderas y el sector agroindustrial generan otros tipos de residuos menos investigados, provenientes del uso de insumos, maquinaria y equipamiento empleados para el desarrollo de dichas actividades. Algunos ejemplos son los Envases Vacíos de Fito-

¹ <https://bit.ly/43m6yjO>

sanitarios (EVFs), los neumáticos fuera de uso, así como distintos metales, líquidos químicos y patógenos.

Aunque cada uno de estos residuos tiene asociada una tasa de generación, distribución geográfica y temporalidad específicas, que impactan de forma directa sobre su gestión, todos comparten un problema común: la logística. Por otro lado, es vital fomentar la colaboración entre municipios ya que esto hace factible ciertas alternativas de procesamiento de residuos en estas áreas de baja densidad de generación. Aun así, el reciclado puede no ser la solución óptima en los casos en los que los costes de transporte son elevados, falta infraestructura o el mercado del reciclado está poco desarrollado (Veiga, 2013). En este contexto, resulta importante contar con herramientas que permitan cuantificar y evaluar, sistemática y simultáneamente, los aspectos económicos, ambientales y sociales de la gestión de los residuos agroindustriales y que se pueda aplicar a toda la región bajo estudio.

El presente trabajo se enmarca en una línea de investigación orientada al desarrollo de herramientas computacionales avanzadas para asistir en el proceso de toma de decisiones relacionadas con la gestión de residuos agroindustriales. El objetivo es integrar diversas fuentes de datos, aplicar modelos matemáticos de optimización y utilizar SIG para diseñar estrategias que minimicen el impacto ambiental y maximicen la eficiencia en la valorización de residuos. Para ello, se prevé desarrollar modelos de optimización basados, por ejemplo, en programación matemática, para determinar la ubicación óptima de centros de acopio y plantas de valorización. Se consideran parámetros típicos como ser volúmenes de generación de residuos, costos de transporte y restricciones normativas, y se procura establecer capacidades de almacenamiento y procesamiento a instalar y transporte óptimo entre los diferentes nodos.

El enfoque se basa en tres pilares: 1) Modelos de localización-asignación para determinar la mejor distribución de centros de acopio y plantas de tratamiento. 2) Análisis de economía de escala, evaluando costos decrecientes en función del tamaño de las plantas de tratamiento. 3) Estrategias de regionalización, identificando zonas óptimas para la concentración y distribución de residuos en función de su origen y tipo. Se pretende desarrollar herramientas computacionales integradas como la que se muestra en la Fig. 1.



Fig. 1. Esquema general del desarrollo de herramientas para la gestión de residuos agroindustriales.

1.1 Herramientas y metodología de implementación

La propuesta se apoya en el desarrollo de modelos de optimización formulados mediante programación matemática, utilizando el software GAMS (General Algebraic Modeling System). Se modelarán decisiones de localización-asignación de infraestructuras, flujos de transporte y selección de tecnologías de tratamiento mediante variables binarias y continuas, bajo restricciones operativas, normativas y ambientales. La función objetivo tiene un enfoque multiobjetivo, que contempla la maximización de la valorización de residuos, la minimización de los costos totales y la reducción de impactos ambientales asociados a la logística y el tratamiento.

La representación espacial de la red y el análisis territorial se realizará mediante QGIS, un sistema de información geográfica que permitirá integrar datos georreferenciados sobre generación, rutas disponibles, distancias, límites administrativos y ubicación potencial de centros de acopio y tratamiento. Esta integración facilita la visualización de resultados y el diseño de estrategias adaptadas a las condiciones locales.

La metodología de implementación contempla: (1) recolección y sistematización de datos primarios y secundarios; (2) formulación y resolución del modelo de optimización; (3) análisis espacial con SIG; (4) evaluación de escenarios de gestión y validación con casos reales; y (5) adaptación del modelo a nuevos residuos y regiones. Esta integración de herramientas permite cuantificar impactos, evaluar alternativas y aportar soluciones concretas para una gestión sustentable de los residuos agroindustriales.

2 Resultados preliminares y acciones futuras

Hasta el momento, se ha abordado el problema de un único residuo agroindustrial: los EVFs. Los resultados preliminares indican que la optimización de la logística de recolección y tratamiento puede reducir significativamente tanto los costos operativos y las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se han implementado herramientas SIG que permiten visualizar la distribución espacial de los residuos y evaluar distintos escenarios de gestión.

El trabajo futuro se enfocará en la ampliación y validación de los modelos desarrollados, incorporando nuevas variables y mejorando la precisión de las predicciones. Asimismo, se continuará con la recopilación de datos en distintos municipios para mejorar la solución del modelo.

En primera instancia, se extenderá el desarrollo propuesto en Sorichetti et al., (2024) para EVFs (Fig. 2) mediante la incorporación al modelo de una mayor variedad de envases que los considerados actualmente, tanto para los EVFs rígidos de polietileno de alta densidad que pueden reciclarse (Tipo A), como para las cajas de cartón y bolsas de polietileno de baja densidad que no son reciclables (Tipo B). Dado que estos residuos siguen rutas de procesamiento distintas, una segunda mejora al modelo consiste en la posibilidad de seleccionar distintas alternativas de tratamiento para cada uno. El desarrollo resultante permitirá elegir el tipo de procesamiento a aplicar a los residuos (reciclado mecánico, pirólisis y/o incineración). Además, no solo se procurará minimizar los costos totales, sino que también se pretende reducir tanto los riesgos

asociados a las instalaciones y al transporte, como las emisiones de CO₂. Posteriormente, se buscará replicar esta metodología con EVFs en otros tipos de residuos agroindustriales, como ser neumáticos fuera de uso, residuos orgánicos, entre otros.

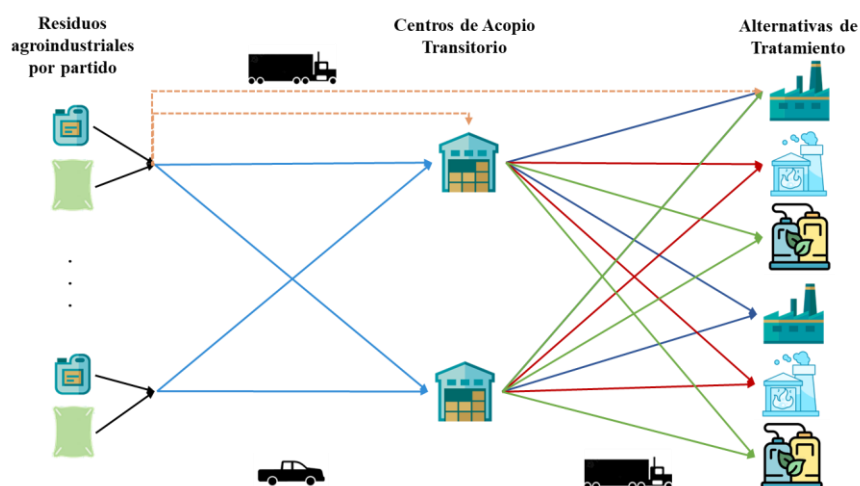


Fig. 2. Esquema general de la red de logística inversa propuesta para la gestión de residuos agroindustriales: aplicación a EVFs.

Referencias

- de Moraes Lima, P., Paulo, P.L. (2018). Solid-waste management in the rural area of BRAZIL: a case study in Quilombola communities. *J Mater Cycles Waste Manag* 20, 1583–1593. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0722-9>
- He, K., Zhang, J., Zeng, Y. (2019). Knowledge domain and emerging trends of agricultural waste management in the field of social science: A scientometric review, *Sci. Total Environ.* 670, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.184>
- Koul, B., Yakoob, M., Shah, M.P. (2022). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability, *Environ. Res.* 206, 112285. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285>
- Mihai, F.C. (2018). Waste collection in rural communities: challenges under EU regulations. A case study of Neamt County, Romania, *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 20, 1337–1347. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0637-x>
- Pöldnürk, J. (2015). Optimisation of the economic, environmental and administrative efficiency of the municipal waste management model in rural areas, *Resour. Conserv. Recycl.* 97, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.003>
- Sorichetti, A.E., González Prieto, M., Savoretti, A.A. et al. (2024). Reverse logistics for empty pesticide containers: optimal design for sustainable management over wide areas. *Environ Dev Sustain* (2024). <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05374-y>
- Veiga, M.M. (2013). Analysis of efficiency of waste reverse logistics for recycling, *Waste Manag. Res. J. a Sustain. Circ. Econ.* 31, 26–34. <https://doi.org/10.1177/0734242X13499812>