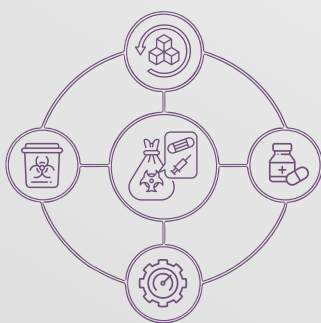




Logística inversa de **RESIDUOS MÉDICOS:**

Uso de investigación de operaciones en computación

REVERSE LOGISTICS OF MEDICAL WASTE: USE OF
OPERATIONS RESEARCH IN COMPUTER SCIENCE

SENNOVA

Sistema de Investigación,
Desarrollo Tecnológico e Innovación

Mg.Ing. Manuel Méndez Flórez

Tecnológico de Costa Rica
manmendez@itcr.ac.cr



Est. Santiago Castrillo Moncada

Tecnológico de Costa Rica
santiagocastrillo43@gmail.com



Est. Ana Laura Mora Arias

Tecnológico de Costa Rica
ana.moraar2@gmail.com



Est. José Andrés Vargas Serrano

Tecnológico de Costa Rica
jose.vargasser18@gmail.com



Est. Derinia Zhang Gu

Tecnológico de Costa Rica
deriniashanggu@gmail.com



Palabras clave: desechos sanitarios, logística inversa, modelo matemático, optimización, residuos médicos.

1.1. Abstract

Reverse logistics has emerged as a practice that responds to the growing need to improve the way in which waste generated in different industries is managed, whether for economic, environmental or legal reasons. In the case of medical waste, particular care must be taken due to its hazardous nature, so proper management of this type of waste not only has economic and environmental implications, but also safety implications. This article develops a literature review to identify and synthesize the main solutions proposed in reverse logistics processes related to this type of waste, as well as the proposed mathematical models and their main considerations.

The review showed an increase in the publication of articles on this topic after the COVID-19 pandemic and identified that Mixed Integer Linear Programming (MILP) is the predominant technique to address the creation of reverse logistics networks in this field, which requires optimal planning to collect, separate, treat, recycle and dispose of medical waste.

Keywords: healthcare waste, reverse logistics, mathematical model, optimization, medical waste.

2. Introducción

Las prácticas amigables con el medio ambiente dentro de todas las áreas de producción han ido aumentando en los últimos años, ya sea por presiones sociales o legislaciones aprobadas en distintos países. Un informe del United Nations Environment Programme (UNEP, 2024) estima que la cifra de residuos sólidos urbanos generados anualmente pasará de 2.300 millones de toneladas en el año 2023 a 3.800 millones de toneladas para el año 2050. Esta cantidad inmensa de residuos ha impulsado la adopción de diferentes estrategias que permitan gestionarlos de una manera más

1. Resumen

La logística inversa ha surgido como una práctica que responde a la necesidad creciente de mejorar la manera en que se gestionan los residuos generados en distintas industrias, ya sea por motivos económicos, ambientales o legales. En el caso de los residuos médicos se debe tener particular cuidado debido a su naturaleza peligrosa, por lo que una gestión adecuada de este tipo de residuos no solamente tiene implicaciones económicas y ambientales, sino también de seguridad. El presente artículo desarrolla una revisión literaria para identificar y sintetizar las principales soluciones propuestas en los procesos de logística inversa relacionada a este tipo de desechos, así como los modelos matemáticos propuestos y sus principales consideraciones.

La revisión mostró un aumento en la publicación de artículos sobre este tema después de la pandemia de COVID-19 y se identificó que la Programación Lineal Entera Mixta (MILP, por sus siglas en inglés) es la técnica predominante para abordar la creación de redes de logística inversa en este ámbito, el cual requiere una planificación óptima para recolectar, separar, tratar, reciclar y desechar residuos médicos.

sostenible, entre las cuales se encuentra la logística inversa.

Sin embargo, los residuos urbanos, que consisten en desechos producidos desde un entorno doméstico hasta aquellos generados por pequeñas empresas y proveedores de servicios (UNEP, 2024), no son la única fuente de restos que han generado preocupación ambiental y económica. Entre otros tipos se pueden incluir los desperdicios agrícolas, industriales y, los que son el enfoque de esta revisión literaria, los residuos sanitarios.

La agencia U.S. Environmental Protection Agency (2024) define los residuos médicos o sanitarios como desechos producidos en lugares de atención sanitaria, los cuales incluyen hospitales, consultorios médicos, bancos de sangre, clínicas dentales o laboratorios, entre otros. Dado el total de desperdicios sanitarios producidos, se calcula que un 15% son materiales que pueden resultar infecciosos, tóxicos o radioactivos (World Health Organization, 2018) y gestionarlos adecuadamente es de suma importancia para no exponer a los trabajadores de esta área y a la sociedad en general a un gran peligro.

Como fue mencionado anteriormente, la logística inversa es una de las prácticas que responde a la necesidad creciente de gestionar de una mejor manera los residuos generados en distintas industrias. En general, se puede decir que esta consiste en un proceso que incluye una etapa de recolección de los productos usados, luego la clasificación de estos para determinar su estado y finalmente el procesamiento de los materiales, el cual puede involucrar actividades como reutilización, reacondicionamiento, recuperación de piezas o eliminación de desechos (Barker; Zabinsky, 2008).

Por otra parte, la logística inversa que involucra residuos médicos puede ser particularmente retadora debido a la naturaleza peligrosa que estos desperdicios podrían presentar. Es por esta razón que en el presente artículo se pretende realizar una revisión de literatura enfocada en identificar las principales soluciones propuestas en los

procesos de logística inversa relacionada a residuos médicos. El objetivo es proporcionar una visión de los métodos actuales utilizados para optimizar la gestión de este tipo de residuos y sus principales consideraciones.

El resto del artículo presenta la siguiente estructura: en la sección 2 se describe la metodología utilizada, luego se presentan los principales hallazgos en la sección 3 y en la sección 4 se incluyen las conclusiones basadas en los resultados de la revisión literaria.

3. Metodología

El presente artículo presenta una revisión literaria sistemática sobre el tema de logística inversa en la gestión de residuos médicos, con el propósito de sintetizar el conocimiento en este campo que se relaciona con la investigación de operaciones y la computación. La búsqueda y selección de literatura para llevar a cabo esta revisión se describe a continuación.

3.1. Estructura de la búsqueda bibliográfica.

Uno de los puntos más importantes fue determinar las bases de datos que se iban a consultar para la búsqueda de la literatura debido a la necesidad de acceder a trabajos de alta calidad, por lo que se decidió hacer uso de bases de datos de renombre como Web of Science y Scopus.

Luego de elegir las bases de datos por consultar, se realizó una búsqueda para encontrar el material necesario en la cual se utilizaron las palabras clave “reverse logistics” y “medical waste”, además se especificó que los años de publicación de los resultados debían estar en el rango de 2016-2024 (incluidos).

3.2. Criterios de selección.

Para que fuera seleccionado, un artículo debía:

1. Ser de acceso libre dentro de las bases de datos Web of Science y Scopus.
2. Haber sido publicado en una revista revisada por pares.

3. Abordar directamente temas relacionados con la logística inversa en la gestión de residuos médicos.

4. Presentar un modelo matemático para optimizar algún aspecto de la gestión de logística inversa en el área de residuos médicos.

5. Presentar un caso de estudio en el que ponga a prueba el modelo matemático.

3.3. Método para la evaluación de la calidad de los artículos seleccionados.

La búsqueda inicial en Web of Science y Scopus dio como resultado 68 y 53 artículos, respectivamente. Tras descartar aquellos que no eran de acceso libre, estos números disminuyeron a 41 artículos en Web of Science y 28 artículos en Scopus. La información básica de cada artículo fue organizada en una hoja de cálculo para proceder con la fase de evaluación. Esta evaluación se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. Identificación de duplicados: Entre los resultados de ambas bases de datos habían 21 en común, por lo que en total se debían evaluar 48 trabajos distintos.

2. Primera etapa de descarte: Se realizó una revisión de los títulos, resúmenes y palabras clave de los artículos. Este proceso permitió identificar rápidamente aquellos artículos que no estaban relacionados con el tema de la revisión, tras lo cual se descartaron 9 artículos.

3. Evaluación detallada: Los 39 artículos que superaron la primera etapa de descarte fueron sometidos a una lectura completa para verificar que cumplieran con el resto de los criterios de selección, tras lo que se seleccionaron 15 artículos.

3.4. Análisis de la variabilidad, fiabilidad y validez de los artículos.

La variabilidad de los artículos seleccionados fue evaluada en términos de

los enfoques metodológicos empleados, el país de los autores o instituciones asociadas al artículo y los aspectos específicos de la logística inversa que cada artículo abordaba.

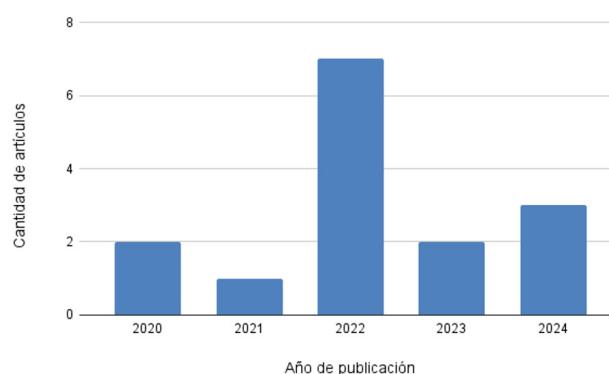
Para evaluar la fiabilidad de los artículos se evaluó la revista en la cual se habían publicado, se examinó si los trabajos proporcionaban suficientes detalles metodológicos y se consideró la presencia o ausencia de declaraciones de conflictos de interés.

La validez de los artículos seleccionados fue evaluada según la adecuación de los métodos y modelos para resolver el problema planteado. Además, se evaluó la aplicabilidad de los resultados a otros contextos o situaciones fuera de los escenarios presentados en los casos de estudio.

4. Desarrollo y discusión

A través del análisis de los artículos seleccionados se encontró que la mayoría de los estudios desarrollaban sus modelos en un contexto de emergencia sanitaria. Este enfoque se dio principalmente como una respuesta a la situación vivida con la pandemia de COVID-19, donde el volumen de residuos producidos y la presión sobre los sistemas de salud pusieron en evidencia la necesidad de optimizar la logística inversa de residuos médicos. En la Figura 1 se puede observar la cantidad de artículos que fueron publicados por año, según los que fueron incluidos en la revisión.

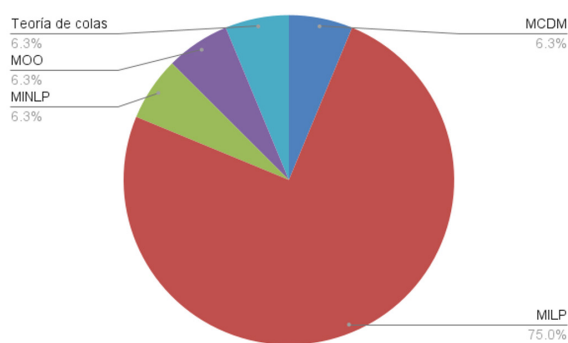
Figura 1.
Número de artículos publicados por año que fueron incluidos en la revisión



Nota. Elaboración propia.

En cuanto a los modelos matemáticos, se encontró que la técnica más usada para desarrollar las redes de logística inversa era la Programación Lineal Entera Mixta (MILP), con la que normalmente se buscaba minimizar costos y, dependiendo del modelo, también se buscaba optimizar otros aspectos, principalmente el riesgo de exposición a residuos médicos infecciosos (IMW, por sus siglas en inglés). En la Figura 2 se observa el porcentaje de modelos que usaron determinadas técnicas, entre las cuales están la Programación No Lineal Entera Mixta (MINLP), Análisis de Decisiones con Criterios Múltiples (MCDM) u Optimización Multiobjetivo (MOO).

Figura 2.
Técnicas utilizadas en los modelos matemáticos



Nota. Elaboración propia.

Además, se identificó que las estructuras de redes de logística inversa que tratan con residuos médicos deben considerar la recolección, el tratamiento, el desecho y el reciclaje, en caso de que este último sea posible por la naturaleza de los residuos. Otras de las características que se deben considerar en el área de logística inversa con desechos sanitarios se exponen a continuación.

4.1. Tiempos de espera.

Un aspecto importante a la hora de tratar residuos médicos son los tiempos de espera, debido a que estos tipos de residuos no deben ser almacenados o estar en contacto con personas por mucho tiempo. En el caso de Govindan et al. (2022) desarrollaron un modelo que no solamente utiliza MILP, sino que incluye teoría de colas con un sistema

M/M/c para gestionar el tiempo de espera de los camiones que transportan IMW cuando llegan a los centros de tratamiento. Por su parte, uno de los tres objetivos del modelo MINLP propuesto por Mei et al. (2022) era minimizar el tiempo para desechar los residuos en una red de reciclaje durante una epidemia, este modelo considera los cuellos de botella que se generan cuando la cantidad de residuos médicos excede la capacidad de eliminación de los centros existentes.

4.2. Instalaciones temporales.

Los artículos que trabajaban modelos bajo emergencias sanitarias públicas suelen coincidir en la necesidad de instalaciones temporales, ya sea para el tratamiento o para el desecho de los residuos. Por ejemplo, el modelo MILP de Kargar et al. (2020) consideraba el costo de instalación de centros de tratamiento de residuos temporales, además de la operación de los centros existentes y temporales para minimizar el costo de la logística inversa. En el caso de Yu et al. (2020) presentaron un modelo MILP que buscaba optimizar la ubicación de instalaciones temporales y las estrategias de transporte. Entre los costos considerados incluyeron el costo de asentamiento de instalaciones temporales para tratar los residuos y su costo de operación.

Similarmente, Zhao et al. (2021) propusieron un modelo MILP robusto bi-objetivo para gestionar los IMW donde consideran gastos en la ubicación de instalaciones temporales. Por su parte, Luo y Liao (2022) presentaron un modelo MILP que introduce centros de procesamiento móviles (MPC) para cambiar de manera flexible el diseño de la red de logística inversa, debido a la impredecibilidad de una epidemia. En el caso de Xue et al. (2023) desarrollaron un diseño de una arquitectura con tres módulos con una clasificación y monitoreo en la selección de sitios de almacenamiento.

4.3. Predicción de residuos generados.

Un punto complicado en los modelos de logística inversa que gestionan residuos

médicos es determinar la cantidad de residuos que serán generados, especialmente si se trata de una situación como una epidemia. Por este motivo, se observó el uso de enfoques estocásticos para lidiar con la incertidumbre, como en el caso de Govindan et al. (2022).

Esto también sucedió con el modelo de Govindan et al. (2024) que buscaba estructurar una red inversa resiliente para la gestión de los desechos sanitarios en casos de crisis sanitarias y con Morjéne et al. (2022), cuyo modelo MILP desarrollaba una red de logística inversa para mascarillas desechables durante un brote epidémico. En el caso de Nosrati-Abarghooee et al. (2023) usaron un modelo MILP bi-objetivo para determinar el manejo de desperdicios médicos bajo situaciones de incertidumbre y de interrupciones epidémicas. Por otro lado, Zhu et al. (2024) utilizaron un modelo predictivo de residuos basado en la dinámica SEIR para su modelo de logística inversa que usa enrutamiento de ubicación multiobjetivo.

4.4. Consideraciones ambientales.

Cao et al. (2024) plantearon un problema de optimización de la ubicación y transporte de desechos médicos en desastres de múltiples tipos y múltiples períodos con un enfoque en la sostenibilidad, debido a las consecuencias relacionadas al aumento de la producción de desechos médicos durante el COVID-19. Uno de los tres objetivos era minimizar las emisiones totales de carbono por el transporte de desechos médicos de un desastre por cada periodo, además de maximizar los beneficios totales y minimizar los riesgos sociales potenciales al exponer a las personas a IMW.

En el caso de Balci et al. (2022) diseñaron una red de logística inversa para gestionar eficazmente los desechos médicos en Estambul durante la pandemia de COVID-19 y la próxima década, en el cual su modelo MILP considera las emisiones de carbono de los transportes necesarios y busca equilibrar objetivos económicos, sociales y ambientales.

4.5. Otros casos.

Sar y Ghadimi (2022) desarrollaron un modelo MILP en el cual se enfoca la logística inversa en el manejo de residuos médicos de hogares y la maximización de la recolección de desperdicios. Por otro lado, el modelo propuesto por Wang et al. (2024) se diferencia del resto puesto que se centran en el uso de métodos como Best-Worst con programación lineal para la identificación y evaluación de riesgos que pueden aparecer en el proceso de logística inversa y cómo estos pueden afectar en varias áreas como la económica, social, política, entre otras.

5. Conclusiones

Por medio de los artículos a los que se tuvo acceso en esta revisión literaria se identificó una falta de modelos enfocados en la logística inversa de residuos médicos bajo contextos fuera de emergencias sanitarias, debido a que una abrumante mayoría de artículos se enfocaban en situaciones como epidemias. Sin embargo, la tendencia creciente en publicación de artículos sobre este tema demuestra una necesidad del desarrollo apropiado de una red de logística inversa de residuos sanitarios.

Se llegó a la conclusión de que la Programación Lineal Entera Mixta es una de las técnicas más apropiadas para la optimización de estas redes, en donde los principales objetivos suelen ser minimizar costos y minimizar el riesgo asociado al manejo de IMW. Además, se identificó la importancia de minimizar el tiempo que se dura en tratar o desechar los residuos, debido al peligro de exponer a las personas a estos desperdicios, así también como optimizar la ubicación de los centros temporales de tratamiento o recolección y minimizar las emisiones de carbono por el transporte y operación de los centros.

6. Referencias Bibliográficas

- Balci, E., Balci, S., & Sofuoglu, A. (2022).** Multi-purpose reverse logistics network design for medical waste management in a megacity: Istanbul, Turkey. *Environment Systems and Decisions*, 42(3). <https://doi.org/10.1007/s10669-022-09873-z>
- Barker, T. J., & Zabinsky, Z. B. (2008).** Reverse logistics network design: A conceptual framework for decision making. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(4). <https://doi.org/10.1080/19397030802591196>
- Cao, C., Li, J., Liu, J., Liu, J., Qiu, H., & Zhen, J. (2024).** Sustainable development-oriented location-transportation integrated optimization problem regarding multi-period multi-type disaster medical waste during COVID-19 pandemic. *Annals of Operations Research*, 335(3). <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04820-2>
- Govindan, K., Fard, F. S. N., Asgari Fahimeh and Sorooshian, S., & Mina, H. (2024).** Designing a resilient reverse network to manage the infectious healthcare waste under uncertainty: A stochastic optimization approach. *COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110390>
- Govindan, K., Nosrati-Abarghoee, S., Nasiri, M. M., & Jolai, F. (2022).** Green reverse logistics network design for medical waste management: A circular economy transition through case approach. *Journal of Environmental Management*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115888>
- Kargar, S., Pourmehdi, M., & Paydar, M. M. (2020).** Reverse logistics network design for medical waste management in the epidemic outbreak of the novel coronavirus (COVID-19). *Science of the Total Environment*, 746. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141183>
- Luo, X., & Liao, W. (2022).** Collaborative Reverse Logistics Network for Infectious Medical Waste Management during the COVID-19 Outbreak. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15). <https://doi.org/10.3390/ijerph19159735>
- Mei, X., Hao, H., Sun, Y., Wang, X., & Zhou, Y. (2022).** Optimization of medical waste recycling network considering disposal capacity bottlenecks under a novel coronavirus pneumonia outbreak. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(53). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16027-2>
- Morjéne, Y., Ndhafie, N., & Rezg, N. (2022).** Optimization of production batches in a circular supply chain under uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.651>
- Nosrati-Abarghoee, S., Sheikhalishahi, M., Nasiri, M. M., & Gholami-Zanjani, S. M. (2023).** Designing reverse logistics network for healthcare waste management considering epidemic disruptions under uncertainty. *Applied Soft Computing*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110372>
- Sar, K., & Ghadimi, P. (2022).** Designing reverse logistics network for a case study of home-care health medical device waste management: Implications for Industry 4.0 supply chains. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.213>
- United Nations Environment Programme. (2024).** Global Waste Management Outlook 2024 - Beyond an age of waste: Turning rubbish into a resource. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2024).** Medical Waste. EPA. <https://www.epa.gov/rcra/medical-waste>

Wang, X., Liu, L., Wang, L., Cao, W., & Guo, D. (2024). An application of BWM for risk control in reverse logistics of medical waste. *Frontiers in Public Health*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1331679>

World Health Organization. (2018, February 8). Health-care waste. World Health Organization. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste>

Xue, C., Dong, Y., Liu, J., Liao, Y., & Li, L. (2023). Design of the Reverse Logistics System for Medical Waste Recycling Part I: System Architecture and Disposal Site Selection Algorithm. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*. <https://doi.org/10.1109/ITSC57777.2023.10422624>

Yu, H., Sun, X., Solvang, W. D., & Zhao, X. (2020). Reverse logistics network design for effective management of medical waste in epidemic outbreaks: Insights from the coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak in Wuhan (China). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5). <https://doi.org/10.3390/ijerph17051770>

Zhao, J., Wu, B., & Ke, G. Y. (2021). A bi-objective robust optimization approach for the management of infectious wastes with demand uncertainty during a pandemic. *Journal of Cleaner Production*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127922>

Zhu, L., Ding, T., & Liu, Z. (2024). Reverse Logistics Network Design for Medical Waste Disposal under the Scenario of Uncertain Proposal Demand. *SUSTAINABILITY*, 16(7). <https://doi.org/10.3390/su16072996>

Fecha de recepción: 26/11/2024

Fecha de aceptación: 27/05/2025