

Gestión de residuos médicos. Una revisión sistemática de la literatura

Camilo Pineda Barroso

Ivan Dario Garcia Garcia

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Industrial

Director

Javier Eduardo Arias Osorio

Magíster en Administración

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

2025

Dedicatoria

En primer lugar, a Dios por brindarme la fortaleza, la sabiduría y las capacidades necesarias para alcanzar este importante objetivo. A mi madre y a mi abuela, por su apoyo constante, especialmente en los momentos más difíciles, brindándome ánimo e impulsándome a no desistir, convirtiéndose en mi mayor motivación para seguir adelante y mantener este proyecto como una prioridad.

A mi compañera de vida, por estar siempre a mi lado, compartirme sus experiencias, ser mi guía y un apoyo fundamental en cada etapa de este proceso. A todos mis docentes, quienes con su dedicación y conocimiento contribuyeron de manera significativa a mi formación académica. A mis compañeros, por su colaboración y por los valiosos aprendizajes que compartimos mutuamente a lo largo de este camino.

Camilo Pineda Barroso

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, quien me ha dado la fortaleza, la sabiduría y la oportunidad de llegar hasta aquí. Su guía ha sido mi luz en los momentos de oscuridad y su amor me ha impulsado a seguir adelante. A mi madre y a mi abuela, quienes han sido mi roca y mi mayor fuente de inspiración. Gracias por su amor incondicional, su apoyo constante y sus palabras que me han motivado a nunca rendirme.

A todos los docentes que, con su dedicación y compromiso, dejaron una huella profunda en mi vida. Cada uno de ellos me brindó no solo conocimiento, sino también ejemplos de esfuerzo y superación que me acompañarán siempre. Y, por supuesto, a mis compañeros, que fueron parte de este proceso y de mi crecimiento. Juntos compartimos esfuerzos, desafíos y aprendizajes que me marcaron para siempre.

Iván Darío García García

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a la Universidad Industrial de Santander, por abrirme las puertas y permitirme ser parte de esta gran institución, brindándome la oportunidad de formarme profesional y personalmente, y hacer posible la culminación de una de las metas más importantes de mi vida. A mi director de trabajo de grado, por su valiosa orientación, acompañamiento y guía durante todo el desarrollo de este proyecto, aportando sus conocimientos y experiencia para lograr su correcta ejecución. A mi familia, por su apoyo incondicional, su paciencia y por ser siempre mi mayor fuente de motivación para continuar avanzando. A mi compañero de trabajo, por su compromiso, dedicación y trabajo en equipo, fundamentales para el logro de los objetivos propuestos. Finalmente, expreso mi gratitud a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de este proyecto y al cumplimiento de este importante logro académico.

Camilo Pineda Barroso

Agradezco profundamente a Dios por darme fortaleza, sabiduría y la oportunidad de llegar hasta aquí. Su guía me ha dado la paz y perseverancia necesarias para superar cada reto. A mi madre y a mi abuela, por su apoyo incondicional, amor y motivación en todo momento. A la UIS por brindarme un espacio de aprendizaje tan enriquecedor, que me ha permitido crecer académica y personalmente. Mi sincero agradecimiento a mi director de proyecto, por su invaluable orientación y apoyo constante a lo largo de este proceso. También quiero agradecer a mi compañero de trabajo de grado, por su colaboración y esfuerzo conjunto, fundamentales para lograr este objetivo. Finalmente, agradezco al grupo Ópalo, por su ayuda y compromiso en la guía de este proyecto, que ha sido clave para su desarrollo.

Iván Darío García García

Tabla de contenidos

Introducción	12
1. Generalidades del Proyecto	16
1.1. Planteamiento del problema.....	16
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1. Objetivo general	17
1.2.2. Objetivos específicos.....	18
1.2.3. Actividades	18
2. Revisión de literatura	20
2.1 Marco teórico	20
2.1.1 Gestión de Residuos Médicos	20
2.1.1.1 Clasificación y Tipos de Residuos Médicos.....	20
2.1.1.2 Pasos en la Gestión de Residuos.....	22
2.1.2 Cadena de Suministro.....	22
2.1.2.1 Estructura de la cadena de suministro	23
2.1.2.2 Gestión de la Cadena de Suministro.....	24
2.1.2.3 Evolución hacia la Cadena de Suministro Sostenible	25
2.1.2.4 Cadena de Suministro Verde	26
2.1.2.5 Cadena de Suministro de Ciclo Cerrado.....	26
2.1.2.6 Cadena de Suministro del Cuidado de la Salud.....	27
2.1.2.7 Componentes de la Cadena de Suministro del Cuidado de la Salud	28

2.1.2.8 Flujos en la Cadena de Suministro del Cuidado de la Salud	29
2.1.2.9 Gestión de Residuos en la Cadena de Suministro del Cuidado de la Salud	30
2.1.2.10 Enfoque de Economía Circular en la Gestión de Residuos Médicos	31
2.1.2.11 Herramientas Cuantitativas en la Gestión de Residuos Médicos	32
2.1.3 Revisión Sistemática	32
2.1.3.1 Metodologías para Revisiones Sistemáticas.....	33
2.1.3.1.1 Cochrane Collaboration.....	33
2.1.3.1.2 Joanna Briggs Institute (JBI)	34
2.1.3.1.3 Campbell Collaboration.....	34
2.1.3.1.4 PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)	35
2.1.3.1.5 GRADE (Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation).....	35
2.1.3.1.6 RAMESES (Realist And Meta-narrative Evidence Syntheses: Evolving Standards)	35
2.1.3.2 Fundamentos y Estructura de PRISMA.....	35
2.1.3.3 Proceso Metodológico de PRISMA	37
2.1.3.3.1 Formulación de la Pregunta de Investigación.....	37
2.1.3.3.2 Desarrollo del Protocolo.....	37
2.1.3.3.3 Búsqueda Exhaustiva de Literatura	37
2.1.3.3.4 Selección de Estudios	38
2.1.3.3.5 Extracción de Datos.....	39

GESTIÓN DE RESIDUOS MÉDICOS	6
2.1.3.3.6 Evaluación de Calidad y Riesgo de Sesgo.....	39
2.1.3.3.7 Síntesis de Resultados	40
2.1.3.3.8 Presentación e Interpretación de Resultados	40
2.2 Marco de antecedentes	40
2.3 Revisión Sistemática de la Literatura.....	42
2.3.1 Ecuación de búsqueda	42
2.3.2 Revisión de la literatura gris	42
2.3.3 Selección de la base de datos.....	44
2.3.4 Definición de criterios para el análisis de la revisión de literatura.....	44
2.3.5 Prototipo y formulación de la ecuación de búsqueda.....	46
2.4 Análisis bibliométrico	48
2.4.1 Comparación.....	59
3. Metodología PRISMA	61
3.1 Planteamiento de pregunta de investigación	61
3.2 Desarrollo del Protocolo.....	62
3.3 Búsqueda Exhaustiva de Literatura.....	62
3.4 Selección de Estudios.....	63
3.5 Extracción de Datos	64
3.6 Evaluación de Calidad.....	65
3.7 Síntesis de Resultados	65
3.7.1 Grupo 1: Optimización Logística.....	69

3.7.1.1 Optimización de localización y ruteo	71
3.7.1.2 Algoritmos bioinspirados aplicados a la optimización logística de residuos médicos.....	74
3.7.1.3 Logística inversa sostenible en la gestión de residuos médicos	75
3.7.2 Grupo 2: Simulación Aplicada.....	76
3.7.2.1 Indicadores de desempeño en la gestión de residuos médicos	77
3.7.2.2 Conocimiento, prácticas y actitudes del personal sanitario en la gestión de residuos médicos.....	79
3.7.2.3 Herramientas de análisis de ciclo de vida (ACV) en la gestión de residuos médicos.....	82
3.7.3 Grupo 3: Fuzzy y evaluación multicriterio	85
3.7.3.1 Optimización logística en la gestión de residuos médicos	85
3.7.3.2 Simulación aplicada a la gestión de residuos médicos	86
3.7.3.3 Evaluación multicriterio y toma de decisiones en la gestión de residuos	86
3.7.4 Grupo 4: Análisis normativo, descriptivo o económico.....	88
3.7.4.1 Introducción al análisis normativo, descriptivo y económico	89
3.7.4.2 Marco normativo de la gestión de residuos médicos.....	90
3.7.4.3 Desafíos económicos en la gestión de residuos médicos	90
3.7.4.4 Economía circular y sostenibilidad en la gestión de residuos médicos.....	91
3.7.4.4.1 Incineración:	92
3.7.4.4.2 Esterilización a vapor:	93
3.7.4.4.3 Bioconversión con larvas (Black Soldier Fly):.....	93

GESTIÓN DE RESIDUOS MÉDICOS	8
3.7.4.4.4 Reciclaje de materiales:	93
3.7.5 Grupo 5: Aplicaciones clínicas y operativas	94
3.7.5.1 Barreras y Facilitadores en la Implementación de la Gestión de Residuos Médicos	94
3.7.5.2 Optimización de la Logística Interna en la Gestión de Residuos	95
3.7.5.3 Capacitación y Cultura Organizacional	95
3.8 Resultados	96
4. Conclusiones	101
5. Recomendaciones	103
6. Clarificación de Decisiones Tomadas.....	104
Referencias bibliográficas.....	108

Lista de tablas

Tabla 1. Cumplimiento de objetivos	15
Tabla 2. Clasificación de residuos médicos según normativa colombiana.....	21
Tabla 3. Criterios de inclusión y exclusión.....	44
Tabla 4. Primera ecuación de búsqueda.....	46
Tabla 5. Segunda ecuación de búsqueda.....	47
Tabla 6. Clasificación de la revisión de la literatura por grupos	67
Tabla 7. Comparativo de estudios sobre indicadores de desempeño	78
Tabla 8. Comparación de estudios que aplican ACV en residuos médicos hospitalarios	83
Tabla 9. Métodos aplicados en la gestión de residuos médicos.....	87
Tabla 10. Comparación de tecnologías de tratamiento y costos asociados	91
Tabla 11. Categorización de los artículos por temas analizados.	99

Lista de figuras

Figura 1.	Publicaciones anuales en Web of sciens	49
Figura 2.	Publicaciones anuales en Scopus	50
Figura 3.	Publicaciones por país y territorio en Web of science treemap	51
Figura 4.	Publicaciones por país y territorio en Scopus	52
Figura 5.	Distribución por área temática en Web of science.....	53
Figura 6.	Distribución por área temática en Scopus.....	54
Figura 7.	Distribución por área temática en Web of science.....	56
Figura 8.	Distribución por área temática en Scopus.....	57
Figura 9.	Diagrama de flujo de Revisión sistemática.....	63
Figura 10.	Diagrama de flujo del modelo de diseño de red logística para residuos médicos.	72
Figura 11.	Modelo de clasificación de residuos médicos en hospitales de Beijing.	80
Figura 12.	Frecuencia por año de publicación	97
Figura 13.	Distribución mundial de Estudios	98

Lista de apéndices

Ver apéndices adjuntos.

ApéndiceA_ Bitácora_RL

ApéndiceB_Matriz_RL

ApéndiceC_Artículo

Introducción

La gestión adecuada de los residuos médicos ha emergido como un reto prioritario dentro del sector salud, debido a sus implicaciones en la salud pública, el medio ambiente y la logística del manejo de estos desechos. A pesar de la existencia de normativas claras como el Decreto 2676 de 2000 y sus actualizaciones en Colombia, persisten dificultades para implementar un sistema eficaz que abarque toda la cadena de suministro del cuidado de la salud, desde la generación hasta la disposición final de los residuos médicos.

Este estudio se enmarca en la necesidad de optimizar los procesos de gestión de residuos médicos utilizando técnicas de análisis, como optimización y simulación, que han demostrado ser eficaces para mejorar los procesos logísticos en diversos sectores. La revisión sistemática de la literatura permitirá identificar las metodologías y herramientas más relevantes que se han aplicado en la gestión de estos residuos, con un enfoque en su efectividad, sostenibilidad y adaptabilidad a diferentes contextos.

El objetivo de la revisión es comprender cómo se están utilizando estas herramientas de análisis para mejorar la eficiencia de la gestión de residuos médicos en el ámbito hospitalario y en otros sectores del sistema de salud. Esta investigación se centrará en identificar las mejores prácticas, evaluar los enfoques utilizados en diferentes contextos y analizar las brechas de conocimiento que aún existen sobre la aplicación de técnicas de optimización y simulación (entre otras) en la gestión de residuos.

El estudio propuesto contribuirá al desarrollo de habilidades del grupo de investigación OPALO de la Universidad Industrial de Santander, sobre la forma de abordar los temas alrededor de la temática estudiada.

Resumen

Título del proyecto: Gestión de residuos médicos. Una revisión sistemática de la literatura*

Autor: Ivan Dario Garcia Garcia y Camilo Pineda Barroso**

Palabras clave: Residuos médicos, gestión hospitalaria, revisión sistemática, economía circular, PRISMA, sostenibilidad.

Descripción:

La gestión de residuos médicos constituye un problema prioritario en los sistemas de salud debido a sus implicaciones para la seguridad del personal sanitario, los pacientes, la comunidad y el medio ambiente. En países en desarrollo este desafío se ve agravado por limitaciones normativas, deficiencias en infraestructura y dificultades financieras, lo que genera una brecha entre la normativa existente y la práctica hospitalaria. Este proyecto tuvo como objetivo analizar de manera integral el estado actual de la literatura sobre gestión de residuos médicos mediante una revisión sistemática basada en la metodología PRISMA. Se consultaron las bases de datos Scopus y Web of Science, identificándose 883 documentos, de los cuales, tras aplicar criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 60 artículos publicados en revistas de alto impacto (Q1 y Q2). Estos fueron organizados en cinco grupos: modelos de simulación, modelos de optimización, estudios experimentales, análisis normativos, descriptivos y económicos, y aplicaciones clínicas y operativas. Los resultados muestran que, aunque existen avances significativos en modelación y en propuestas normativas, persisten limitaciones en la implementación práctica, especialmente en contextos hospitalarios con recursos restringidos. Entre las principales brechas identificadas se encuentran la insuficiente capacitación del personal, la escasez de infraestructura adecuada y la falta de mecanismos financieros sostenibles. Se concluye que la gestión de residuos médicos requiere un enfoque integral en el que se articulen los aportes tecnológicos y normativos con la realidad operativa de las instituciones de salud, ofreciendo una síntesis crítica que puede servir como base para futuras investigaciones y para la formulación de políticas públicas orientadas a sistemas hospitalarios más seguros, eficientes y sostenibles.

* Trabajo de grado.

** Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Grupo de Investigación OPALO.

Director: MA. Javier Eduardo Arias Osorio.

Abstract

Project title: Medical waste management: A systematic literature review*

Author: Ivan Dario Garcia Garcia y Camilo Pineda Barroso**

Keywords: Medical waste, hospital management, systematic review, circular economy, PRISMA, sustainability.

Description:

Medical waste management is a critical challenge for health systems due to its implications for the safety of healthcare workers, patients, communities, and the environment. In developing countries, this problem is exacerbated by regulatory limitations, insufficient infrastructure, and financial constraints, leading to a persistent gap between existing regulations and hospital practices. The aim of this project was to analyze the current state of the literature on medical waste management through a systematic review based on the PRISMA methodology. Databases such as Scopus and Web of Science were consulted, identifying 883 documents, of which, after applying inclusion and exclusion criteria, 60 articles published in high-impact journals (Q1 and Q2) were selected. These were organized into five groups: simulation models, optimization models, experimental studies, normative, descriptive and economic analyses, and clinical and operational applications. The results show that although significant advances have been made in modeling, technology assessment, and regulatory frameworks, major limitations persist in practical implementation, especially in hospitals with restricted resources. The main gaps identified include insufficient staff training, inadequate infrastructure, and the absence of sustainable financial mechanisms. It is concluded that medical waste management requires an integral approach that articulates technological and regulatory contributions with the operational reality of health institutions, providing a critical synthesis that may serve as a basis for future research and the formulation of public policies aimed at safer, more efficient, and sustainable hospital systems.

* Degree project.

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies. OPALO Research Group.

Director: MA. Javier Eduardo Arias Osorio.

Tabla 1. *Cumplimiento de objetivos*

Objetivos específicos	Cumplimiento
Establecer el protocolo de la revisión sistemática y realizar la búsqueda exhaustiva de documentos.	Capítulo 2
Seleccionar, organizar y analizar los documentos encontrados en la búsqueda exhaustiva, a partir del protocolo de la metodología PRISMA.	Capítulo 3
Sintetizar los resultados y organizarlos, a partir de la pregunta de investigación planteada en el protocolo de la revisión sistemática.	Capítulo 4
Elaborar un artículo publicable que sintetice lo realizado en la investigación.	ApéndiceC_ Artículo

1. Generalidades del Proyecto

1.1. Planteamiento del problema

La gestión inadecuada de los residuos médicos representa un desafío significativo para el sector salud a nivel mundial, con implicaciones directas en la salud pública, el medio ambiente y la eficiencia operativa de las instituciones sanitarias. En Colombia, a pesar de contar con normativas claras como el Decreto 2676 de 2000 y sus modificaciones posteriores, persisten importantes brechas en la implementación efectiva de sistemas integrales para el manejo de estos desechos, lo que genera riesgos asociados a la contaminación biológica, química y física.

El proceso de gestión de residuos médicos es complejo y multifacético, dado que involucra múltiples etapas interrelacionadas —generación, segregación, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final— que requieren un control riguroso para minimizar los impactos negativos en la salud humana y el entorno ambiental. La logística para la recolección y disposición de estos residuos debe ser planificada y ejecutada bajo estrictas normas de bioseguridad, al tiempo que se buscan soluciones que optimicen recursos, reduzcan costos y garanticen la sostenibilidad ambiental y social.

En este contexto, la cadena de suministro del cuidado de la salud (CSCS) enfrenta la necesidad de integrar sistemas logísticos que contemplen la gestión inversa, permitiendo no solo la disposición segura sino también la recuperación y reutilización de materiales cuando sea posible, alineándose con principios de economía circular. Sin embargo, la literatura científica revela que la aplicación de herramientas cuantitativas —como modelos de optimización, simulación y análisis matemático— para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y costo-efectividad en la gestión de residuos médicos aún es incipiente, con pocos estudios que integren estos enfoques en el ámbito hospitalario, especialmente en contextos latinoamericanos.

De hecho, la revisión de antecedentes indica que la mayoría de las investigaciones sobre modelos matemáticos y optimización aplicados a la logística inversa y gestión de residuos se concentran en regiones con mayor desarrollo tecnológico y normativo, limitando la transferencia de conocimiento y experiencias a países como Colombia. Además, existen vacíos en la caracterización bibliométrica y análisis sistemático de la literatura sobre estas metodologías, dificultando la identificación de tendencias, brechas y prioridades de investigación que puedan orientar intervenciones efectivas.

Ante esta situación, resulta indispensable realizar una revisión sistemática que permita identificar, analizar y sintetizar la evidencia científica existente sobre el uso de herramientas cuantitativas aplicadas a la gestión de residuos médicos en la cadena de suministro del cuidado de la salud. Esta revisión contribuirá a fortalecer la base metodológica para el desarrollo de modelos y estrategias ajustados a las necesidades y particularidades del contexto local, apoyando la toma de decisiones y fomentando la adopción de prácticas sostenibles.

Por lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son, cómo se han aplicado y qué impacto han tenido las herramientas cuantitativas, tales como la optimización y la simulación, en la gestión de residuos médicos dentro de la cadena de suministro del cuidado de la salud?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Realizar una revisión sistemática de la literatura, a partir de la metodología PRISMA, sobre la gestión de residuos médicos en el contexto de la cadena de suministro del cuidado de la salud, con el propósito de identificar herramientas cuantitativas aplicadas.

1.2.2. Objetivos específicos

Objetivo específico 1: Establecer el protocolo de la revisión sistemática y realizar la búsqueda exhaustiva de documentos

Objetivo específico 2: Seleccionar, organizar y analizar los documentos encontrados en la búsqueda exhaustiva, a partir del protocolo de la metodología PRISMA

Objetivo específico 3: Sintetizar los resultados y organizarlos, a partir de la pregunta de investigación planteada en el protocolo de la revisión sistemática

Objetivo específico 4: Elaborar un artículo publicable que sintetice lo realizado en la investigación

1.2.3. Actividades

Objetivo específico 1: Establecer el protocolo de la revisión sistemática y realizar la búsqueda exhaustiva de documentos

1. Definir la Pregunta de Investigación: - Establecer claramente qué se quiere investigar, formulando una pregunta de investigación específica y relevante.

2. Especificar Criterios de Inclusión y Exclusión: - Determinar qué estudios se incluirán en la revisión con base en criterios predefinidos, como el tipo de estudio, la población, las intervenciones, y los resultados medidos.

3. Realizar una Búsqueda Exhaustiva: - Llevar a cabo una exploración exhaustiva en bases de datos relevantes (como WOS y SCOPUS) utilizando descriptores y palabras clave relevantes para maximizar la recuperación de estudios pertinentes.

Objetivo específico 2: Seleccionar, organizar y analizar los documentos encontrados en la búsqueda exhaustiva, a partir del protocolo de la metodología PRISMA

4. Seleccionar los Estudios: - Aplicar los criterios de inclusión y exclusión a los estudios recuperados durante la búsqueda inicial para determinar cuáles cumplen con los requisitos. Este proceso a menudo involucra la lectura de los títulos, resúmenes y, en algunos casos, el texto completo.

5. Extraer Datos: - Recolectar la información pertinente de los estudios seleccionados, asegurando que se mantenga la precisión de los datos para responder a la pregunta de investigación.

6. Evaluar la Calidad de los Estudios: - Realizar una evaluación crítica sobre la calidad metodológica de los estudios incluidos. Esto puede involucrar herramientas o checklists específicas para valorar la robustez de los estudios.

Objetivo específico 3: Sintetizar los resultados y organizarlos, a partir de la pregunta de investigación planteada en el protocolo de la revisión sistemática

7. Sintetizar Resultados: - Integrar los resultados de los estudios seleccionados. Esto puede llevarse a cabo mediante un metanálisis o una síntesis cualitativa, según la naturaleza de los datos disponibles.

8. Informe y Redacción: - Elaborar un informe que incluya todos los elementos necesarios según la lista de verificación PRISMA. Esto incluye el título, resumen, introducción, métodos, resultados, discusión, y otras informaciones relevantes.

Objetivo específico 4: Elaborar un artículo publicable que sintetice lo realizado en la investigación

9. Publicación y Diseminación: - Imprimir o publicar el trabajo de manera que sea accesible a la comunidad científica y a otras partes interesadas, permitiendo que la revisión sistemática aporte al conocimiento y práctica en el área de interés.

2. Revisión de literatura

2.1 Marco teórico

2.1.1 Gestión de Residuos Médicos

La gestión de residuos es un proceso integral que comprende la planificación, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los desechos generados por actividades humanas, con el propósito de minimizar su impacto ambiental y sanitario (WHO, 2018). En el contexto sanitario, los residuos médicos requieren un manejo especializado debido a su potencial riesgo biológico, químico y físico (Decreto 2676 de 2000, Colombia).

2.1.1.1 Clasificación y Tipos de Residuos Médicos

Los residuos médicos, también denominados hospitalarios o sanitarios, son aquellos generados en actividades asistenciales, de laboratorio, odontológicas, veterinarias y similares (OMS, 2018). En Colombia, se regulan principalmente por el Decreto 2676 de 2000 y su modificación Decreto 351 de 2014, que establecen categorías de residuos médicos peligrosos y no peligrosos.

Los residuos peligrosos incluyen:

- **Residuos biosanitarios:** Materiales contaminados con sangre, fluidos o secreciones (ej. gasas, guantes contaminados).
- **Residuos cortopunzantes:** Agujas, bisturís o vidrios contaminados capaces de causar heridas.

- **Residuos químicos y farmacéuticos:** Reactivos de laboratorio, medicamentos vencidos.
- **Residuos radiactivos:** Materiales contaminados con isótopos usados en terapias o diagnósticos.
- **Residuos genotóxicos y citotóxicos:** Asociados a tratamientos oncológicos.

Los residuos no peligrosos son aquellos que no representan riesgos sanitarios o ambientales y pueden ser gestionados como residuos domésticos.

Tabla 2. *Clasificación de residuos médicos según normativa colombiana*

Tipo de Residuo	Descripción	Ejemplos	Normativa
Biosanitarios	Contaminados con fluidos corporales	Gasas, guantes contaminados	Decreto 2676/2000
Cortopunzantes	Objetos punzocortantes contaminados	Agujas, bisturís	Decreto 2676/2000
Químicos	Sustancias químicas peligrosas	Reactivos, solventes	Decreto 2676/2000
Farmacéuticos	Medicamentos vencidos o usados	Tabletas caducadas	Decreto 351/2014

Radiactivos	Materiales	Material de terapia	Decreto
	contaminados	nuclear	2676/2000
	radiactivos		
No peligrosos	Residuos sin riesgo	Papel limpio,	Decreto
	biológico o químico	envases limpios	2676/2000

Nota. Clasificación de residuos médicos según normativa colombiana. Fuente: Elaboración propia basada en el Decreto 2676 de 2000 y el Decreto 351 de 2014.

2.1.1.2 Pasos en la Gestión de Residuos

La gestión integral de residuos médicos comprende etapas interrelacionadas: generación, segregación, recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final (Tchobanoglous et al., 2014). Cada etapa debe cumplir normativas estrictas para evitar impactos negativos.

1. **Generación:** punto inicial donde se producen los residuos.
2. **Segregación:** separación según tipo y peligrosidad para facilitar manejo.
3. **Recolección:** traslado controlado hacia puntos de almacenamiento o tratamiento.
4. **Almacenamiento:** conservación temporal bajo condiciones controladas.
5. **Transporte:** movilización con vehículos especializados y normativas de bioseguridad.
6. **Tratamiento:** reducción de peligrosidad mediante métodos físicos, químicos o biológicos.
7. **Disposición final:** confinamiento seguro en rellenos sanitarios o celdas especiales.

2.1.2 Cadena de Suministro

La cadena de suministro representa una red compleja e integrada de organizaciones, personas, actividades, información y recursos involucrados en la entrega de un producto o servicio desde el proveedor hasta el cliente final. Según Chopra y Meindl (2023), la cadena de suministro engloba todos los procesos directa o indirectamente implicados en la satisfacción de la demanda del cliente, abarcando desde la adquisición de materias primas hasta la entrega del producto terminado, y en muchos casos, extendiéndose hasta la recuperación y disposición final de los productos después de su vida útil.

Lambert y Cooper (2000) subrayan que las cadenas de suministro modernas no son simplemente cadenas lineales, sino redes empresariales complejas y multidimensionales que requieren una coordinación efectiva entre todas las entidades participantes. Esta visión multidimensional es particularmente relevante cuando se analiza el flujo de materiales, información y recursos financieros que ocurren simultáneamente dentro de estas redes.

2.1.2.1 Estructura de la cadena de suministro

La estructura de una cadena de suministro tradicional incluye diversos componentes que interactúan de manera coordinada:

1. **Proveedores de materias primas:** Entidades que proporcionan los insumos iniciales necesarios para la fabricación de productos o la prestación de servicios.
2. **Fabricantes:** Organizaciones que transforman las materias primas en productos intermedios o finales mediante procesos productivos.
3. **Distribuidores:** Intermediarios que facilitan la movilización de productos desde los fabricantes hasta los minoristas o consumidores finales.
4. **Minoristas:** Puntos de venta que ofrecen productos directamente a los consumidores finales.

5. **Consumidores finales:** Beneficiarios últimos de los productos o servicios generados en la cadena.

Según Christopher (2016), una característica fundamental de las cadenas de suministro es la bidireccionalidad de sus flujos:

- **Flujo de materiales y productos:** Se mueve principalmente desde los proveedores hacia los consumidores.
- **Flujo de información:** Opera en ambas direcciones, permitiendo la coordinación de actividades.
- **Flujo financiero:** Generalmente se desplaza desde los consumidores hacia los proveedores como contraprestación por los bienes o servicios recibidos.
- **Flujo de valor:** Representa la transformación progresiva que experimentan los materiales a medida que avanzan por la cadena.

2.1.2.2 Gestión de la Cadena de Suministro

La gestión de la cadena de suministro (Supply Chain Management, SCM) constituye un enfoque integrado para la planificación y control de todos los flujos de materiales, información y finanzas desde los proveedores hasta el consumidor final. Mentzer et al. (2008) la definen como "la coordinación sistemática y estratégica de las funciones tradicionales del negocio y las tácticas a través de estas funciones empresariales dentro de una compañía en particular y a través de las empresas que participan en la cadena de suministro, con el fin de mejorar el desempeño a largo plazo de las empresas individuales y de la cadena de suministro como un todo" (p. 18).

La SCM ha evolucionado desde un enfoque meramente operativo hacia una perspectiva estratégica que busca integrar y optimizar todas las actividades relacionadas con el flujo y

transformación de bienes, desde la materia prima hasta el usuario final (Ballou, 2007). Esta visión holística permite a las organizaciones:

- Reducir costos operativos mediante la optimización de inventarios y procesos logísticos
- Mejorar la capacidad de respuesta ante fluctuaciones del mercado
- Incrementar la satisfacción del cliente mediante niveles de servicio superiores
- Desarrollar ventajas competitivas sostenibles a través de la diferenciación

Según Simchi-Levi et al. (2021), las decisiones estratégicas en la gestión de la cadena de suministro se pueden clasificar en tres niveles temporales:

- **Decisiones estratégicas (largo plazo):** Incluyen la localización de instalaciones, selección de socios estratégicos y definición de capacidades productivas.
- **Decisiones tácticas (mediano plazo):** Abarcan la planificación de la producción, políticas de inventario y estrategias de transporte.
- **Decisiones operativas (corto plazo):** Comprenden la programación diaria de producción, despacho de pedidos y gestión cotidiana de operaciones.

La integración efectiva de estos niveles decisionales es fundamental para lograr una cadena de suministro eficiente y competitiva.

2.1.2.3 Evolución hacia la Cadena de Suministro Sostenible

El concepto tradicional de cadena de suministro ha evolucionado incorporando dimensiones de sostenibilidad que trascienden el enfoque meramente económico. Seuring y Müller (2008) definen la cadena de suministro sostenible como "la gestión de los flujos de material, información y capital, así como la cooperación entre empresas a lo largo de la cadena de

suministro, integrando objetivos de las tres dimensiones del desarrollo sostenible (económico, ambiental y social), que se derivan de los requerimientos de los clientes y partes interesadas" (p. 1700).

Esta evolución ha dado lugar a diferentes variantes del concepto tradicional de cadena de suministro:

2.1.2.4 Cadena de Suministro Verde

La cadena de suministro verde (Green Supply Chain) representa un enfoque que integra consideraciones ambientales en todas las etapas del ciclo de vida del producto. Según Srivastava (2007), "la gestión de la cadena de suministro verde es la integración del pensamiento ambiental en la gestión de la cadena de suministro, incluido el diseño del producto, el abastecimiento y la selección de materiales, los procesos de fabricación, la entrega del producto final a los consumidores y la gestión del final de la vida útil del producto" (p. 54).

Los objetivos principales de la cadena de suministro verde incluyen:

- Minimizar la huella ecológica de las operaciones logísticas
- Reducir el consumo de recursos naturales y energéticos
- Disminuir la generación de residuos y emisiones contaminantes
- Implementar procesos productivos más limpios y eficientes

Zhu y Sarkis (2004) señalan que las prácticas de la cadena de suministro verde pueden incluir la compra ecológica, el ecodiseño, la producción más limpia, la logística inversa y la disposición responsable de residuos, entre otras iniciativas ambientalmente conscientes.

2.1.2.5 Cadena de Suministro de Ciclo Cerrado

La cadena de suministro de ciclo cerrado (Closed-Loop Supply Chain, CLSC) constituye un modelo logístico que integra las actividades tradicionales de la cadena directa con los procesos de logística inversa, creando un sistema circular donde los productos, componentes o materiales retornan al ciclo productivo después de su uso. Guide y Van Wassenhove (2009) la definen como "el diseño, control y operación de un sistema para maximizar la creación de valor durante todo el ciclo de vida de un producto, con recuperación dinámica de valor en diferentes tipos y volúmenes de retornos a lo largo del tiempo" (p. 10).

Las actividades fundamentales en la CLSC incluyen:

- **Recolección:** Acopio de productos usados o descartados.
- **Inspección/Clasificación:** Evaluación del estado de los productos recolectados para determinar su mejor disposición.
- **Reprocesamiento:** Transformación del producto usado en uno "como nuevo" mediante distintas operaciones (reparación, remanufactura, reacondicionamiento, etc.).
- **Redistribución:** Reintroducción del producto recuperado en el mercado o en procesos productivos.

Este modelo circular presenta beneficios significativos tanto económicos como ambientales, al reducir la dependencia de materias primas vírgenes, disminuir los residuos generados y recuperar valor de productos que de otra manera serían desechados (Govindan et al., 2015).

2.1.2.6 Cadena de Suministro del Cuidado de la Salud

La cadena de suministro del cuidado de la salud (Healthcare Supply Chain) constituye un subsistema especializado dentro de las cadenas de suministro, adaptado a las necesidades y complejidades particulares del sector sanitario. Según Kumar et al. (2020), esta cadena representa "el conjunto interconectado de proveedores, distribuidores, instituciones médicas y

pacientes involucrados en la adquisición, transformación, distribución y consumo de productos y servicios relacionados con la salud" (p. 27).

Landry y Beaulieu (2013) señalan que la cadena de suministro sanitaria presenta características distintivas que la diferencian de otros sectores:

1. **Criticidad de los productos:** Los insumos médicos y farmacéuticos tienen impacto directo en la vida y salud de las personas, lo que exige niveles excepcionales de calidad, seguridad y trazabilidad.
2. **Marco regulatorio estricto:** Opera bajo normativas sanitarias rigurosas que condicionan todos los procesos logísticos.
3. **Complejidad de productos:** Maneja una gran diversidad de artículos con características especiales (esterilidad, caducidad, temperatura controlada, entre otros).
4. **Naturaleza dual del servicio:** Combina flujos de productos tangibles (medicamentos, dispositivos) con servicios intangibles (atención médica).
5. **Multiplicidad de actores:** Involucra una amplia gama de profesionales e instituciones con distintos objetivos y prioridades.

2.1.2.7 Componentes de la Cadena de Suministro del Cuidado de la Salud

La estructura de la cadena de suministro del cuidado de la salud comprende diversas subcadenas especializadas que operan de manera coordinada (Shah, 2004):

1. **Subcadena farmacéutica:** Incluye laboratorios, distribuidores, farmacias y pacientes, centrada en la producción y distribución de medicamentos.
2. **Subcadena de dispositivos médicos:** Comprende fabricantes, proveedores y usuarios de equipamiento e insumos médicos, desde instrumental quirúrgico hasta equipos de diagnóstico.

3. **Subcadena de servicios médicos:** Involucra instituciones prestadoras de servicios, profesionales de la salud y pacientes.
4. **Subcadena de suministros generales:** Abastece de materiales no clínicos pero necesarios para la operación de las instituciones sanitarias.
5. **Subcadena de información médica:** Gestiona el flujo de datos clínicos, administrativos y de investigación.
6. **Subcadena de residuos médicos:** Responsable de la gestión adecuada de los desechos generados por la actividad sanitaria, desde su segregación hasta su disposición final.

Esta última subcadena reviste especial importancia desde la perspectiva de la sostenibilidad y la salud pública, ya que los residuos médicos presentan características particulares que exigen un manejo diferenciado respecto a otros tipos de desechos.

2.1.2.8 Flujos en la Cadena de Suministro del Cuidado de la Salud

Según Schneller y Smeltzer (2006), en la cadena de suministro sanitaria se identifican cuatro flujos principales:

1. **Flujo de productos:** Comprende el movimiento de medicamentos, dispositivos médicos, insumos y equipamiento desde proveedores hasta pacientes.
2. **Flujo de información:** Abarca la transmisión de datos clínicos, administrativos, logísticos y regulatorios entre los diferentes actores.
3. **Flujo financiero:** Incluye los pagos, reembolsos y transacciones económicas asociadas a la prestación de servicios y adquisición de productos.
4. **Flujo inverso:** Gestiona el retorno de productos defectuosos, excedentes, expirados o los residuos generados durante la atención sanitaria.

Este último flujo inverso constituye un elemento fundamental para la gestión adecuada de los residuos médicos, conectando la atención sanitaria con sistemas de disposición final especializados.

2.1.2.9 Gestión de Residuos en la Cadena de Suministro del Cuidado de la Salud

La gestión de residuos médicos representa un componente crucial dentro de la cadena de suministro del cuidado de la salud, especialmente desde la perspectiva de la logística inversa y la economía circular. De acuerdo con Alagöz y Kocasoy (2008), la gestión de residuos médicos puede definirse como "el conjunto de procesos planificados, estandarizados y controlados que garantizan la manipulación, tratamiento y eliminación seguros de los desechos generados durante la prestación de servicios sanitarios, minimizando los riesgos para la salud pública y el medio ambiente" (p. 1227).

La integración efectiva de la gestión de residuos en la cadena de suministro sanitaria permite transformar un problema potencial (generación de desechos peligrosos) en una oportunidad para la implementación de prácticas sostenibles. Según Xie et al. (2016), este enfoque integrado ofrece múltiples beneficios:

1. **Eficiencia operativa:** Optimización de recursos humanos, materiales y financieros destinados al manejo de residuos.
2. **Cumplimiento normativo:** Garantía de adherencia a las regulaciones sanitarias y ambientales vigentes.
3. **Minimización de riesgos:** Reducción de incidentes relacionados con la manipulación inadecuada de residuos peligrosos.
4. **Sostenibilidad ambiental:** Disminución del impacto ecológico de las actividades sanitarias.

5. **Responsabilidad social:** Demostración del compromiso institucional con la salud pública y el bienestar comunitario.

2.1.2.10 Enfoque de Economía Circular en la Gestión de Residuos Médicos

La aplicación de principios de economía circular en la gestión de residuos médicos representa una evolución conceptual importante que trasciende el modelo lineal tradicional de "extraer-producir-desechar". La economía circular aplicada al sector sanitario busca mantener productos, componentes y materiales en su máximo valor y utilidad durante el mayor tiempo posible, reduciendo significativamente la generación de residuos (Geissdoerfer et al., 2017).

Según Minoglou et al. (2017), las estrategias de economía circular aplicables a residuos médicos incluyen:

1. **Prevención y minimización:** Diseño y selección de productos que generen menos residuos o residuos menos peligrosos.
2. **Reutilización controlada:** Recuperación de dispositivos médicos para un segundo uso, previa descontaminación y verificación.
3. **Reciclaje de materiales:** Transformación de componentes como plásticos no contaminados, vidrio o metales en nuevas materias primas.
4. **Valorización energética:** Aprovechamiento del potencial calorífico de determinados residuos mediante tecnologías de conversión térmica controlada.
5. **Disposición final segura:** Como último recurso, confinamiento de residuos no aprovechables en instalaciones diseñadas para minimizar impactos negativos.

Este enfoque circular exige una visión integrada de toda la cadena de suministro del cuidado de la salud, desde el diseño de productos hasta la gestión de los residuos generados, pasando por prácticas de adquisición sostenible y uso eficiente de recursos.

2.1.2.11 Herramientas Cuantitativas en la Gestión de Residuos Médicos

La complejidad inherente a la gestión de residuos médicos dentro de la cadena de suministro del cuidado de la salud ha propiciado la aplicación de diversas herramientas cuantitativas que permiten optimizar decisiones, modelar procesos y evaluar alternativas. Según Mantzaras y Voudrias (2017), estas herramientas aportan rigor metodológico y objetividad a la toma de decisiones en un ámbito donde coexisten múltiples variables y restricciones.

Entre las principales herramientas cuantitativas aplicadas a este campo destacan:

1. **Optimización matemática:** Utilizada para determinar la mejor configuración de sistemas de recolección, localización de instalaciones de tratamiento o asignación de recursos (Habibi et al., 2017).
2. **Simulación de procesos:** Permite modelar el comportamiento dinámico de los sistemas de gestión de residuos bajo diferentes escenarios y condiciones operativas (Chaerul et al., 2008).
3. **Análisis multicriterio:** Facilita la evaluación integral de alternativas de gestión considerando simultáneamente factores técnicos, económicos, ambientales y sociales (Dursun et al., 2011).
4. **Modelos de programación logística:** Optimizan rutas de recolección, frecuencias de servicio y capacidades de transporte (Shih & Chang, 2001).
5. **Análisis del ciclo de vida:** Evalúa el impacto ambiental de diferentes estrategias de gestión desde una perspectiva holística (Zhao et al., 2009).
6. **Modelos predictivos:** Anticipan tendencias en la generación y composición de residuos médicos para una planificación proactiva (Debere et al., 2013).

2.1.3 Revisión Sistemática

La revisión sistemática constituye una metodología de investigación de carácter científico, riguroso y transparente, diseñada para sintetizar la evidencia disponible relacionada con una pregunta de investigación específica (Higgins & Green, 2019). A diferencia de las revisiones narrativas tradicionales, que pueden estar sujetas a sesgos de selección y presentación, las revisiones sistemáticas se caracterizan por seguir protocolos estructurados y explícitos que garantizan su objetividad y reproducibilidad (Moher et al., 2015).

El valor fundamental de este enfoque radica en su capacidad para proporcionar una visión integral del conocimiento existente sobre un tema particular, identificando patrones, contradicciones y brechas en la literatura científica. Como señalan Petticrew y Roberts (2006), "las revisiones sistemáticas son particularmente valiosas cuando existe incertidumbre sobre los efectos de una intervención o cuando se requiere una síntesis de múltiples estudios para informar políticas o prácticas".

En el contexto de la gestión de residuos médicos, las revisiones sistemáticas permiten consolidar la evidencia dispersa en múltiples publicaciones, facilitan la comparación de diferentes enfoques de gestión, y contribuyen a la identificación de mejores prácticas basadas en evidencia robusta (Windfeld & Brooks, 2015).

2.1.3.1 Metodologías para Revisiones Sistemáticas

Existen diversas metodologías y marcos de trabajo que guían el desarrollo de revisiones sistemáticas, cada una con sus propias fortalezas y ámbitos de aplicación preferentes. Entre las más reconocidas internacionalmente se encuentran:

2.1.3.1.1 Cochrane Collaboration

La metodología Cochrane, desarrollada por la Colaboración Cochrane, representa el estándar de oro para revisiones sistemáticas en el ámbito de intervenciones en salud (Higgins & Thomas,

2020). Se caracteriza por su enfoque riguroso para evaluar y sintetizar evidencia clínica, con especial énfasis en estudios aleatorizados controlados. El Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions proporciona orientaciones detalladas sobre cada fase del proceso, desde la formulación de la pregunta de investigación hasta la interpretación de los resultados. Esta metodología se destaca por su robustez en la evaluación del riesgo de sesgo y sus técnicas avanzadas para el metaanálisis, permitiendo generar conclusiones sólidas sobre la efectividad de intervenciones (Shamseer et al., 2015).

2.1.3.1.2 Joanna Briggs Institute (JBI)

La metodología JBI, desarrollada por el Instituto Joanna Briggs, ofrece un marco integral para realizar revisiones sistemáticas que incorporan diversos tipos de evidencia, incluyendo estudios cuantitativos, cualitativos y de métodos mixtos (Aromataris & Munn, 2020). Este enfoque resulta particularmente valioso en investigaciones sobre sistemas de salud, políticas sanitarias y gestión de procesos, donde la integración de diferentes perspectivas metodológicas enriquece la comprensión del fenómeno estudiado. La metodología JBI enfatiza la aplicabilidad práctica de los hallazgos y proporciona herramientas específicas para evaluar la calidad de estudios con diversos diseños metodológicos.

2.1.3.1.3 Campbell Collaboration

Orientada principalmente hacia la investigación en ciencias sociales, políticas públicas, educación y criminología, la metodología Campbell proporciona un marco sistemático para sintetizar evidencia sobre intervenciones sociales y educativas (Kugley et al., 2017). Su enfoque resulta relevante para estudios sobre gestión organizacional, implementación de políticas y evaluación de programas, aspectos que pueden tener aplicación en la gestión administrativa de sistemas de manejo de residuos médicos.

2.1.3.1.4 PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*)

PRISMA no constituye estrictamente una metodología para realizar revisiones sistemáticas, sino un conjunto de directrices para reportarlas adecuadamente. Sin embargo, su estructura lógica y exhaustiva influye significativamente en la planificación y ejecución de estos estudios (Page et al., 2021). PRISMA proporciona lineamientos claros sobre los elementos esenciales que deben incluirse en la publicación de una revisión sistemática para garantizar su transparencia y calidad.

2.1.3.1.5 GRADE (*Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation*)

El sistema GRADE proporciona un marco para evaluar la calidad de la evidencia y la fuerza de las recomendaciones derivadas de revisiones sistemáticas (Guyatt et al., 2011). Aunque no constituye una metodología completa para realizar revisiones, complementa otros enfoques al ofrecer criterios explícitos para juzgar la confianza en los resultados sintetizados.

2.1.3.1.6 RAMESES (*Realist And Meta-narrative Evidence Syntheses: Evolving Standards*)

Esta metodología está diseñada específicamente para síntesis realistas y meta-narrativas, dos enfoques que van más allá de la síntesis tradicional de efectos de intervenciones para explorar cómo, por qué y en qué contextos funcionan determinadas intervenciones complejas (Wong et al., 2013). Este enfoque resulta particularmente valioso para el análisis de sistemas complejos como la gestión de residuos médicos, donde intervienen múltiples actores, contextos organizacionales y factores socioeconómicos.

2.1.3.2 *Fundamentos y Estructura de PRISMA*

PRISMA se fundamenta en principios de transparencia, reproducibilidad y rigor metodológico. Su estructura comprende dos componentes principales:

1. Lista de verificación de 27 ítems: Esta lista abarca todos los aspectos esenciales que deben ser reportados en una revisión sistemática, organizados en siete secciones principales:

- Título y resumen estructurado
- Introducción (justificación y objetivos)
- Métodos (protocolo y registro, criterios de elegibilidad, fuentes de información, estrategia de búsqueda, selección de estudios, proceso de recolección de datos, variables, riesgo de sesgo, medidas de resumen, síntesis de resultados, análisis adicionales)
- Resultados (selección de estudios, características de los estudios, riesgo de sesgo, resultados de los estudios individuales, síntesis de resultados, análisis adicionales)
- Discusión (resumen de la evidencia, limitaciones, conclusiones)
- Financiación

Diagrama de flujo: Representación visual estandarizada del proceso de selección de estudios, que muestra claramente el número de publicaciones en cada fase:

- Identificación (número de registros identificados mediante búsquedas)
- Cribado (número de registros después de eliminar duplicados)
- Elegibilidad (número de artículos de texto completo evaluados)
- Inclusión (número de estudios incluidos en la síntesis cualitativa o cuantitativa)

Como destacan Liberati et al. (2009), "el diagrama de flujo PRISMA proporciona una representación transparente y completa del proceso de selección, facilitando la evaluación crítica de la exhaustividad de la búsqueda y los criterios de selección aplicados".

2.1.3.3 Proceso Metodológico de PRISMA

La implementación adecuada de la metodología PRISMA implica seguir un proceso sistemático que va más allá del simple reporte de resultados. Este proceso puede desglosarse en las siguientes etapas:

2.1.3.3.1 Formulación de la Pregunta de Investigación

El punto de partida de toda revisión sistemática es establecer una pregunta clara, específica y estructurada. Para facilitar este proceso, suele utilizarse el formato PICO (Población, Intervención, Comparación, Outcomes o resultados), que ayuda a definir con precisión el alcance de la revisión. Como señalan Petticrew y Roberts (2006), "una pregunta bien formulada es esencial para guiar adecuadamente todo el proceso de revisión, desde la búsqueda hasta la síntesis".

2.1.3.3.2 Desarrollo del Protocolo

El protocolo constituye un plan detallado que especifica los métodos a utilizar en la revisión sistemática antes de iniciarla. Incluye los criterios de elegibilidad, estrategias de búsqueda, métodos de selección, evaluación de calidad, extracción de datos y síntesis. El registro previo del protocolo (por ejemplo, en PROSPERO) contribuye a la transparencia del proceso y reduce el riesgo de sesgos por modificaciones posteriores de los métodos (Moher et al., 2015). Como señala Higgins y Green (2019), "el desarrollo y publicación previa de un protocolo permite a los investigadores planificar cuidadosamente y documentar sus métodos, lo que aumenta la confiabilidad y transparencia de la revisión".

2.1.3.3.3 Búsqueda Exhaustiva de Literatura

Esta fase implica diseñar e implementar estrategias de búsqueda sistemáticas y exhaustivas que garanticen la identificación de todos los estudios relevantes. La metodología PRISMA enfatiza la importancia de:

- Seleccionar bases de datos bibliográficas apropiadas (por ejemplo, PubMed, Scopus, Web of Science)
- Desarrollar ecuaciones de búsqueda sensibles que combinen términos MeSH/tesauros y palabras clave
- Complementar con búsquedas en literatura gris, repositorios de preprints, y consulta a expertos
- Documentar detalladamente todas las estrategias utilizadas, incluyendo fechas, plataformas y filtros

La exhaustividad y reproducibilidad de la búsqueda son pilares fundamentales de la metodología PRISMA. Según Lefebvre et al. (2019), "una búsqueda óptima debe balancear sensibilidad y precisión, maximizando la recuperación de estudios relevantes sin generar un volumen inmanejable de resultados irrelevantes".

2.1.3.3.4 Selección de Estudios

Este proceso implica aplicar los criterios de elegibilidad predefinidos a los resultados de la búsqueda, mediante un procedimiento sistemático que generalmente incluye:

- Cribado inicial por título y resumen
- Evaluación de textos completos para estudios potencialmente elegibles
- Implementación de un proceso de revisión por al menos dos evaluadores independientes
- Resolución de discrepancias mediante consenso o consulta a un tercer revisor

PRISMA recomienda documentar detalladamente este proceso, incluyendo las razones específicas de exclusión para los estudios evaluados a texto completo.

2.1.3.3.5 Extracción de Datos

Esta fase consiste en la recopilación sistemática de información relevante de los estudios incluidos, mediante:

- Uso de formularios estandarizados de extracción de datos
- Extracción por duplicado o verificación para minimizar errores
- Registro de características clave de los estudios (diseño, participantes, intervenciones, medidas de resultado)
- Contacto con autores originales cuando sea necesario para obtener datos faltantes o aclaraciones

La extracción estructurada facilita la posterior síntesis y análisis comparativo de los hallazgos.

2.1.3.3.6 Evaluación de Calidad y Riesgo de Sesgo

Un componente esencial de la metodología PRISMA es la evaluación crítica de la calidad metodológica de cada estudio incluido y su susceptibilidad a sesgos. Esta evaluación permite:

- Identificar limitaciones metodológicas que podrían afectar la validez de los resultados
- Graduar la confianza en los hallazgos de acuerdo con la robustez de los métodos empleados
- Informar la interpretación de resultados y las conclusiones derivadas

Existen diversas herramientas validadas para esta evaluación, como la Cochrane Risk of Bias Tool para ensayos clínicos, ROBINS-I para estudios no aleatorizados, o AMSTAR para revisiones sistemáticas, entre otras (Whiting et al., 2016).

2.1.3.3.7 Síntesis de Resultados

PRISMA establece directrices para dos aproximaciones complementarias:

- **Síntesis cualitativa:** Integración narrativa y estructurada de los hallazgos, identificando patrones, consistencias y discrepancias entre los estudios.
- **Síntesis cuantitativa (metaanálisis):** Cuando es apropiado y factible, integración estadística de los resultados numéricos para obtener estimaciones combinadas con mayor precisión y poder estadístico.

La decisión sobre el tipo de síntesis más apropiado depende de la homogeneidad de los estudios, disponibilidad de datos cuantitativos y naturaleza de la pregunta de investigación.

2.1.3.3.8 Presentación e Interpretación de Resultados

La metodología PRISMA enfatiza la presentación transparente y completa de los resultados, incluyendo:

- Visualización clara mediante tablas y gráficos (forest plots para metaanálisis)
- Evaluación de la certeza o confianza en el cuerpo de evidencia (por ejemplo, utilizando el sistema GRADE)
- Discusión equilibrada que considere fortalezas y limitaciones de la evidencia
- Contextualización de los hallazgos en relación con conocimientos previos y sus implicaciones prácticas.

2.2 Marco de antecedentes

La gestión de residuos médicos es un tema de gran relevancia para el sector salud, debido a su impacto directo en la salud pública, el medio ambiente y la operación eficiente de las instituciones sanitarias. En Colombia, diversas investigaciones desarrolladas en la Escuela de

Estudios Industriales y Empresariales de la Universidad Industrial de Santander han abordado esta problemática desde distintas perspectivas metodológicas y conceptuales.

En 2024, Acelas Gómez presentó un modelo de simulación dinámico-sistémica aplicado a la gestión sostenible de residuos sólidos urbanos. Aunque su estudio se enfoca en residuos urbanos en general, aporta una visión integral que permite analizar la complejidad de los sistemas de gestión y los factores sociales, políticos y operativos que influyen en su desempeño. Este enfoque es valioso para comprender la dinámica de la gestión de residuos médicos, que también requiere la coordinación de múltiples actores y procesos en la cadena logística hospitalaria.

Por otro lado, Manrique Saavedra (2025) desarrolló un modelo matemático de optimización para la recolección de residuos hospitalarios, que considera la heterogeneidad de la flota de vehículos, la carga compartida y la planificación en múltiples periodos. Este trabajo enfatiza la importancia del ruteo y la gestión de inventarios en la cadena farmacéutica, integrando la segregación de residuos peligrosos y no peligrosos, así como la logística inversa. Su investigación contribuye a la búsqueda de soluciones eficientes para minimizar costos y riesgos sanitarios en la gestión de residuos médicos.

Además, Bautista Chinchilla (2015) elaboró un estado del arte sobre modelos de optimización en logística hospitalaria, donde sistematiza actividades vinculadas con la gestión de residuos médicos, como la gestión de inventarios farmacéuticos, programación de rutas y asignación de recursos. Su revisión destaca la complejidad de la logística hospitalaria y la necesidad de adaptar los modelos cuantitativos al contexto latinoamericano para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los procesos.

Estos antecedentes reflejan un desarrollo sólido en la investigación sobre la optimización y gestión de residuos en entornos hospitalarios y urbanos, abordados desde metodologías

diversas como la simulación sistémica, la formulación matemática y la revisión bibliográfica. Sin embargo, aún resulta necesario consolidar y analizar críticamente estos avances mediante revisiones sistemáticas que integren y comparen enfoques y resultados, con el fin de fortalecer la gestión integral de residuos médicos en contextos específicos como el colombiano.

2.3 Revisión Sistemática de la Literatura

2.3.1 Ecuación de búsqueda

Esta investigación se centra en la identificación y análisis sistemático de herramientas cuantitativas aplicadas en la gestión de residuos médicos dentro de la cadena de suministro del cuidado de la salud. A través de una exhaustiva revisión sistemática de la literatura, siguiendo la metodología PRISMA, se pretende identificar las técnicas de optimización, simulación y otros enfoques cuantitativos más relevantes utilizados para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y costo-efectividad de la gestión de residuos médicos.

La ecuación de búsqueda principal se formuló con base en la combinación de tres componentes fundamentales: términos relacionados con residuos médicos, herramientas cuantitativas y gestión/cadena de suministro. Esta estructura permite capturar documentos que aborden específicamente la aplicación de métodos cuantitativos en la gestión de residuos sanitarios, contribuyendo a un mejor entendimiento de las mejores prácticas y brechas de conocimiento en este campo crítico para la salud pública y sostenibilidad ambiental.

2.3.2 Revisión de la literatura gris

La revisión de la literatura gris sobre gestión de residuos médicos y aplicación de herramientas cuantitativas en la cadena de suministro del cuidado de la salud, utilizando Google Académico,

permitió obtener una comprensión inicial del tema y orientar el desarrollo de la estrategia de búsqueda sistemática. Este proceso exploratorio ayudó a identificar conceptos clave y terminología relevante que se organizó en las siguientes categorías:

- **Gestión de Residuos Médicos:** residuos hospitalarios, residuos clínicos, residuos biomédicos, manejo de desechos médicos, tratamiento de residuos, disposición final, segregación de residuos, cadena de suministro inversa.
- **Herramientas Cuantitativas Aplicadas:** optimización matemática, simulación de procesos, investigación de operaciones, modelado de rutas, programación lineal, algoritmos de optimización, análisis de costos, logística de residuos, planificación de capacidades.
- **Cadena de Suministro del Cuidado de la Salud:** logística hospitalaria, gestión de operaciones en salud, supply chain management en salud, sistemas de información hospitalaria, trazabilidad de residuos, gestión integrada de residuos, sustentabilidad en el sector salud.
- **Normativas y Marco Regulatorio:** Decreto 2676 de 2000 (Colombia), PGIRS (Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos), clasificación de residuos médicos, protocolos de bioseguridad, cumplimiento normativo, gestión ambiental hospitalaria.
- **Gestión Integral de Residuos Médicos:** generación, segregación, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento, disposición final, trazabilidad, manejo seguro.
- **Cadena de Suministro Hospitalaria:** abastecimiento de insumos médicos, logística interna, distribución hospitalaria, logística inversa, procesos clínicos-logísticos, gestión operativa en salud.
- **Economía Circular en Salud:** reutilización de materiales, reducción de residuos, valorización energética, reciclaje hospitalario, eficiencia de recursos, ciclo cerrado.

- **Sostenibilidad en Instituciones de Salud:** uso eficiente de recursos, gestión ambiental, responsabilidad social, prácticas ecoeficientes, indicadores de sostenibilidad, salud ambiental institucional.

2.3.3 Selección de la base de datos

Para la presente investigación, se ha seleccionado Scopus y Web of Science como las principales bases de datos para la búsqueda y recopilación de información. Las dos bases de datos ofrecen una cobertura extensa y multidisciplinaria, incluyendo artículos científicos, actas de conferencias y otras fuentes académicas de alta calidad. Además de su amplio alcance, estas destacan por su capacidad para ofrecer herramientas avanzadas de búsqueda y análisis. Estas funcionalidades permiten no solo identificar publicaciones relevantes en el área de la gestión de residuos médicos y aplicación de herramientas cuantitativas en la cadena de suministro del cuidado de la salud, sino también organizar y filtrar los resultados por criterios como año de publicación, tipo de documento, temática, y más. Esto facilita un enfoque preciso y sistemático en la recopilación de datos sobre las metodologías de optimización, simulación y otras técnicas cuantitativas aplicadas en la gestión de residuos médicos, asegurando que la investigación se sustente en literatura académica actualizada y relevante.

2.3.4 Definición de criterios para el análisis de la revisión de literatura

Con motivo de seleccionar los artículos más adecuados para esta revisión sistemática, se tuvo en consideración:

Tabla 3. Criterios de inclusión y exclusión

Criterios	Descripción
De Inclusión	<ul style="list-style-type: none">● Artículos seleccionados mediante la ecuación de búsqueda con palabras clave del tema.● Documentos en bases de datos con acceso completo● Documentos en inglés y español● Tipos de documentos: Artículos y Review
De Exclusión	<ul style="list-style-type: none">● Documentos que son versiones preliminares o resúmenes y que no han sido reemplazados por versiones completas● Duplicados entre Bases de Datos (WOS y Scopus)● Abstract relevante que indique el uso de herramientas cuantitativas en la gestión de residuos médicos.
De Calidad	<ul style="list-style-type: none">● Artículos que, pese a coincidir con los términos de búsqueda utilizados, no abordan de manera específica o relevante el eje temático principal de la investigación

Nota. Contiene los criterios aplicados en la revisión sistemática para definir qué artículos fueron considerados pertinentes y cuáles se descartaron en el análisis. Fuente: Elaboración propia.

2.3.5 Prototipo y formulación de la ecuación de búsqueda

Con base en los conceptos identificados en la revisión de la literatura en gris, se desarrolló una estrategia de búsqueda exhaustiva para bases de datos académicas. Siguiendo las directrices de la metodología PRISMA, se formularon ecuaciones de búsqueda específicas para cada base de datos, adaptadas a su sintaxis particular. El proceso de refinamiento de estas ecuaciones permite optimizar la recuperación de estudios relevantes sobre herramientas cuantitativas aplicadas en la gestión de residuos médicos.

Tabla 4. *Primera ecuación de búsqueda*

<i>Bases de Datos</i>	<i>Ecuación de búsqueda</i>	<i>Resultados</i>
-----------------------	-----------------------------	-------------------

Scopus

TITLE-ABS-KEY (("medical waste" OR "healthcare waste" OR "hospital waste" OR "clinical waste" OR "biomedical waste" OR "medical waste management") AND ("supply chain" OR "logistics" OR "operations research" OR "optimization" OR "simulation" OR "mathematical modeling" OR "quantitative methods") AND ("management" OR "treatment" OR "disposal" OR "recycling"))

617

Nota. Expone la ecuación de búsqueda aplicada en la base de datos Scopus, con ajustes específicos en los términos y operadores para dicha plataforma. Fuente: Elaboración propia.

Esta ecuación de búsqueda recupera documentos que contienen los términos especificados en el título, resumen o palabras clave. A partir de la búsqueda en la base de datos con esta ecuación, se obtuvieron inicialmente 617 resultados en Scopus.

Tabla 5. *Segunda ecuación de búsqueda*

<i>Bases de Datos</i>	<i>Ecuación de búsqueda</i>	<i>Resultados</i>
-----------------------	-----------------------------	-------------------

Web of science

```
("medical waste" OR "healthcare waste" OR "hospital waste" OR "clinical waste" OR "biomedical waste") 266 AND ("supply chain management" OR "logistics" OR "operations research" OR "optimization" OR "simulation" OR "mathematical modeling" OR "quantitative analysis") AND ("treatment" OR "disposal" OR "management system" OR "waste management")
```

Nota. Presenta la ecuación de búsqueda utilizada en la base de datos Web of Science (WoS), con los descriptores y operadores booleanos aplicados. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la búsqueda en la base de datos Web of Science con esta ecuación, se obtuvieron inicialmente 266 resultados. Estos documentos serán analizados en profundidad para identificar los estudios más relevantes sobre las herramientas cuantitativas aplicadas en la gestión de residuos médicos en el contexto de la cadena de suministro del cuidado de la salud. Este proceso de revisión y selección permitirá identificar la literatura más relevante para sustentar el desarrollo de la investigación.

2.4 Análisis bibliométrico

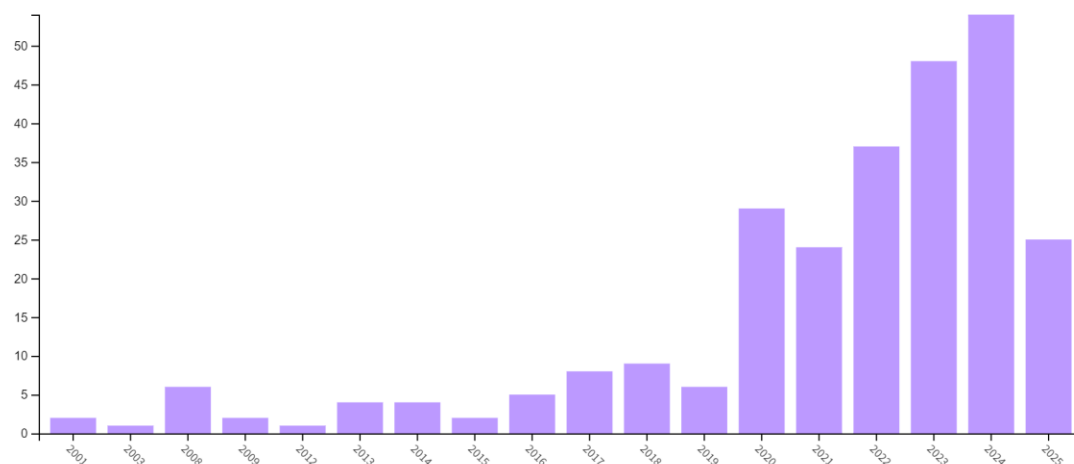
Con el objetivo de poder explorar la producción científica sobre la temática abordada en este proyecto, se plantea realizar un ejercicio de análisis bibliométrico a partir de los artículos recopilados en las dos bases de datos seleccionadas, Web of science y Scopus, por medio de la ecuación de búsqueda antes propuesta.

El estudio se desarrollará en dos fases. En la primera de ellas se realizará un análisis de 4 indicadores de tendencia de forma independiente para cada una de las bases de datos. Estos indicadores serán:

- Cantidad de publicaciones anuales
- Cantidad de publicaciones por territorio
- Distribución por área temática
- Análisis de concurrencia de palabras (VOSviewer)

En la segunda fase se procederá a realizar una comparación e interrelación o contraste de los resultados obtenidos en cada base de datos, lo que permitirá establecer patrones de tendencia y algunas semejanzas y diferencias entre ambos conjuntos de datos.

Figura 1. *Publicaciones anuales en Web of sciences*

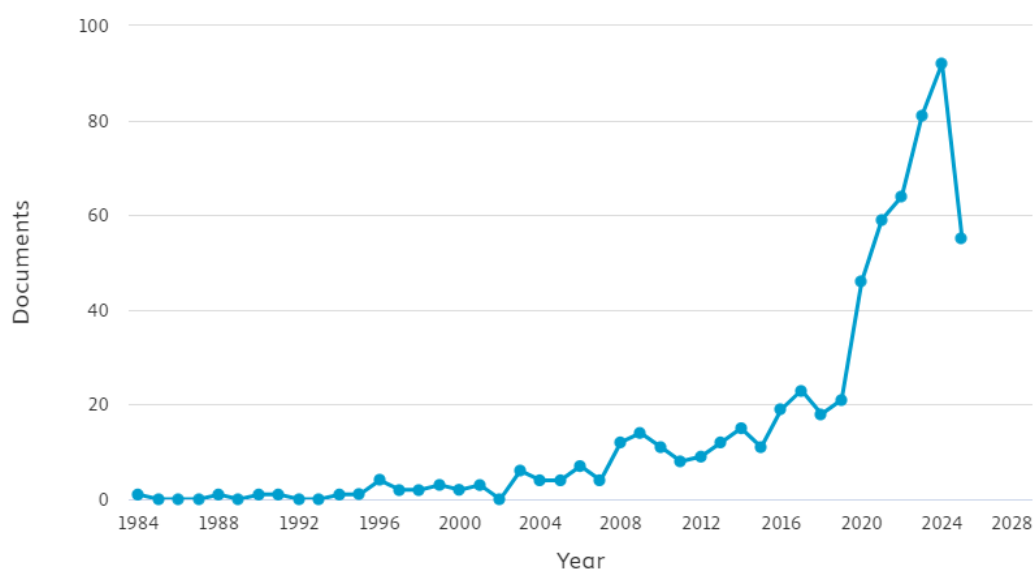


Nota. Gráfico elaborado a partir de los resultados obtenidos en la base de datos Web of Science según la ecuación de búsqueda definida. Fuente: Elaboración propia con datos de Web of Science.

La gráfica demuestra que hasta el año 2019 la cantidad de publicaciones relacionadas con la gestión de residuos médicos era relativamente baja, destacándose apenas 5 documentos en ese

año. Sin embargo, a partir del 2020 se evidencia un aumento importante en la producción científica, lo cual podría estar relacionado con los efectos de la pandemia por Covid-19 que impulsó el interés por mejorar los sistemas sanitarios y de manejo de residuos. Esta tendencia se mantiene en ascenso en los años siguientes, con un notable crecimiento en 2022 que alcanza 35 publicaciones, y consolidándose aún más en 2023 y 2024 con 43 y 49 documentos respectivamente. En lo que va del 2025, ya se registran 31 publicaciones, lo que sugiere que podría igualar o superar los años anteriores al finalizar el periodo. Esta evolución refleja un interés sostenido y creciente por parte de la comunidad científica, posicionando esta temática como un campo de estudio en consolidación y alta vigencia.

Figura 2. *Publicaciones anuales en Scopus*

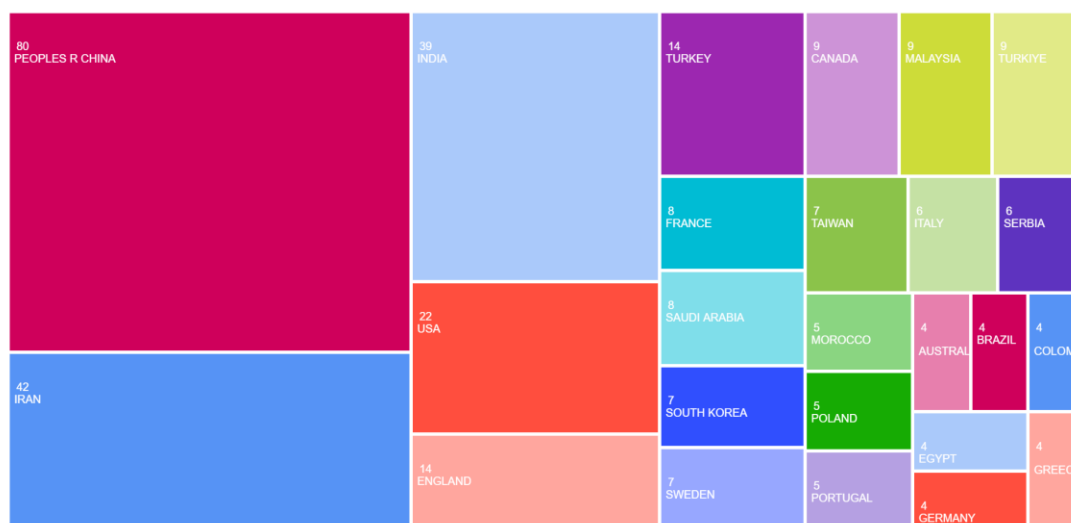


Nota. Gráfico elaborado a partir de los resultados obtenidos en la base de datos Scopus según la ecuación de búsqueda definida. Fuente: Elaboración propia con datos de Scopus.

En la gráfica de Scopus se puede evidenciar que hasta el año 2018 la cantidad de publicaciones sobre esta temática era baja, con menos de 20 artículos anuales, lo cual muestra un interés incipiente en el tema. A partir del 2019 se empieza a notar un aumento progresivo, alcanzando

un pico importante en el año 2020 con 46 publicaciones, probablemente influenciado por la pandemia del Covid-19 que impulsó la investigación en el área de la gestión hospitalaria. Esta tendencia sigue en ascenso durante los siguientes años, destacándose el 2023 con 81 artículos y el 2024 como el año con mayor producción (92 documentos), lo cual refleja un interés creciente de la comunidad científica. Aunque en 2025 se reportan menos publicaciones (55), es importante tener en cuenta que el año aún no ha finalizado, por lo que esa cifra podría aumentar. En general, se observa una línea creciente que demuestra el fortalecimiento y consolidación de esta línea de investigación.

Figura 3. Publicaciones por país y territorio en Web of science treemap

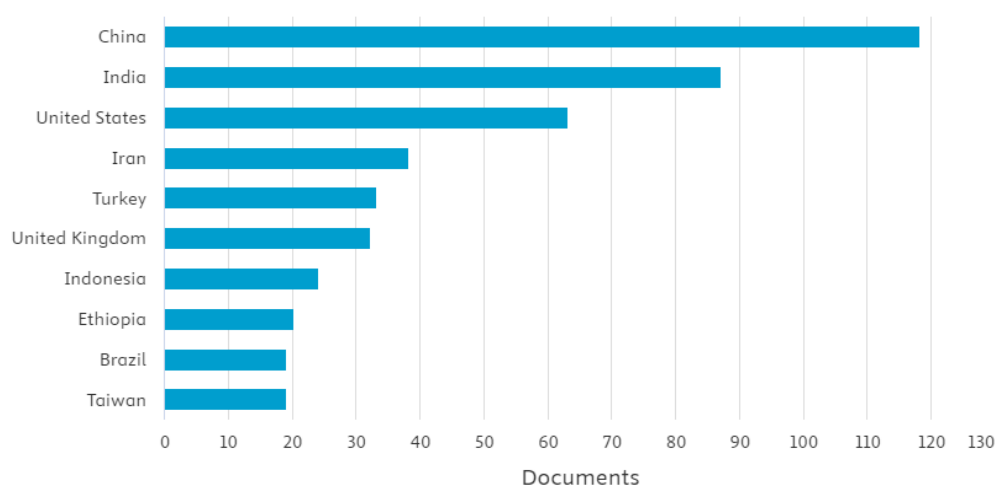


Nota. Gráfico tipo treemap elaborado a partir de los resultados obtenidos en la base de datos Web of Science según la ecuación de búsqueda aplicada. Fuente: Elaboración propia con datos de Web of Science.

La gráfica revela que China lidera ampliamente la producción científica sobre la temática con 80 publicaciones, seguida por Irán con 42 e India con 39, lo cual evidencia un protagonismo notable de países asiáticos en el desarrollo de investigaciones sobre la gestión de residuos médicos. Estados Unidos también tiene una participación destacada con 22 publicaciones,

consolidándose como un actor clave en el contexto global. En Europa, se observa una representación importante de países como Inglaterra y Turquía con 14 publicaciones cada uno, así como Francia y Arabia Saudita con 8 registros, y Corea del Sur, Suecia y Taiwán con 7 cada uno. Otros países con aportes significativos son Italia, Serbia, Marruecos, Polonia y Portugal, además de naciones latinoamericanas como Brasil, Colombia y México. La presencia de registros en regiones como África, Medio Oriente y Europa del Este, incluyendo Egipto, Nigeria, Ucrania y Emiratos Árabes, sugiere una amplia distribución geográfica del interés investigativo. En conjunto, los resultados evidencian que esta es una temática de alcance global, con mayor intensidad en Asia, pero con contribuciones relevantes desde América, Europa, África y Oceanía, lo que refleja una creciente preocupación mundial por mejorar la gestión de residuos médicos desde diversos contextos nacionales.

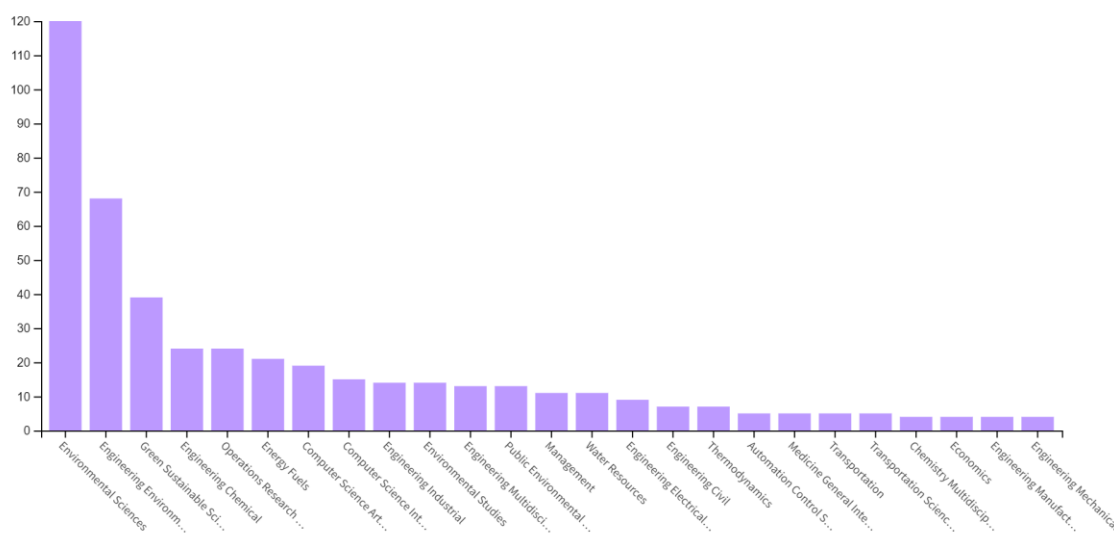
Figura 4. *Publicaciones por país y territorio en Scopus*



Nota. Gráfico tipo treemap elaborado a partir de los resultados obtenidos en la base de datos Scopus según la ecuación de búsqueda aplicada. Fuente: Elaboración propia con datos de Scopus.

La gráfica muestra que China encabeza la producción científica en esta temática con un total de 118 publicaciones, lo que evidencia un liderazgo contundente y un fuerte compromiso con el desarrollo de investigaciones relacionadas con la gestión de residuos médicos. Le sigue India con 87 artículos, consolidándose también como un actor clave en esta línea de investigación. En tercer lugar, se encuentra Estados Unidos con 63 publicaciones, mostrando su participación y sostenida. Otros países que destacan son Irán y Turquía con 38 y 33 documentos respectivamente, mientras que el Reino Unido se posiciona con 32 artículos, lo cual demuestra un interés continuo desde Europa. También aparecen en el listado países como Indonesia (24), Etiopía (20), Brasil y Taiwán (ambos con 19), lo que evidencia una amplia participación internacional. En general, estos resultados reflejan una distribución geográfica diversa, con un predominio de países asiáticos, pero también con aportes significativos desde América, Europa y África, lo cual reafirma que se trata de una temática con interés global y creciente.

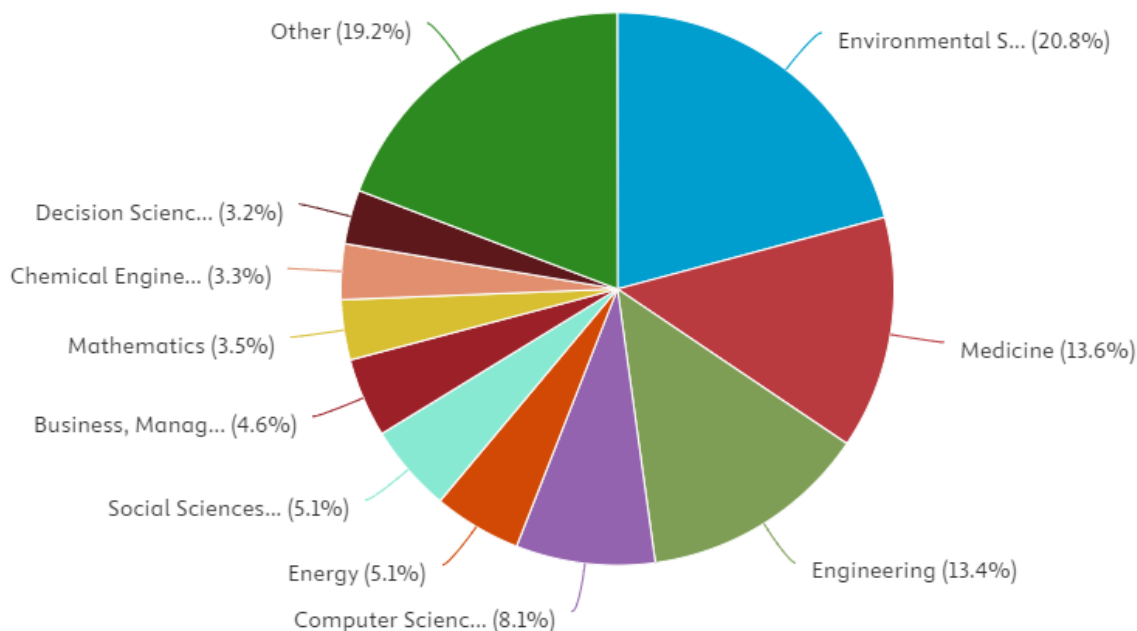
Figura 5. Distribución por área temática en Web of science



Nota. Gráfico elaborado a partir de los resultados obtenidos en la base de datos Web of Science, organizados según las áreas temáticas reportadas. Fuente: Elaboración propia con datos de Web of Science.

La gráfica anterior nos permite visualizar que hay una fuerte predominancia de esta temática en el campo de Environmental Sciences con 120 publicaciones, lo cual refleja que esta es el área central de la investigación en gestión de residuos médicos, convirtiéndose en la más interesada y beneficiada con los diferentes aportes sobre el tema. Seguidamente encontramos Engineering Environmental con 68 publicaciones y Green Sustainable Science Technology con 39, lo que evidencia la importancia de los enfoques en la ingeniería y sostenibilidad en el desarrollo de soluciones. También destacan Engineering Chemical y Operations Research Management Science con 24 publicaciones cada una, reforzando la relación entre este campo y la aplicación de herramientas cuantitativas como la optimización y la simulación. Por otro lado, aparecen áreas como Energy Fuels con 21 publicaciones y Computer Science Artificial Intelligence con 19, lo que resulta coherente con la creciente incorporación de modelos matemáticos, inteligencia artificial y tecnologías emergentes en el diseño de estrategias para el manejo de estos residuos. Más abajo en la distribución, se encuentran Environmental Studies y Engineering Industrial con 14 publicaciones cada una, además de Engineering Multidisciplinary, Public Environmental Occupational Health, Water Resources y Management, todas con más de 10 registros, lo que indica una participación desde disciplinas complementarias. Finalmente, se identifican contribuciones desde campos como Medicine General Internal, Engineering Electrical and Electronic, Engineering Civil, Computer Science Theory and Methods, Economics, Health Care Sciences Services y Telecommunications, que, aunque con menor frecuencia, demuestran que esta temática es abordada desde múltiples frentes, lo cual amplía sus posibilidades de análisis y aplicación en diferentes contextos.

Figura 6. *Distribución por área temática en Scopus*

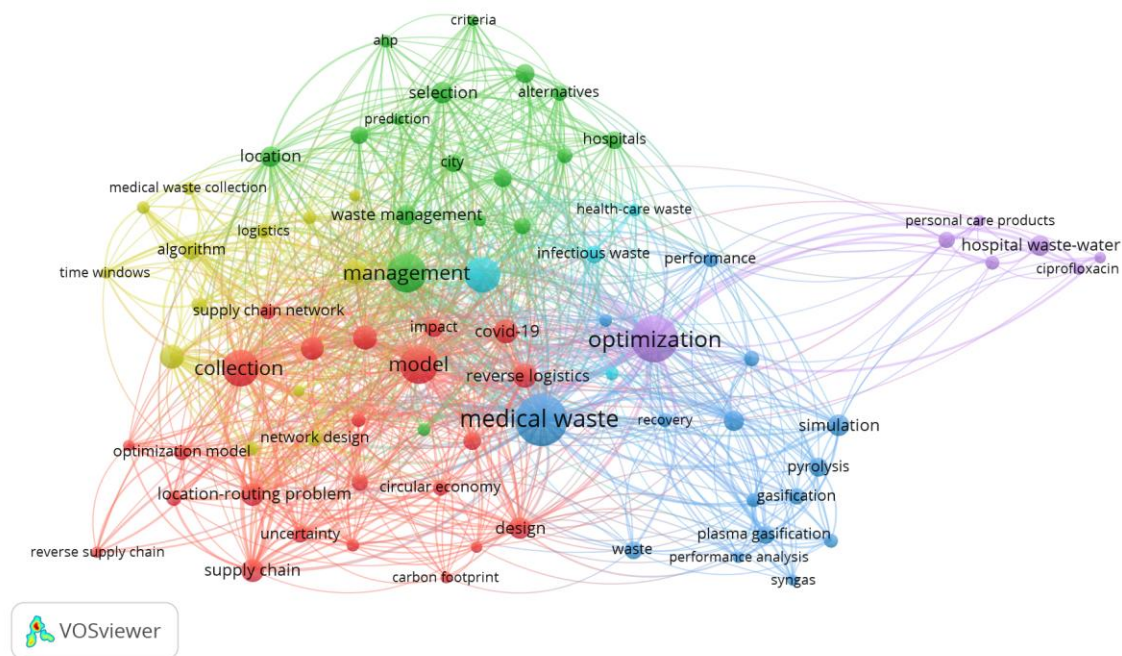


Nota. Gráfico elaborado a partir de los resultados obtenidos en la base de datos Scopus, organizados según las áreas temáticas reportadas. Fuente: Elaboración propia con datos de Scopus.

La gráfica muestra que el área de Ciencias Ambientales lidera la producción científica relacionada con la gestión de residuos médicos, con un total de 243 publicaciones, lo cual indica un enfoque marcado en los impactos ecológicos y la sostenibilidad del manejo de estos residuos. En segundo lugar, se encuentra Medicina con 159 documentos, lo que refleja el interés del sector salud en comprender y mejorar los procesos asociados a la generación y disposición de residuos clínicos. Muy cerca se ubica Ingeniería con 156 publicaciones, reafirmando su papel central en el desarrollo de soluciones técnicas y logísticas. También se destacan Ciencias de la Computación con 95 publicaciones, asociadas principalmente al uso de modelos matemáticos, simulación y herramientas tecnológicas para optimizar la gestión. Otras áreas relevantes son Energía y Ciencias Sociales (ambas con 60 publicaciones), Administración de Empresas (54), Matemáticas (41), Ingeniería Química (38) y Ciencias de la Decisión (37), lo cual demuestra que esta temática es abordada desde múltiples disciplinas. Estos datos

evidencian un enfoque interdisciplinario, con predominio de áreas técnico-científicas, pero también con aportes desde las ciencias sociales y económicas, lo que amplía las perspectivas de análisis y las posibilidades de intervención integral.

Figura 7. *Distribución por área temática en Web of science*

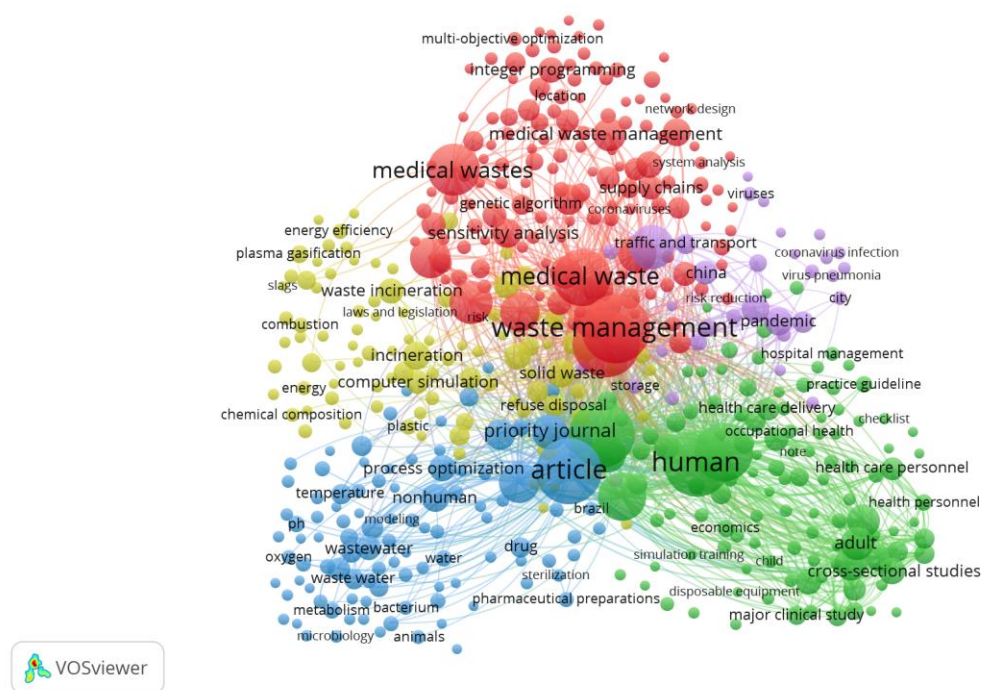


Nota. Gráfico elaborado a partir de los resultados obtenidos en la base de datos Web of Science, procesados y visualizados con la herramienta VOSviewer. Fuente: Elaboración propia con datos de Web of Science.

El mapa de co-ocurrencia elaborado con VOSviewer, a partir de los resultados obtenidos en Web of Science entre 2001 y 2025, permite identificar diversas agrupaciones temáticas que evidencian cómo se ha estructurado la investigación en torno a la gestión de residuos médicos. El clúster rojo agrupa términos relacionados con la logística y la operación del sistema, como collection, supply chain, location-routing problem, reverse supply chain y network design, reflejando un fuerte enfoque en la planificación, diseño y optimización de redes para el manejo

de residuos. El clúster azul, por su parte, reúne conceptos técnicos y de valorización como simulation, pyrolysis, gasification, plasma gasification y performance analysis, lo que muestra el interés por tecnologías avanzadas para el tratamiento térmico de residuos y su aprovechamiento energético. El clúster verde se enfoca en aspectos de gestión estratégica y toma de decisiones, destacando términos como selection, location, criteria, AHP, waste management y prediction, que sugieren el uso de métodos multicriterio para optimizar procesos. El clúster morado incluye conceptos vinculados con la calidad del agua y residuos hospitalarios específicos, como hospital waste-water, ciprofloxacin y personal care products, lo que refleja líneas de investigación centradas en contaminantes emergentes. Finalmente, el clúster central azul claro articula los principales nodos de la red, medical waste, management, optimization, model, covid-19, que conectan los distintos enfoques bajo una perspectiva integradora. Este panorama indica que la literatura en Web of Science ha abordado la temática desde una visión técnica, operativa, estratégica y ambiental, consolidando su relevancia científica a lo largo del tiempo.

Figura 8. *Distribución por área temática en Scopus*



Nota. Gráfico elaborado a partir de los resultados obtenidos en la base de datos Scopus, procesados y visualizados con la herramienta VOSviewer. Fuente: Elaboración propia con datos de Scopus.

El mapa de co-ocurrencia elaborado con VOSviewer, a partir de los resultados obtenidos en Scopus entre 1984 y 2025, permite identificar cinco agrupaciones temáticas que evidencian cómo se ha estructurado la investigación en torno a la gestión de residuos médicos. El clúster rojo, donde se agrupan términos como waste management, medical waste, genetic algorithm y sensitivity analysis, reflejando el fuerte interés en herramientas cuantitativas y modelos de optimización para el tratamiento y planificación de estos residuos. El clúster verde, por su parte, se enfoca en aspectos relacionados con el personal de salud y la gestión hospitalaria, incluyendo términos como health care delivery, occupational health y health care personnel, lo que indica una preocupación constante por el impacto de los residuos en los equipos humanos que intervienen en la atención médica. En otro nivel, el clúster azul agrupa conceptos como wastewater, process optimization y bacterium, que aluden a enfoques más técnicos y

ambientales, centrados en el tratamiento de aguas residuales y los procesos químicos y biológicos relacionados. El clúster amarillo se relaciona con la disposición final de los residuos y su valorización energética, incluyendo términos como *incineration* y *energy efficiency*, lo cual señala una línea de investigación interesada en transformar el residuo en recurso. Finalmente, el clúster morado evidencia el impacto que tuvo la pandemia por Covid-19 en esta temática, con términos como *pandemic*, *coronavirus infection* y *hospital management*, que muestran cómo esta coyuntura intensificó el interés por el manejo seguro de residuos infecciosos y la implementación de nuevas medidas en entornos hospitalarios. En el centro del mapa se destacan nodos como *article*, *priority journal* y *solid waste*, lo que indica que el tema ha logrado una posición central en la producción científica y continúa vigente como objeto de estudio.

2.4.1 Comparación

El análisis bibliométrico de las publicaciones revela patrones significativos al comparar las bases de datos Scopus y Web of Science en cuatro dimensiones clave: publicaciones por año, distribución geográfica, áreas temáticas y co-ocurrencia de palabras clave.

En cuanto a las publicaciones por año, ambas bases evidencian un crecimiento constante desde 2019, con un punto de inflexión visible en 2020, muy probablemente influenciado por la pandemia del COVID-19. Scopus muestra una tendencia más pronunciada, alcanzando su pico máximo en 2024 con 92 publicaciones, mientras que Web of Science reporta 49 en el mismo año. Esta diferencia podría estar asociada a la mayor cobertura documental y multidisciplinar que ofrece Scopus. Cabe mencionar que en 2025 se observa una disminución parcial en ambas bases, atribuible posiblemente al proceso incompleto de indexación de ese año, lo cual resalta el valor de utilizar ambas fuentes para obtener una visión más completa del comportamiento temporal.

En relación con la distribución geográfica, Scopus posiciona a China, India y Estados Unidos como los principales productores de literatura científica sobre la gestión de residuos médicos, reflejando un claro liderazgo asiático en esta temática. Web of Science, por su parte, también destaca a China, pero otorga mayor visibilidad a países europeos como Inglaterra y Turquía, así como a naciones latinoamericanas como Brasil, México y Colombia. Esta diferencia sugiere que, mientras Scopus ofrece una cobertura más amplia y global, Web of Science presenta una representación más equilibrada de diversas regiones, lo que favorece la comprensión del tema desde diferentes contextos culturales y regulatorios.

Respecto a las áreas temáticas, ambas bases coinciden en ubicar a las Ciencias Ambientales y la Ingeniería como los campos con mayor producción científica. Scopus sobresale por su carácter interdisciplinar, integrando también a la Medicina, Ciencias de la Computación, Ciencias Sociales y Administración, lo cual permite abordar la gestión de residuos médicos desde una perspectiva más holística. Web of Science, en cambio, muestra una concentración mayor en ingeniería ambiental, operaciones logísticas y sostenibilidad, lo que refleja un enfoque más técnico y especializado en los procesos de optimización y tratamiento de residuos.

Finalmente, el análisis de co-ocurrencia de palabras clave revela diferencias interesantes en la orientación temática. En Scopus predominan términos como genetic algorithm, waste management, occupational health y energy efficiency, lo que evidencia una preocupación transversal por la optimización, el impacto humano y el aprovechamiento energético. Web of Science, aunque también incluye conceptos como optimization y reverse logistics, destaca con mayor fuerza temas relacionados con la planificación estratégica, la valorización energética y la evaluación multicriterio, reafirmando su énfasis en aspectos técnicos y metodológicos.

En conclusión, Scopus ofrece una cobertura más diversa en términos de cantidad de publicaciones, amplitud geográfica y abordaje interdisciplinario, mientras que Web of Science

aporta una visión más especializada, con énfasis en ingeniería, sostenibilidad y tratamiento técnico de los residuos. Ambas bases se complementan y resultan necesarias para una comprensión integral del panorama investigativo en torno a la gestión de residuos médicos desde un enfoque cuantitativo y aplicado.

3. Metodología PRISMA

Para garantizar la rigurosidad del proceso de búsqueda y selección de literatura, aplicamos la metodología PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Esta metodología nos permitió organizar de manera transparente y reproducible las etapas de la revisión sistemática, desde la identificación de los estudios hasta la síntesis final de resultados. En este apartado describimos, paso a paso, las fases que seguimos en el presente estudio.

3.1 Planteamiento de pregunta de investigación

Definimos la interrogante que orientó todo el protocolo: ¿Cuáles son, cómo se han aplicado y qué impacto han tenido las herramientas cuantitativas, tales como la optimización y la simulación, en la gestión de residuos médicos dentro de la cadena de suministro del cuidado de la salud? . Esta pregunta la estructuramos bajo la lógica PEO, delimitando la población/entorno (organizaciones y sectores productivos), la exposición/enfoque (marcos y modelos de valor compartido, incluidas sus adaptaciones) y los resultados (efectos organizacionales —desempeño, ventaja, innovación— y efectos sociales). Con base en ella preespecificamos bases de datos (Scopus y Web of Science), ecuaciones de búsqueda, criterios de inclusión/exclusión y variables de extracción, asegurando trazabilidad según PRISMA 2020.

3.2 Desarrollo del Protocolo

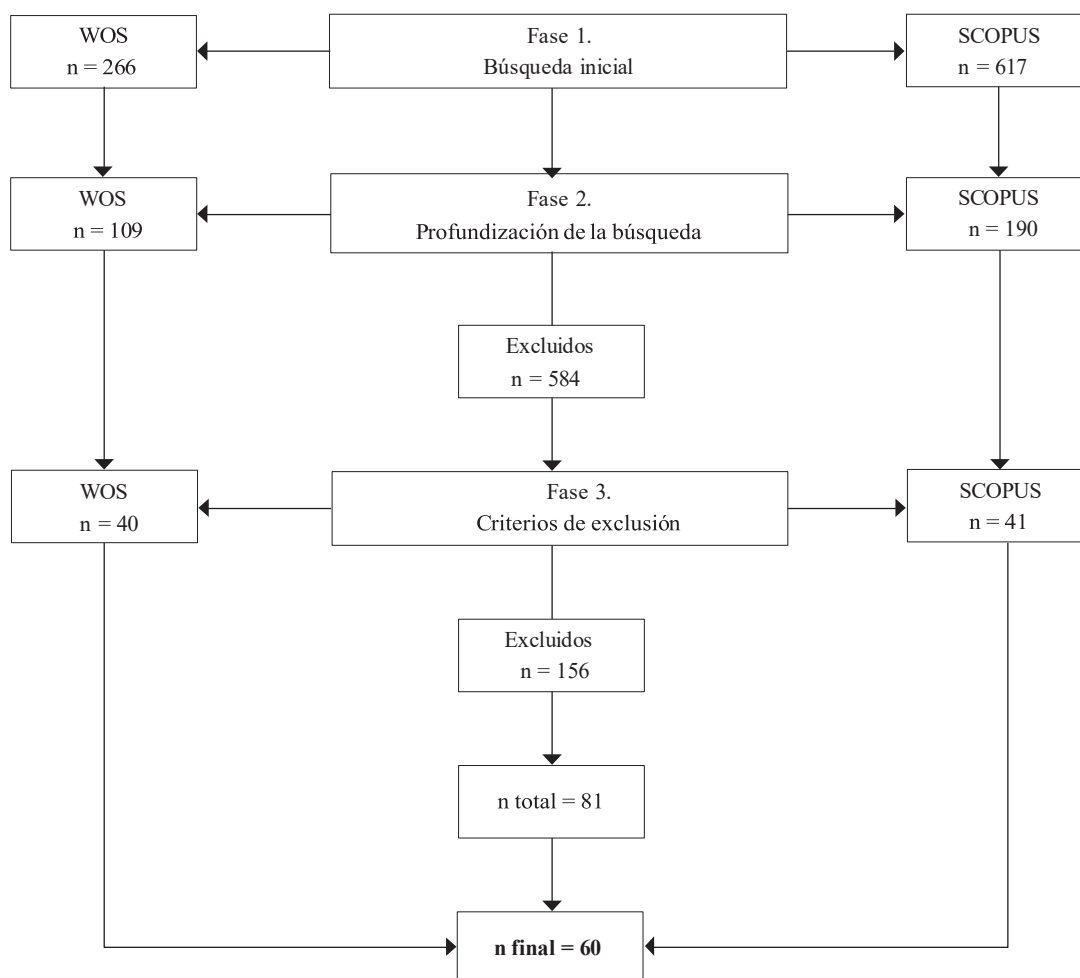
Posteriormente, elaboramos el plan del proyecto, en el cual definimos de manera detallada las etapas, actividades y recursos necesarios para llevar a cabo la revisión sistemática. En este protocolo dejamos consignados los objetivos generales y específicos, los criterios de inclusión y exclusión, las estrategias de búsqueda en las bases de datos seleccionadas (Scopus y Web of Science), así como los procedimientos de selección, extracción y análisis de la información. De igual forma, establecimos un cronograma de trabajo y las herramientas a emplear para garantizar la trazabilidad y la transparencia del proceso, siguiendo los lineamientos de la metodología PRISMA 2020. Este protocolo nos permitió planear cuidadosamente la investigación, anticipar posibles limitaciones y asegurar que los resultados obtenidos fueran confiables y replicables.

3.3 Búsqueda Exhaustiva de Literatura

En esta fase diseñamos e implementamos estrategias de búsqueda sistemáticas y exhaustivas que garantizaron la identificación del mayor número posible de estudios relevantes. Como se mencionó previamente en la sección 2.1.3 Revisión Sistemática, seleccionamos como bases de datos principales a Scopus y Web of Science, por su amplia cobertura multidisciplinaria y rigor en la indexación de literatura científica. Las ecuaciones de búsqueda se formularon combinando descriptores en inglés relacionados con “medical waste”, “healthcare waste” y “hospital waste”, junto con términos vinculados a herramientas cuantitativas como “optimization”, “simulation” y “mathematical modeling”. Adicionalmente, realizamos una exploración en literatura gris mediante Google Académico, lo que permitió identificar conceptos y sinónimos clave para refinar la estrategia de búsqueda. Todo este procedimiento fue documentado y organizado para asegurar la exhaustividad y reproducibilidad del proceso, en coherencia con las directrices de la metodología PRISMA 2020.

Para facilitar la comprensión del proceso, presentamos a continuación el diagrama de flujo PRISMA 2020, en el cual se sintetizan las principales fases de la revisión: identificación, cribado y elegibilidad/inclusión. Este esquema resume de manera visual cómo organizamos y depuramos la información desde la búsqueda inicial hasta la selección final de los estudios incluidos en el análisis.

Figura 9. Diagrama de flujo de Revisión sistemática



Nota. Adaptado de Sánchez-Serrano, Pedraza-Navarro y Donoso-González (2022). Fuente: Bordón. Revista de Pedagogía, 74(3), 51–66.

3.4 Selección de Estudios

El desarrollo del Objetivo 2 de nuestra investigación consistió en seleccionar, organizar y analizar los documentos obtenidos a partir de la búsqueda exhaustiva. Para este fin llevamos un registro detallado en una matriz de Excel, la cual quedó como apéndice del estudio y permitió documentar cada paso de las fases de selección siguiendo los lineamientos del protocolo PRISMA 2020.

Este proceso abarcó desde la Fase 1, correspondiente a la búsqueda inicial en bases de datos reconocidas —266 artículos en Web of Science (WoS) y 617 artículos en Scopus—, hasta las etapas de depuración y análisis. La aplicación sistemática de criterios predefinidos aseguró que los estudios incluidos fueran pertinentes en términos temáticos, metodológicos y contextuales, consolidando así una base científica sólida para las fases analíticas posteriores.

En la Fase 2: Profundización de la búsqueda, aplicamos los criterios de inclusión y exclusión establecidos en el protocolo metodológico, priorizando artículos con acceso completo y publicados en inglés o español. Como resultado, de los registros iniciales recuperados se seleccionaron 109 artículos provenientes de WoS y 190 artículos de Scopus, mientras que 584 documentos fueron excluidos por no cumplir con los criterios definidos. Este proceso se resume de manera gráfica en el diagrama de flujo PRISMA, que muestra con transparencia la reducción progresiva del conjunto inicial de artículos.

3.5 Extracción de Datos

Durante el proceso de extracción, nos enfocamos en la recopilación sistemática de información relevante de los estudios seleccionados. Para ello diseñamos un Excel donde se recopilaba datos fundamentales que funcionaron como formulario estandarizado, en la cual registramos características clave de cada publicación, tales como diseño metodológico, herramientas cuantitativas aplicadas y principales hallazgos.

La Fase 3: Aplicación de los criterios de exclusión complementó este procedimiento y se desarrolló en dos etapas. En primer lugar, identificamos y eliminamos 62 artículos duplicados, obteniendo un total de 237 documentos únicos. Después, realizamos la exclusión por abstract, verificando que cada estudio respondiera a la pregunta de investigación planteada. Como resultado, 156 artículos fueron descartados, y seleccionamos finalmente 40 provenientes de WoS y 41 de Scopus, para un total de 81 artículos que cumplieron con los requisitos necesarios para avanzar a la siguiente fase.

3.6 Evaluación de Calidad

En esta etapa realizamos una evaluación crítica de la calidad metodológica de los estudios incluidos y de su posible riesgo de sesgo, con el propósito de asegurar la solidez y confiabilidad de la evidencia sintetizada. Este proceso nos permitió identificar limitaciones metodológicas que podían comprometer la validez de algunos resultados y graduar la confianza en los hallazgos según la robustez de los métodos aplicados en cada investigación.

Aplicamos la evaluación por calidad mediante la herramienta Scimago Journal & Country Rank (SJR), lo que permitió restringir la muestra a artículos publicados en revistas clasificadas en los cuartiles Q1 y Q2, asegurando un nivel elevado de rigurosidad científica. Como resultado, obtuvimos una selección final de 60 artículos, los cuales cumplían tanto con los criterios de inclusión y exclusión previamente definidos como con los estándares de calidad metodológica. Adicionalmente, se depuraron dos artículos que no pudieron ser descargados desde las bases de datos, lo que imposibilitó su verificación y análisis detallado.

4. Análisis de la literatura.

3.7 Síntesis de Resultados

Con la muestra final de 60 artículos seleccionados, llevamos a cabo un proceso de lectura detallada y análisis comparativo que nos permitió identificar patrones, coincidencias y discrepancias en los enfoques de cada estudio. A partir de este ejercicio, observamos que varios artículos compartían temáticas o proponían modelos cercanos en su manera de entender la gestión de residuos médicos.

Con base en estas coincidencias temáticas y conceptuales, procedimos a agrupar los documentos en cinco grandes categorías, que representan los ejes más relevantes de la revisión sistemática. La clasificación se fundamentó en tres criterios principales:

1. Tipo de herramienta cuantitativa aplicada.
2. Nivel de modelación presente en cada estudio.
3. Propósito analítico principal.

Este procedimiento dio lugar a una segmentación excluyente y mutuamente diferenciada, con lo cual fue posible organizar la literatura de manera estructurada y coherente. El resultado se plasmó en una tabla de agrupación temática incluida en los apéndices del proyecto, que sintetiza la clasificación de los artículos con base en criterios metodológicos definidos previamente.

La estrategia de clasificación nos permitió realizar un análisis profundo dentro de cada subgrupo y, al mismo tiempo, efectuar una comparación transversal entre enfoques, lo que facilitó la identificación de patrones de uso, enfoques predominantes, vacíos de investigación y oportunidades para estudios futuros. De este modo, aseguramos que la síntesis de resultados no solo describiera los hallazgos, sino que aportara valor al campo de estudio a través de una caracterización rigurosa y comparativa del corpus analizado.

A continuación, se presentan las agrupaciones temáticas resultantes de la síntesis de los 60 artículos seleccionados, organizadas en cinco categorías principales. Cada una de ellas recoge las coincidencias conceptuales y metodológicas identificadas en la literatura, permitiendo una caracterización clara y estructurada de los enfoques predominantes en la gestión de residuos médicos.

Tabla 6. *Clasificación de la revisión de la literatura por grupos*

Grupo	Nombre	Descripción del criterio de clasificación
G1	Optimización logística	Incluye estudios que implementan modelos matemáticos o computacionales con el objetivo de optimizar procesos dentro de la cadena de gestión de residuos médicos. Las herramientas utilizadas pueden incluir: programación lineal o entera mixta, algoritmos genéticos, algoritmos de optimización estocástica, heurísticas y metaheurísticas (como colonia de hormigas, recocido simulado, búsqueda tabú, etc.). Los objetivos típicos son minimizar costos, distancias o tiempos, o maximizar eficiencia logística. Estos modelos se aplican a problemas como ruteo de recolección de residuos, ubicación de centros de acopio, logística inversa y planificación integrada.
G2	Simulación aplicada	Agrupación de estudios que emplean simulación como herramienta principal para representar y analizar sistemas relacionados con residuos médicos. Esto incluye simulación de eventos discretos, dinámica de sistemas, modelos computacionales basados en agentes o simulaciones termodinámicas. Algunos estudios

también combinan simulación con validación experimental o entrenamiento (por ejemplo, simulación en realidad virtual o simulación de procesos biológicos). Este grupo prioriza la representación de escenarios y la comprensión dinámica de procesos, en vez de la optimización directa.

G3	Fuzzy y evaluación multicriterio	Corresponde a artículos que utilizan técnicas de toma de decisiones bajo incertidumbre y modelos multicriterio. Las herramientas más comunes son: lógica difusa (fuzzy sets), AHP (Analytic Hierarchy Process), DEMATEL, MCDM (Multi-Criteria Decision Making), y sus variantes híbridas. Se usan para seleccionar contratistas, evaluar tecnologías, clasificar riesgos o establecer prioridades cuando existen múltiples factores relevantes. Este grupo se caracteriza por transformar juicios cualitativos en valores cuantificables con técnicas estructuradas.
G4	Análisis normativo, descriptivo económico	Este grupo agrupa estudios que no utilizan herramientas formales de simulación ni optimización, sino que se centran en análisis exploratorios o normativos. Incluye estudios basados en encuestas (como KAP: knowledge, attitudes and practices), análisis de ciclo de vida (ACV), análisis económico de costos y errores, estudios observacionales y revisiones estructuradas. También incorpora enfoques conceptuales como PESTEL o análisis temático. Su principal aporte es documentar prácticas

actuales, estructuras normativas, percepciones y análisis de impacto económico o ambiental sin modelación formal.

G5	Aplicaciones clínicas y operativas	Incluye investigaciones aplicadas directamente en contextos hospitalarios o clínicos que no hacen uso de herramientas cuantitativas formales. Aquí se ubican estudios cualitativos (entrevistas, análisis temático), propuestas de rediseño de procedimientos, análisis de sostenibilidad práctica o iniciativas de reutilización. Este grupo es útil para entender cambios operativos reales, innovación desde la práctica clínica y percepción de profesionales, sin recurrir a modelos matemáticos complejos.
-----------	------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Nota. Muestra la categorización de los artículos seleccionados en la revisión sistemática, organizados en cinco grupos temáticos según su enfoque metodológico y de aplicación.

Fuente: Elaboración propia.

3.7.1 Grupo 1: Optimización Logística

Este grupo agrupa estudios que utilizan herramientas cuantitativas de optimización para resolver problemas logísticos complejos relacionados con la gestión de residuos médicos. En total, se analizaron 17 artículos científicos que aplican modelos matemáticos —principalmente de programación entera mixta, algoritmos heurísticos y metaheurísticos— con el propósito de mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y minimizar impactos ambientales en diferentes eslabones de la cadena de suministro hospitalaria (Gao et al., 2021; Khallaf et al., 2022; Liu et al., 2020).

La mayoría de los estudios se concentran en resolver problemas de localización de instalaciones (como centros de recolección o tratamiento), ruteo de vehículos para la recolección de residuos infecciosos, diseño de redes logísticas reversas y toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre (Palomino-Pérez et al., 2021; Luo & Liao, 2022; Kordi et al., 2023). Estos modelos se aplican en escenarios reales en países de Asia, África y América Latina, lo que permite evidenciar la creciente preocupación global por mejorar la sostenibilidad en la gestión de residuos hospitalarios, especialmente en contextos críticos como desastres naturales o pandemias como el COVID-19 (Liu et al., 2021; Govindan et al., 2022).

El valor de este grupo de artículos radica en su capacidad para traducir problemas logísticos altamente específicos y regulados en modelos formales y computacionalmente resolubles, ofreciendo soluciones aplicables en políticas públicas, administración hospitalaria y planificación ambiental. Además, varios estudios integran criterios múltiples —económicos, sociales y ecológicos— dentro de sus funciones objetivo, marcando una tendencia hacia la toma de decisiones multicriterio en la gestión sanitaria (Govindan et al., 2022; Liu et al., 2021). En términos metodológicos, se destacan enfoques como:

- **Programación matemática** (MILP, LP, MINLP) para formular redes logísticas integradas (Gao et al., 2021; Palomino-Pérez et al., 2021).
- **Algoritmos genéticos, colonia de hormigas e híbridos** como soluciones eficientes a problemas NP-hard (Liu et al., 2020; Khallaf et al., 2022).
- **Modelos híbridos** que integran programación estocástica o análisis multicriterio (MCDM) ante condiciones de incertidumbre (Liu et al., 2021).
- **Enfoques de logística inversa y economía circular**, que promueven estrategias de reducción, reciclaje y valorización de residuos (Govindan et al., 2022; Luo & Liao, 2022).

Esta convergencia entre herramientas cuantitativas y necesidades reales del sector salud revela una tendencia metodológica robusta y en expansión, con potencial de impacto tanto operacional como ambiental.

3.7.1.1 Optimización de localización y ruteo

La localización de instalaciones para el tratamiento y disposición de residuos médicos, junto con el ruteo eficiente de su recolección y transporte, se ha consolidado como una de las principales estrategias de mejora logística en la gestión hospitalaria. Esta línea de investigación ha cobrado especial relevancia debido a la creciente generación de residuos peligrosos y a la necesidad de mejorar los tiempos, costos y seguridad del sistema sanitario.

Diversos estudios han abordado este desafío mediante modelos cuantitativos que integran la toma de decisiones sobre dónde ubicar centros de tratamiento o transferencia, y cómo diseñar rutas óptimas para la recolección. Por ejemplo, Palomino-Pérez et al. (2021) desarrollan un enfoque basado en programación lineal entera mixta, con el fin de minimizar los costos logísticos y ambientales en un sistema regional de gestión de residuos infecciosos. Su modelo considera múltiples instalaciones, diferentes tipos de residuos y capacidades limitadas, lo que permite una planificación robusta para escenarios reales.

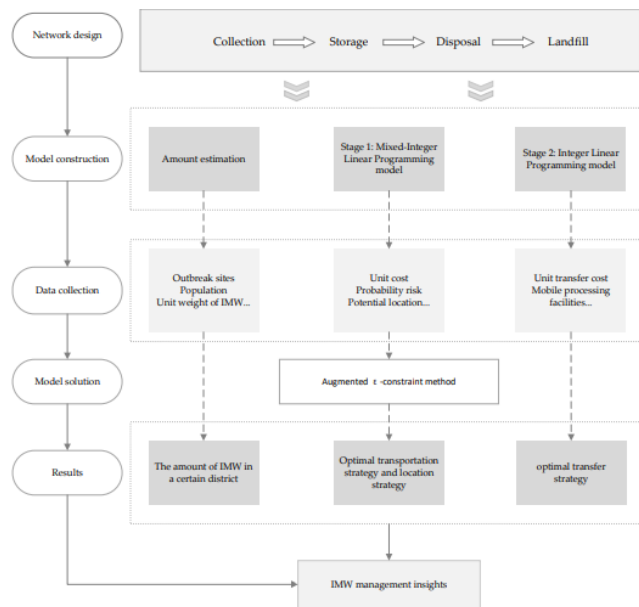
En un contexto similar, Nikzamid y Baradaran (2021) aplican un modelo de optimización biobjetivo que busca simultáneamente minimizar la distancia recorrida por los vehículos y reducir las emisiones contaminantes. Este enfoque combina criterios ambientales y operativos, mostrando que una planificación estratégica puede contribuir significativamente a la sostenibilidad del sistema sanitario.

Además de los modelos deterministas, otros trabajos han incorporado la incertidumbre inherente al sistema. Liu et al. (2021) y Xin et al. (2023) proponen modelos estocásticos que consideran variaciones en la cantidad diaria de residuos, aplicando herramientas de simulación y programación estocástica para ajustar dinámicamente la localización de instalaciones temporales y la redistribución de rutas según escenarios cambiantes.

Una perspectiva complementaria es la introducción de algoritmos de optimización heurística. Por ejemplo, Li et al. (2021) emplean un algoritmo de colonia de hormigas para resolver problemas de ruteo con ventanas de tiempo, garantizando la recolección puntual en hospitales y laboratorios. Estos modelos bioinspirados han demostrado ser altamente eficientes para escenarios de alta complejidad combinatoria.

Los hallazgos de estos estudios coinciden en que la integración simultánea de decisiones de localización y ruteo mejora significativamente la eficiencia del sistema logístico, tanto en términos económicos como ambientales. La aplicación de herramientas de modelación avanzada, como programación entera, simulación estocástica y algoritmos evolutivos, permite construir soluciones personalizadas según el contexto geográfico, el volumen de residuos y los recursos disponibles en cada región (Gao et al., 2021; Liu et al., 2021; Khallaf et al., 2022).

Figura 10. *Diagrama de flujo del modelo de diseño de red logística para residuos médicos*



Nota. Tomado de Liu et al. (2021). Fuente: International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(10), 5316.

La Figura 10 ilustra el enfoque metodológico propuesto por Liu et al. (2021) para el diseño de una red logística destinada a la gestión de residuos médicos infecciosos durante la pandemia por COVID-19. El modelo consta de cinco etapas secuenciales: diseño de red, construcción del modelo, recolección de datos, solución del modelo y obtención de resultados.

Durante la construcción del modelo, se implementan diferentes enfoques de programación matemática, entre ellos modelos de programación lineal entera mixta y biobjetivo, con el fin de optimizar tanto las rutas como la ubicación de instalaciones. Estos estudios consideran múltiples variables como sitios de brote, población, costos, riesgos, ubicación potencial de centros y características de instalaciones móviles. La solución se logra mediante técnicas de optimización como el método ϵ -constraint, lo que permite encontrar estrategias robustas y sostenibles para la toma de decisiones en la gestión de residuos médicos infecciosos (Gao et al., 2021; Palomino-Pérez et al., 2021; Nikzamir & Baradaran, 2021; Xin et al., 2023).

3.7.1.2 Algoritmos bioinspirados aplicados a la optimización logística de residuos médicos

La aplicación de **algoritmos bioinspirados** en la gestión de residuos médicos ha cobrado relevancia en la literatura reciente debido a su capacidad para resolver problemas complejos con múltiples variables y restricciones. Estos algoritmos imitan procesos naturales como la evolución biológica o el comportamiento colectivo de insectos, permitiendo encontrar soluciones eficientes para problemas de ruteo y localización de instalaciones (Liu et al., 2020; Khallaf et al., 2022; Zhang et al., 2024).

Uno de los enfoques más destacados es el uso del **algoritmo de colonia de hormigas (ACO)**. Este fue implementado por Wang et al. (2022) para optimizar rutas de recolección de residuos médicos urbanos considerando múltiples ventanas de tiempo y restricciones ambientales. El estudio demostró que el algoritmo ACO puede adaptarse a contextos urbanos complejos y generar rutas que minimizan los tiempos de viaje y el impacto ambiental, mejorando así la eficiencia del sistema de recolección. En la Figura 10 se presenta un ejemplo representativo del diseño de red resultante en este tipo de estudios.

Por otra parte, Liu et al. (2020) propusieron un modelo que combina programación entera mixta con técnicas bioinspiradas, integrando algoritmos de optimización con componentes heurísticos basados en comportamiento adaptativo. Este enfoque híbrido permitió optimizar simultáneamente la ubicación de centros de procesamiento, el ruteo de vehículos y la asignación de residuos según niveles de riesgo en un entorno afectado por brotes epidémicos.

Asimismo, Ghasemi et al. (2021) y Khallaf et al. (2022) utilizaron algoritmos genéticos e híbridos para simular la cadena de suministro de residuos médicos, logrando resultados superiores a los modelos tradicionales en términos de reducción de costos y tiempo de respuesta

ante fluctuaciones en la cantidad de residuos generados. Estos modelos fueron validados mediante simulaciones discretas y datos reales de generación de residuos hospitalarios.

En conjunto, los estudios revisados resaltan que los algoritmos bioinspirados ofrecen una solución robusta y flexible para la gestión eficiente de residuos médicos, especialmente en contextos donde existe alta variabilidad, incertidumbre o necesidad de decisiones en tiempo real. Además, su capacidad para adaptarse a nuevos datos los hace especialmente útiles en escenarios post-pandemia o de desastres naturales (Liu et al., 2021; Zhang et al., 2024).

3.7.1.3 Logística inversa sostenible en la gestión de residuos médicos

La logística inversa ha emergido como un componente esencial en los sistemas de gestión de residuos médicos, particularmente en contextos donde la sostenibilidad, la economía circular y la eficiencia operacional son prioridades estratégicas. A diferencia de la logística tradicional —orientada al flujo directo de insumos y productos—, la logística inversa se enfoca en la recolección, transporte, clasificación, tratamiento y disposición de residuos generados, optimizando estos procesos bajo criterios ambientales y económicos.

En la literatura revisada se identifican múltiples enfoques cuantitativos que abordan esta problemática desde una perspectiva sostenible, incorporando variables como el riesgo biológico, las emisiones contaminantes, los costos asociados y la reutilización potencial de recursos. Por ejemplo, Luo y Liao (2022) diseñan una red de logística inversa para el tratamiento de residuos hospitalarios peligrosos, integrando criterios de sostenibilidad como la minimización de emisiones de CO₂ y la distancia total recorrida. Este modelo, aplicado en un contexto epidémico, muestra mejoras significativas en eficiencia ambiental y operativa.

Asimismo, Govindan et al. (2022) y Kordi et al. (2023) proponen modelos multiobjetivo para el diseño de redes logísticas que incluyen la selección de sitios de tratamiento, la asignación óptima de rutas y la incorporación de factores ambientales. Estas investigaciones consideran a múltiples actores del sistema sanitario, favoreciendo la toma de decisiones colaborativa y adaptativa.

Desde un enfoque aplicado, Wu et al. (2020) y Gao et al. (2021) evalúan sistemas de logística inversa en entornos urbanos, evidenciando que estas herramientas permiten reducir costos y al mismo tiempo avanzar hacia una transición de economía circular en la gestión de residuos médicos.

De forma transversal, estos estudios coinciden en que la logística inversa sostenible no solo mejora la eficiencia del sistema de residuos, sino que también contribuye a la seguridad pública, al disminuir los riesgos de exposición y propagación de agentes patógenos. Además, promueve la responsabilidad compartida entre los distintos actores del sistema sanitario, lo que refuerza su sostenibilidad institucional.

3.7.2 Grupo 2: Simulación Aplicada

Este grupo integra estudios que emplean técnicas de simulación como herramienta principal para representar, modelar y analizar diversos aspectos de la gestión de residuos médicos. En total, se analizaron 11 artículos científicos que abordan la simulación desde distintos enfoques, incluyendo simulación de eventos discretos, simulación retrospectiva, simulación térmica y de procesos biológicos, así como entornos virtuales interactivos orientados al entrenamiento clínico. Estas simulaciones permiten explorar el comportamiento de sistemas complejos sin intervenir directamente en la realidad, lo cual es especialmente valioso en contextos

hospitalarios con alto riesgo biológico o condiciones operativas variables (Erdogan & Yilmazoglu, 2021; Wu et al., 2021; Prasetiyo et al., 2024; Ferreira et al., 2024).

En este grupo, los modelos simulados no buscan principalmente optimizar una función objetivo, como sucede en el Grupo 1, sino representar la dinámica de procesos reales para evaluar escenarios, validar protocolos, mejorar prácticas de entrenamiento o anticipar resultados bajo condiciones específicas. Esta aproximación es fundamental para fortalecer la toma de decisiones basada en evidencia en el contexto hospitalario, especialmente ante situaciones críticas como pandemias, desastres o nuevas tecnologías de tratamiento (Ma et al., 2022; Zhang et al., 2020; Rabbani et al., 2023).

3.7.2.1 Indicadores de desempeño en la gestión de residuos médicos

Por ejemplo, Ferreira et al. (2024) propusieron una metodología de simulación aplicada al análisis de la cadena de suministro hospitalaria en el contexto de la industria 4.0, integrando indicadores de sostenibilidad y desempeño logístico. Este enfoque permitió visualizar brechas críticas entre lo planificado y lo ejecutado, orientando mejoras en los procesos de recolección y disposición final.

De forma complementaria, Prasetiyo et al. (2024) desarrollaron un modelo de bioconversión de residuos alimentarios hospitalarios mediante larvas de mosca soldado negra, incorporando criterios ambientales y de valorización de residuos que fortalecen la sostenibilidad del sistema.

Otros estudios como los de Ma et al. (2022) y Zhang et al. (2020) aplicaron modelos de simulación para analizar escenarios de crisis —epidémicas y de desastres respectivamente—, lo que permitió anticipar impactos, priorizar intervenciones y cuantificar el nivel de resiliencia de los sistemas hospitalarios.

El uso de simulación como herramienta para modelar procesos hospitalarios también se ha implementado en escenarios de gestión de residuos médicos con el propósito de optimizar la logística y la toma de decisiones. Según Wu et al. (2021), la simulación permite anticipar resultados, validar protocolos y prever el impacto de nuevas tecnologías. En el contexto hospitalario, estos modelos permiten simular el comportamiento de los sistemas de gestión de residuos en situaciones de alta presión, como durante pandemias o desastres naturales. Estos enfoques proporcionan una visión integral de los procesos operativos y contribuyen a la toma de decisiones informadas y basadas en evidencia.

Además, el enfoque de simulación de procesos biológicos ha sido ampliamente utilizado para evaluar la efectividad de métodos de tratamiento y desactivación de residuos peligrosos. Zhang et al. (2020) y Tager et al. (2021) proponen modelos que simulan los procesos térmicos y biológicos en el tratamiento de residuos médicos infecciosos, con el fin de reducir los riesgos asociados al manejo de materiales peligrosos. Estos estudios demuestran la importancia de la simulación no solo como una herramienta operativa, sino también como una forma de prever impactos a largo plazo en el medio ambiente y la salud pública.

A continuación, se presenta una síntesis de los estudios identificados en este grupo que aplican herramientas cuantitativas para la evaluación de indicadores clave de desempeño (KPIs) en la gestión de residuos médicos. La tabla resume el tipo de herramienta utilizada, los principales indicadores abordados y el impacto reportado en cada caso, permitiendo una visión clara de cómo estas metodologías han contribuido a mejorar la toma de decisiones en el contexto hospitalario.

Tabla 7. *Comparativo de estudios sobre indicadores de desempeño*

Estudio	Tipo de herramienta	Indicadores evaluados	Impacto reportado
Uddin et al. (2020)	Mapeo de KPIs	Sostenibilidad, riesgo operativo	Identificación de brechas críticas en la gestión hospitalaria
Chowdhury et al. (2021)	Matriz de evaluación	Generación, transporte, Almacenamiento	Generación, transporte, almacenamiento
Islam et al. (2020)	AHP / Fuzzy TOPSIS	Cumplimiento, eficiencia, riesgo	Priorización de medidas correctivas
Dursun et al. (2022)	Evaluación multicriterio	Seguridad, eficiencia	Justificación de inversión en tecnología

Nota. Resume los principales indicadores de desempeño identificados en los estudios revisados, organizados de manera comparativa. Fuente: Elaboración propia a partir de los autores citados en la tabla.

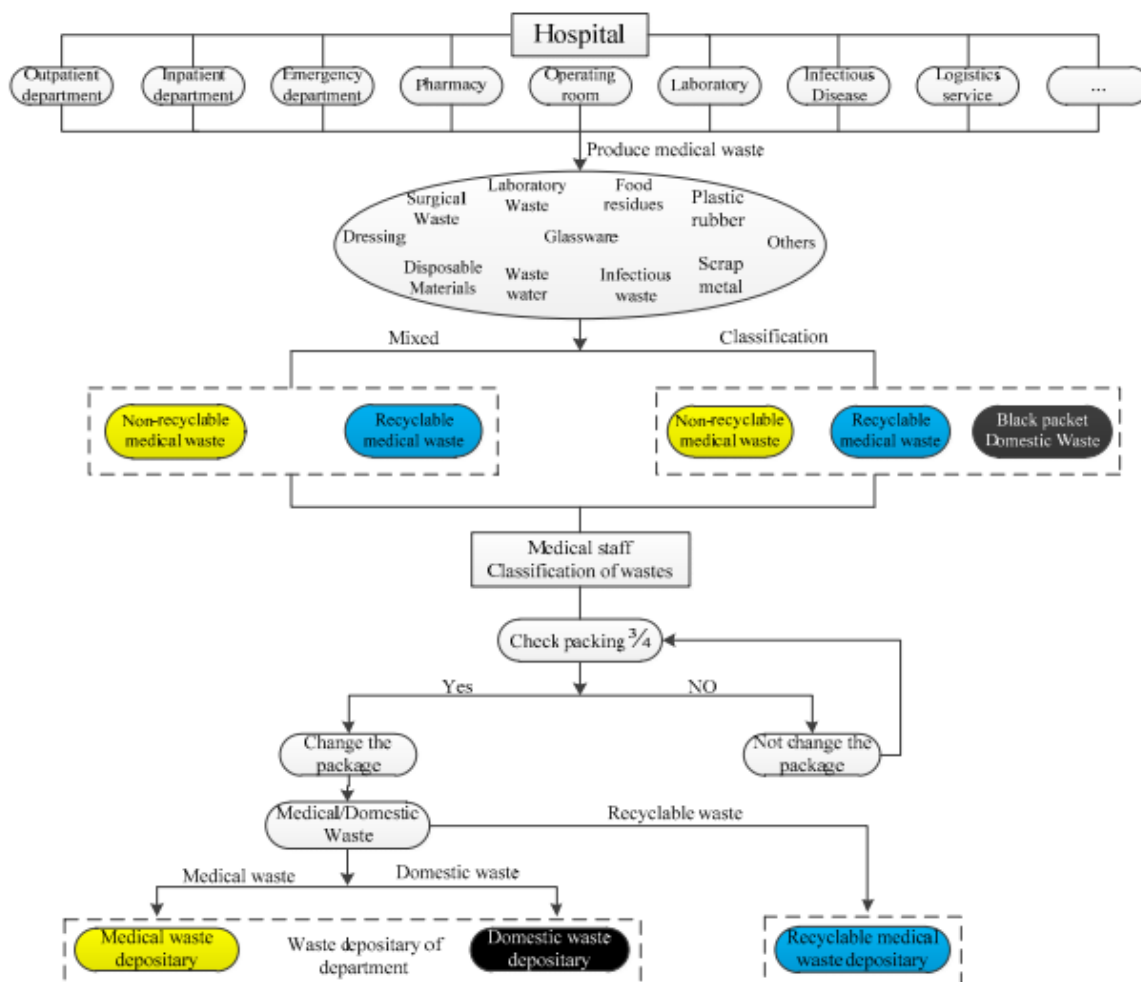
3.7.2.2 Conocimiento, prácticas y actitudes del personal sanitario en la gestión de residuos médicos

La simulación también ha sido empleada como herramienta para modelar y analizar las prácticas del personal sanitario en relación con la segregación, manejo y disposición final de

residuos médicos. Este enfoque permite identificar brechas en el conocimiento, actitudes de riesgo, resistencia al cambio o deficiencias en protocolos, las cuales pueden comprometer la eficiencia y seguridad del sistema hospitalario. Por ejemplo, Wu et al. (2021) aplicaron simulaciones con escenarios de capacitación y protocolos diferenciados, evaluando su impacto en la mejora del cumplimiento de normas de segregación en hospitales. A través de un entorno virtual interactivo, se modelaron reacciones del personal ante distintos niveles de formación y presión asistencial, concluyendo que la capacitación periódica y la retroalimentación directa mejoran significativamente las tasas de separación correcta.

Del mismo modo, Ma et al. (2022) desarrollaron una simulación que incorporaba variables psicosociales (como actitud hacia el riesgo, percepción de utilidad del protocolo y carga de trabajo) y mostraron que el diseño de los flujos de residuos no solo depende de la infraestructura, sino de los comportamientos individuales y colectivos de los actores involucrados. Esta simulación reveló cómo las decisiones de segregación no solo son un acto de infraestructura, sino un proceso condicionado por factores humanos y organizacionales.

Figura 11. *Modelo de clasificación de residuos médicos en hospitales de Beijing.*



Nota. El diagrama representa la clasificación de los residuos médicos implementada en hospitales de Beijing. Adaptado de Cost–benefit analysis of medical waste treatment and disposal modes based on AHP–Fuzzy comprehensive evaluation method (p. 6), por H. Liu y J. Yao, 2018, Sustainability, 10(9), 3250.

La Figura 11 representa un modelo de flujo propuesto por Liu y Yao (2018) para describir el proceso de generación, clasificación y disposición de residuos médicos en hospitales de Beijing. Este diagrama permite identificar los principales puntos de decisión y errores comunes en la clasificación, como la mezcla de residuos reciclables con no reciclables, y evidencia cómo la intervención del personal médico puede modificar el destino final de los residuos. Este tipo de representación es clave para comprender las fallas estructurales en la gestión hospitalaria, y

sirve como base para diseñar intervenciones más efectivas y adaptadas a las condiciones reales del entorno hospitalario.

En estudios similares, Ferreira et al. (2024) y Wu et al. (2021) emplean simulaciones de procesos de clasificación para identificar y mitigar los puntos críticos en la gestión de residuos, logrando mejorar la eficiencia y reducción de riesgos en los hospitales. Estos enfoques muestran cómo las herramientas de simulación pueden ofrecer soluciones prácticas y ajustadas a las características particulares de cada hospital.

3.7.2.3 Herramientas de análisis de ciclo de vida (ACV) en la gestión de residuos médicos

El análisis de ciclo de vida (ACV) se ha consolidado como una herramienta clave para evaluar el impacto ambiental total de los sistemas de gestión de residuos médicos, desde la generación hasta su disposición final. Esta metodología permite comparar distintos escenarios operativos en términos de emisiones, consumo energético, huella de carbono y sostenibilidad, contribuyendo así a decisiones más informadas en el diseño de políticas sanitarias y ambientales.

En la revisión se identificaron varios estudios que aplican modelos de ACV para evaluar tecnologías de tratamiento como incineración, esterilización y relleno sanitario, considerando no solo el desempeño técnico, sino también el impacto ambiental y los costos sociales asociados. Un ejemplo relevante de esto es el estudio de Prasetyo et al. (2024), que realizó una evaluación de impacto ambiental en el tratamiento biológico de residuos alimentarios hospitalarios, demostrando que esta tecnología tiene un menor impacto ambiental en comparación con métodos convencionales.

Asimismo, Wu et al. (2021) desarrollaron una herramienta de simulación de ciclo de vida para evaluar los impactos ambientales de la incineración frente a la esterilización de residuos

médicos. El estudio muestra que la incineración, aunque es un método comúnmente utilizado, presenta mayores impactos en términos de emisiones de CO₂, comparado con alternativas como la esterilización a vapor, que presenta menos efectos negativos para el medio ambiente. Además, los estudios de Liu et al. (2020) y Govindan et al. (2022) han demostrado que la incorporación de tecnologías de tratamiento alternativas y el rediseño de los flujos de residuos pueden reducir significativamente la huella de carbono en comparación con los métodos convencionales. Estos estudios revelan que la aplicación de ACV en la gestión de residuos médicos es esencial para la toma de decisiones informadas, garantizando prácticas más sostenibles en la gestión de residuos hospitalarios, especialmente en contextos de alta demanda sanitaria como las emergencias globales.

Este tipo de estudios pone en evidencia la utilidad del ACV como herramienta integral para apoyar decisiones sostenibles en el sistema hospitalario, especialmente en contextos donde se busca equilibrar eficiencia operativa con responsabilidad ambiental.

Tabla 8. *Comparación de estudios que aplican ACV en residuos médicos hospitalarios*

Estudio	Tecnologías Evaluadas	Impacto Ambiental	Conclusiones
Wu et al. (2021)	Esterilización a vapor vs. Incineración	Menor impacto ambiental esterilización	La esterilización genera menos emisiones de CO ₂ en comparación con la incineración.
Prasetyo et al. (2024)	Bioconversión (larvas)	Menor impacto en comparación con incineración	La bioconversión con larvas tiene un menor impacto ambiental que métodos convencionales.

Ma et al. (2022)	Esterilización, Incineración	Impacto reducido con esterilización	Los métodos de baja emisión, como la esterilización, son más sostenibles.
Govindan et al. (2022)	Economía circular	Reducción significativa de huella de carbono	La implementación de economía circular reduce el impacto ambiental.

Nota. Presenta la síntesis comparativa de estudios que aplican Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en la gestión de residuos médicos hospitalarios, organizada a partir de la revisión de los autores citados. Fuente: Elaboración propia a partir de los autores citados en la tabla.

La Tabla 8 compara los estudios revisados que aplican Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en la gestión de residuos médicos hospitalarios. Los estudios abordan tecnologías de tratamiento como incineración, esterilización a vapor y bioconversión, y comparan los impactos ambientales tales como las emisiones de CO₂, consumo energético, huella de carbono y sostenibilidad.

- Wu et al. (2021) evaluaron el impacto ambiental de la esterilización a vapor frente a la incineración en hospitales, mostrando que la esterilización genera un menor impacto en términos de emisiones.
- Prasetyo et al. (2024) realizaron un ACV sobre la bioconversión de residuos alimentarios hospitalarios mediante el uso de larvas de mosca soldado negra, destacando que esta tecnología tiene un menor impacto ambiental comparado con métodos convencionales.
- Ma et al. (2022) y Zhang et al. (2020) utilizaron simulación ACV para evaluar las alternativas de tratamiento de residuos médicos durante el brote de COVID-19,

concluyendo que los métodos de baja emisión, como la esterilización, son más sostenibles.

- Govindan et al. (2022) y Kordi et al. (2023) aplicaron ACV en el contexto de economía circular en la gestión de residuos médicos, demostrando que los enfoques que promueven la reducción, reciclaje y valorización de los residuos generan menos impacto ambiental en comparación con los métodos de tratamiento lineales como la incineración.

3.7.3 Grupo 3: Fuzzy y evaluación multicriterio

El grupo 3, integra un conjunto de artículos que aplican enfoques cuantitativos avanzados en la gestión de residuos médicos. Este grupo se caracteriza por el uso de herramientas matemáticas y computacionales, tales como algoritmos genéticos, programación entera mixta (MILP), simulación discreta, y análisis multicriterio para abordar desafíos logísticos complejos en la cadena de suministro de residuos hospitalarios.

3.7.3.1 Optimización logística en la gestión de residuos médicos

En el campo de la optimización logística, los estudios abordan el ruteo de vehículos y la localización de instalaciones de tratamiento de residuos médicos. Zhang et al. (2024) emplean algoritmos genéticos para optimizar rutas de recolección de residuos médicos urbanos en contextos de alta complejidad, como las ventanas de tiempo y los riesgos temporales de almacenamiento. Este enfoque no solo busca reducir costos operativos, sino también minimizar el impacto ambiental derivado de un transporte ineficiente.

Los algoritmos genéticos se combinan con métodos de optimización multiobjetivo, donde se consideran variables como el costo de transporte, el tiempo de recolección y la capacidad de los vehículos, para lograr soluciones logísticas que sean tanto económicas como sostenibles.

El modelo es flexible y puede adaptarse a diversas condiciones operativas y geográficas, lo que facilita su replicabilidad en diferentes entornos hospitalarios.

3.7.3.2 Simulación aplicada a la gestión de residuos médicos

La simulación se presenta como una herramienta valiosa para modelar y analizar los sistemas de gestión de residuos médicos, especialmente en contextos donde los escenarios cambian rápidamente, como en el caso de desastres naturales o pandemias. Prasetiyo et al. (2024) aplican la simulación de procesos biológicos para evaluar el tratamiento de residuos hospitalarios utilizando larvas de mosca soldado-negra. Este enfoque ofrece una alternativa ecológica a los métodos tradicionales como la incineración, mostrando que la bioconversión tiene un menor impacto ambiental en comparación con los procesos de combustión.

El artículo destaca la viabilidad de la bioconversión como un proceso sostenible para reducir los residuos generados y el impacto ecológico. La simulación se utiliza para modelar diferentes escenarios de tratamiento de residuos, lo que permite a los investigadores comparar alternativas en términos de eficiencia y sostenibilidad.

3.7.3.3 Evaluación multicriterio y toma de decisiones en la gestión de residuos

Los métodos de evaluación multicriterio son cruciales cuando se deben tomar decisiones que involucren múltiples variables y criterios de evaluación, como el costo, riesgo y eficiencia en la gestión de residuos médicos. Mangla et al. (2022) emplean técnicas como AHP (Analytic Hierarchy Process) y Fuzzy TOPSIS para asignar pesos a los indicadores clave en la evaluación de riesgos y la eficiencia de sistemas de gestión de residuos.

En su estudio, estas técnicas de evaluación permiten priorizar medidas correctivas y seleccionar tecnologías de tratamiento más eficaces y adecuadas para entornos hospitalarios de alta complejidad. Las decisiones se basan en una ponderación precisa de los criterios técnicos y

operacionales, lo que facilita una toma de decisiones informada. Los métodos multicriterio ayudan a superar la incertidumbre inherente a las decisiones de gestión hospitalaria bajo condiciones de alta variabilidad.

Tabla 9. *Métodos aplicados en la gestión de residuos médicos*

Método	Descripción	Aplicación en residuos médicos	Fuente
Algoritmos Genéticos	Métodos de optimización inspirados en la evolución natural, utilizados para resolver problemas de ruteo de vehículos y localización de centros de tratamiento.	Optimización de rutas de recolección de residuos médicos urbanos, reduciendo costos y tiempo.	Zhang et al., 2024
Programación Entera Mixta (MILP)	Técnica de optimización matemática que se utiliza para determinar la mejor asignación de recursos en un sistema logístico.	Localización de centros de tratamiento de residuos médicos en hospitales.	Zhang et al., 2024
Simulación de Procesos Biológicos	Modelado de sistemas biológicos y su comportamiento dinámico para prever resultados en escenarios complejos.	Tratamiento de residuos hospitalarios con bioconversión usando larvas de mosca soldado negra.	Prasetiyo et al., 2024

AHP Método de evaluación multicriterio que ayuda a asignar pesos a diferentes criterios basados en decisiones jerárquicas. Evaluación de la eficiencia de sistemas de gestión de residuos médicos en hospitales. Mangla et al., 2022

Fuzzy TOPSIS Método que usa lógica difusa para evaluar y clasificar alternativas bajo condiciones de incertidumbre. Selección de tecnologías de tratamiento y evaluación de riesgos en la gestión de residuos hospitalarios. Mangla et al., 2022

Nota. Sintetiza los métodos identificados en la literatura para la gestión de residuos médicos, organizados según su aplicación y características, a partir de los estudios revisados. Fuente: Elaboración propia a partir de los autores citados en la tabla.

Las herramientas cuantitativas avanzadas, como algoritmos genéticos, simulación de procesos biológicos y evaluación multicriterio, son esenciales para optimizar la gestión de residuos médicos en entornos hospitalarios. Estas herramientas permiten no solo mejorar la eficiencia operativa, sino también garantizar que las decisiones tomadas sean sostenibles y adaptadas a las necesidades locales. La combinación de estos métodos con bioconversión y tecnologías emergentes abre nuevas perspectivas para la gestión ecológica de residuos médicos.

3.7.4 Grupo 4: Análisis normativo, descriptivo o económico

Este grupo reúne los estudios que no aplican herramientas cuantitativas de simulación u optimización, sino que se enfocan en el análisis descriptivo, exploratorio o normativo de la gestión de residuos médicos. En estos trabajos predominan enfoques como encuestas de conocimiento, actitudes y prácticas (KAP), evaluaciones económicas de los costos asociados a

la gestión, estudios de ciclo de vida (ACV), revisiones temáticas o estructuradas, y análisis de marcos regulatorios y políticas públicas.

Su aporte principal radica en documentar las condiciones reales en que se desarrolla la gestión de residuos en distintos contextos sanitarios, evidenciando fortalezas, limitaciones y brechas entre lo normativo y la práctica. A través de estudios como los de Ali et al. (2017) y Windfeld & Brooks (2015), se subraya cómo la falta de infraestructura, capacitación del personal y el incumplimiento de regulaciones afectan la eficacia de la gestión de residuos médicos, incluso cuando existen marcos regulatorios bien establecidos.

Este grupo también incluye estudios sobre el análisis económico de las tecnologías utilizadas en la gestión de residuos, como incineración y esterilización a vapor, destacando las diferencias en costos y eficacia en la eliminación de patógenos, tal como lo explican Zhao et al. (2009) y Tchobanoglous et al. (2014). Además, se aborda la transición hacia estrategias más sostenibles, como el reciclaje y el uso de economía circular, que han sido discutidas por Govindan et al. (2022) y Mesdaghinia et al. (2022), enfocándose en la reducción de costos operativos y el impacto ambiental.

3.7.4.1 Introducción al análisis normativo, descriptivo y económico

La gestión de residuos médicos es un área crítica dentro del sector de la salud, especialmente en los países en desarrollo, donde las infraestructuras y normativas no siempre son suficientes para manejar los residuos de manera efectiva. En este contexto, los enfoques normativos y económicos juegan un papel esencial en la creación de políticas y prácticas que permitan una gestión sostenible.

Windfeld y Brooks (2015) mencionan que los marcos regulatorios internacionales no siempre se aplican eficazmente en países en desarrollo debido a la falta de infraestructura y supervisión.

Además, Khallaf et al. (2022) destacan que la normativa adecuada es fundamental, pero que la falta de cumplimiento puede resultar en impactos negativos significativos tanto para la salud pública como para el medio ambiente.

Estudios recientes como el de Liu et al. (2020) también evidencian la importancia de las directrices internacionales que regulan la gestión de residuos médicos. Sin embargo, sugieren que los marcos regulatorios deben ser adaptados a las realidades locales para asegurar que se implementen de manera efectiva.

3.7.4.2 Marco normativo de la gestión de residuos médicos

El análisis de las regulaciones internacionales también tiene un gran impacto en la implementación local de políticas. La Organización Mundial de la Salud (OMS), en su informe sobre la gestión de residuos médicos, subraya la importancia de seguir directrices claras para garantizar la seguridad del personal sanitario y la comunidad en general. Sin embargo, Ali et al. (2017) encuentran que las políticas de la OMS no siempre se implementan correctamente, especialmente en países con infraestructura deficiente.

Por otro lado, Zhao et al. (2009) comparan los costos de diversas tecnologías de tratamiento, como la incineración y la esterilización a vapor, y concluyen que la incineración es mucho más costosa, principalmente debido a la necesidad de equipos especializados y el consumo de energía.

3.7.4.3 Desafíos económicos en la gestión de residuos médicos

Los costos asociados con la gestión de residuos médicos incluyen tanto el costo directo de los sistemas de tratamiento como los costos indirectos relacionados con los riesgos para la salud pública. Zhao et al. (2009) comparan los costos de diversas tecnologías de tratamiento, como la incineración y la esterilización a vapor, y concluyen que la incineración es mucho más

costosa, principalmente debido a los altos costos de combustible y mantenimiento de los equipos.

Por otro lado, Tchobanoglous et al. (2014) subrayan que, si bien los métodos de tratamiento alternativos como la esterilización presentan un costo inicial menor, los costos operativos pueden ser elevados debido a la necesidad de personal altamente capacitado y la implementación de procesos de monitoreo.

3.7.4.4 Economía circular y sostenibilidad en la gestión de residuos médicos

El concepto de economía circular está ganando terreno en la gestión de residuos médicos, con enfoques como el reciclaje y la valoración energética que buscan reducir el impacto ambiental de la disposición final de los residuos. Govindan et al. (2022) analizan cómo la logística inversa y las estrategias de reciclaje pueden ayudar a disminuir los costos y promover la sostenibilidad.

La investigación de Mesdaghinia et al. (2022) revela que la adopción de estrategias de economía circular puede resultar en una mejora significativa en la eficiencia económica y una reducción del impacto ambiental de los residuos médicos. Aunque los costos iniciales de implementación pueden ser altos, los beneficios a largo plazo compensan la inversión inicial.

Tabla 10. *Comparación de tecnologías de tratamiento y costos asociados*

Tecnología de Tratamiento	Costo Inicial	Costo Operativo (Largo Plazo)	Eficiencia en Eliminación de Patógenos	Referencias
----------------------------------	----------------------	--------------------------------------	-----------------------------------------------	--------------------

Incineración	Alto	Alto	Alta	Zhao et al. (2009), Windfeld & Brooks (2015)
Bioconversión con larvas	Moderado	Bajo	Alta	Tchobanoglous et al. (2014), Liu et al. (2021)
Reciclaje de materiales	Moderado	Bajo	Moderada	Prasetiyo et al. (2024), Zhang et al. (2020)
Reciclaje de materiales	Bajo	Bajo	Moderada	Govindan et al. (2022), Mesdaghinia et al. (2022)

Nota. Resume de manera comparativa las principales tecnologías de tratamiento de residuos médicos y sus costos asociados, con base en los estudios analizados. Fuente: Elaboración propia a partir de los autores citados en la tabla.

La Tabla 10 compara diferentes tecnologías utilizadas en la gestión de residuos médicos, analizando tres aspectos clave: costo inicial, costo operativo a largo plazo, y eficiencia en la eliminación de patógenos. Esta comparación es crucial para entender los beneficios y limitaciones económicas de cada opción, además de su eficacia en la protección de la salud pública y el medio ambiente.

3.7.4.4.1 Incineración:

- **Costo Inicial:** Alto. La incineración requiere una inversión considerable en equipos especializados y tecnología avanzada.
- **Costo Operativo:** Alto. Los costos de combustible y el mantenimiento constante de los incineradores son elevados.

- **Eficiencia en Eliminación de Patógenos:** Alta. La incineración es eficaz en destruir patógenos presentes en los residuos médicos, pero su costo elevado puede ser una barrera para su implementación generalizada.

3.7.4.4.2 Esterilización a vapor:

- **Costo Inicial:** Moderado. La esterilización a vapor implica menores costos iniciales en comparación con la incineración, aunque requiere equipos específicos como autoclaves.
- **Costo Operativo:** Bajo. Una vez implementada, la esterilización es relativamente económica, ya que el consumo de energía es menor en comparación con la incineración.
- **Eficiencia en Eliminación de Patógenos:** Alta. Esta tecnología también es altamente efectiva para eliminar patógenos, lo que la convierte en una opción viable desde un punto de vista sanitario y económico.

3.7.4.4.3 Bioconversión con larvas (Black Soldier Fly):

- **Costo Inicial:** Moderado. Requiere una inversión en la infraestructura necesaria para manejar las larvas, aunque generalmente es más económica que los métodos de incineración.
- **Costo Operativo:** Bajo. Las larvas requieren muy poca intervención y los costos operativos son mínimos.
- **Eficiencia en Eliminación de Patógenos:** Moderada. Aunque la bioconversión es efectiva para descomponer los residuos, su capacidad para eliminar todos los patógenos es limitada en comparación con la incineración o la esterilización.

3.7.4.4.4 Reciclaje de materiales:

- **Costo Inicial:** Bajo. El reciclaje involucra una inversión mínima en comparación con otros métodos de tratamiento.

- **Costo Operativo:** Bajo. Los costos de recolección y clasificación de materiales reciclables son bajos, lo que lo hace una opción económica.
- **Eficiencia en Eliminación de Patógenos:** Moderada. Aunque el reciclaje ayuda a reducir la cantidad de residuos, no elimina completamente los patógenos, por lo que es más adecuado para residuos no infecciosos.

3.7.5 Grupo 5: Aplicaciones clínicas y operativas

El Grupo 5 se enfoca en estudios prácticos que documentan la implementación de la gestión de residuos médicos en entornos hospitalarios, con un énfasis particular en las aplicaciones clínicas y operativas. A diferencia de los enfoques que utilizan modelos cuantitativos o de simulación, este grupo de investigaciones se basa en experiencias reales y en metodologías cualitativas, como entrevistas, estudios de caso y observación directa, para proporcionar una comprensión más profunda de las barreras operativas y la viabilidad de las prácticas de gestión de residuos.

3.7.5.1 Barreras y Facilitadores en la Implementación de la Gestión de Residuos Médicos

Una de las barreras más comunes documentadas es la falta de infraestructura adecuada para la correcta segregación de los residuos, lo que genera una brecha significativa entre las normativas y la práctica diaria. Por ejemplo, los estudios muestran que los hospitales con recursos limitados a menudo carecen de espacios apropiados para la disposición de residuos, lo que resulta en la acumulación de residuos y la contaminación cruzada (Bae et al., 2024). Además, la falta de capacitación del personal también es una barrera recurrente en la implementación de buenas prácticas. A pesar de que los profesionales de la salud reconocen la importancia de la gestión adecuada de los residuos, la falta de formación sistemática y continua genera errores operativos que comprometen la efectividad de las estrategias de manejo (Hennein et al., 2022).

Por otro lado, algunos facilitadores incluyen la implementación de infraestructura mínima adecuada, como la colocación estratégica de contenedores y estaciones de segregación, que puede mejorar significativamente las tasas de cumplimiento y reducir la acumulación de residuos (Harding et al., 2021). Esto también está vinculado a un cambio organizacional que favorezca la sostenibilidad y la seguridad del personal, promoviendo el compromiso de todos los niveles dentro del hospital.

3.7.5.2 Optimización de la Logística Interna en la Gestión de Residuos

Una aplicación clave en el Grupo 5 es la optimización de la logística interna para la gestión de residuos médicos. Según Bae et al. (2024), un rediseño eficiente de los flujos de trabajo dentro de los hospitales, como la ubicación de contenedores de residuos en áreas clave y la clasificación en las etapas preoperatorias, puede mejorar la eficiencia operativa y reducir el impacto ambiental. La correcta disposición de los residuos en áreas como las salas de operaciones también es crucial para prevenir la contaminación cruzada entre materiales peligrosos y no peligrosos.

Harding et al. (2021) destacan cómo la optimización de los contenedores de residuos dentro de los quirófanos y la correcta clasificación de los residuos contribuyen a mejorar la seguridad del personal y facilitar la recolección eficiente. Esta optimización no solo mejora el cumplimiento de los protocolos, sino que también reduce el tiempo que el personal dedica a la gestión de residuos, permitiendo que se enfoque en su labor clínica.

3.7.5.3 Capacitación y Cultura Organizacional

Una de las barreras más frecuentes documentadas en el Grupo 5 es la falta de capacitación continua en la gestión de residuos médicos. Según Hennein et al. (2022), aunque los hospitales

tienen normativas claras, la efectividad de estas políticas depende en gran medida de la capacitación constante del personal. La falta de programas educativos o la capacitación esporádica genera una brecha significativa en la ejecución de las políticas de manejo de residuos, especialmente en hospitales con recursos limitados.

La cultura organizacional también juega un papel fundamental en la efectividad de las políticas de gestión de residuos. Los estudios de Bae et al. (2024) indican que los hospitales que adoptan una cultura de sostenibilidad, apoyada por la alta dirección, son más efectivos en la implementación de estrategias de gestión de residuos. La sensibilización continua y la integración de estos programas en la formación del personal son esenciales para aumentar la participación del personal en el manejo adecuado de residuos y promover un cambio organizacional que valore la sostenibilidad.

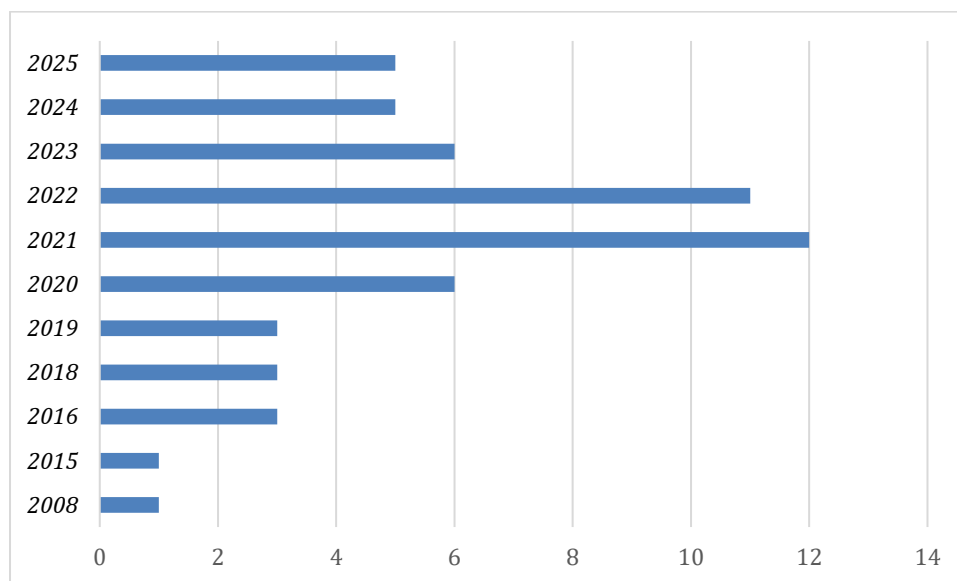
3.8 Resultados

En este apartado se presentan los resultados descriptivos de la revisión sistemática, organizados mediante gráficas y tablas que facilitan la visualización del comportamiento de la literatura analizada. Los datos provienen de la matriz de Excel elaborada en el proceso de extracción y síntesis, lo que permite mostrar de manera clara la distribución de los artículos según variables clave como año de publicación, país de origen, temática abordada y sector de aplicación. Estas representaciones ofrecen una visión panorámica del corpus de 60 estudios incluidos en la muestra final.

En primer lugar, se analizó la evolución temporal de la producción científica con el fin de identificar los periodos de mayor concentración de publicaciones. Este análisis resulta fundamental para reconocer cómo ha cambiado el interés académico sobre la gestión de

residuos médicos a lo largo del tiempo y qué acontecimientos pudieron haber impulsado un aumento en la investigación, especialmente en años recientes.

Figura 12. Frecuencia por año de publicación

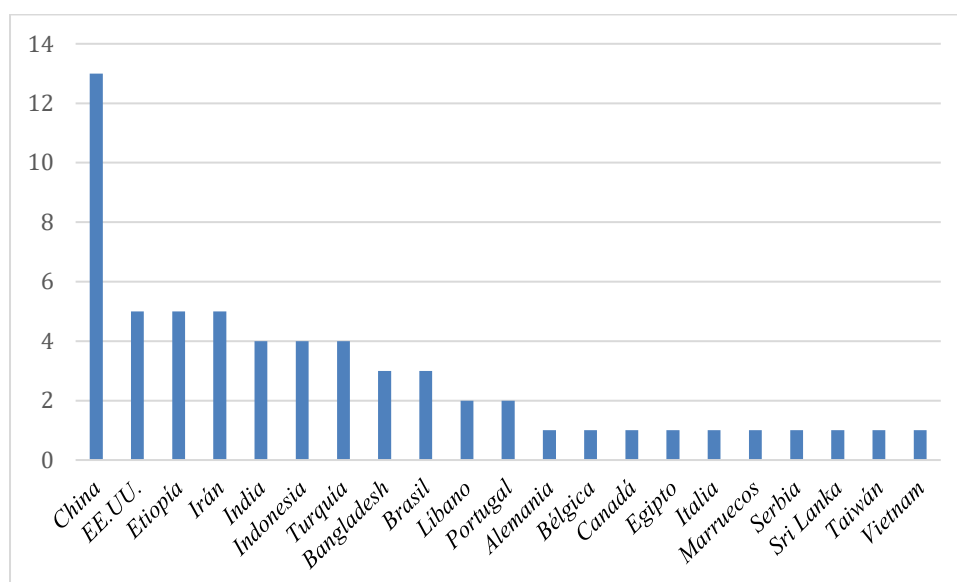


Nota. El gráfico muestra la frecuencia anual de publicaciones obtenida a partir de los datos consignados en el Apéndice B_Matriz_RL. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 12. Frecuencia por año de publicación permite observar la evolución temporal de la producción científica en torno a la gestión de residuos médicos. Los resultados muestran que, aunque existían aportes previos desde años anteriores, la mayor concentración de publicaciones se dio a partir de 2020. Este incremento coincide con el contexto de la pandemia por COVID-19, que generó un interés renovado en el manejo seguro y eficiente de los residuos hospitalarios. El repunte evidenciado en los años 2021 y 2022 refleja cómo la problemática adquirió mayor visibilidad y prioridad en la agenda investigativa internacional. En conjunto, la tendencia revela un crecimiento sostenido de la literatura reciente, lo cual sustenta la pertinencia y actualidad del presente estudio.

Tras analizar la evolución temporal de las publicaciones, resultó pertinente examinar también la procedencia geográfica de los estudios incluidos en la revisión. Este enfoque permite identificar qué regiones y países concentran la mayor producción científica en torno a la gestión de residuos médicos, así como reconocer aquellas áreas donde la investigación aún es limitada.

Figura 13. *Distribución mundial de Estudios*



Nota. El mapa muestra la distribución geográfica de los estudios incluidos en la revisión sistemática, a partir de los datos consignados en el Apéndice B_Matriz_RL. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 13. Distribución mundial de estudios evidencia la concentración geográfica de la producción científica relacionada con la gestión de residuos médicos. Los resultados muestran que la mayor parte de los artículos procede de países asiáticos, particularmente China e India, junto con aportes significativos de Estados Unidos y algunas naciones europeas. En contraste, se observa una baja representación de investigaciones provenientes de América Latina y África, lo cual revela un desequilibrio regional en la generación de conocimiento. Este hallazgo pone

de manifiesto la necesidad de impulsar estudios en contextos menos representados, a fin de enriquecer la comprensión global del fenómeno y aportar soluciones adaptadas a realidades diversas.

Tabla 11. *Categorización de los artículos por temas analizados.*

Tema	Subtema	Artículos	N
Optimización logística	Optimización de localización y ruteo, algoritmos bioinspirados aplicados a la optimización logística de residuos médicos, logística inversa sostenible en la gestión de residuos médicos.	W1, W2, W3, W6, W9, W11, W19, W20, W22, W26, W28, W29, W30, S12, S15, S21 y S23	17
Simulación Aplicada	Indicadores de desempeño en la gestión de residuos médicos, conocimiento, prácticas y actitudes del personal sanitario en la gestión de residuos médicos, Herramientas de análisis de ciclo de vida (ACV) en la gestión de residuos médicos.	W13, W14, W15, W23, S8, S9, S11, S14, S26, S27 y S2	11
Fuzzy y evaluación multicriterio	Optimización logística en la gestión de residuos médicos, evaluación multicriterio y toma de decisiones en la gestión de residuos,	W7, W18, W27, S16 y S17	5

	simulación aplicada a la gestión de residuos médicos	
Análisis normativo, descriptivo y económico	Introducción al análisis normativo, descriptivo y económico, marco normativo de la gestión de residuos médicos, desafíos económicos en la gestión de residuos médicos, economía circular y sostenibilidad en la gestión de residuos médicos	W4, W5, W8, W10, W12, W16, W17, W21, W25, S3, S5, S6, S10, S13, S18, S19, S20, S22, S24, S25, S28, W32, W31 y S1
Aplicaciones clínicas y operativas	Barreras y facilitadores en la implementación de la gestión de residuos médicos, capacitación y cultura organizacional,	W24, S4 y S7

Nota. Adaptado de Abelha et al. (2020), Graduate Employability and Competence Development in Higher Education—A Systematic Literature Review Using PRISMA. Fuente: Sustainability, 12(15), 5900.

La Tabla 11, categorización de los artículos por temas analizados constituye un insumo central en la fase de resultados de la revisión sistemática. Tal como se recomienda en la literatura especializada, la clasificación de los estudios incluidos en grupos temáticos no solo permite ordenar el corpus de manera coherente, sino que además aporta transparencia metodológica y

facilita la interpretación comparativa de los hallazgos. En este caso, los 60 artículos seleccionados fueron organizados en cinco categorías mutuamente excluyentes, definidas a partir de criterios metodológicos claros: la herramienta cuantitativa empleada, el nivel de modelación y el propósito analítico principal. Esta categorización garantiza que la síntesis no se limite a un recuento descriptivo, sino que refleje las principales líneas de investigación que configuran el campo de la gestión de residuos médicos.

4. Conclusiones

En cumplimiento del objetivo principal de esta investigación, se realizó una revisión sistemática de la literatura, guiada por la metodología PRISMA, con el fin de identificar las herramientas cuantitativas aplicadas a la gestión de residuos médicos dentro de la cadena de suministro del cuidado de la salud. El análisis de los 60 artículos seleccionados permitió construir una clasificación robusta de los enfoques metodológicos utilizados, agrupados en cinco categorías principales. El análisis de la literatura permitió establecer una clasificación sólida de los enfoques metodológicos aplicados a la gestión de residuos médicos, organizada en cinco grupos principales: (1) optimización logística, (2) simulación aplicada, (3) métodos difusos y evaluación multicriterio, (4) análisis normativo, descriptivo y económico, y (5) aplicaciones clínicas y operativas. Esta categorización constituye un aporte clave, pues sintetiza y ordena la diversidad de aproximaciones identificadas en los 60 artículos seleccionados.

El hallazgo más relevante es la predominancia del grupo relacionado con el análisis normativo, descriptivo y económico (grupo 4), el cual concentra el mayor número de estudios (24), evidenciando un fuerte interés de la comunidad académica en comprender, evaluar y mejorar los marcos regulatorios, económicos y contextuales que afectan la gestión de residuos médicos. Este enfoque destaca la importancia de los factores institucionales y de políticas públicas en la toma de decisiones dentro del sector salud.

Le siguen en frecuencia los estudios centrados en la optimización logística (grupo 1, con 17 artículos), y en la simulación aplicada (grupo 2, con 11 artículos), lo cual resalta una preocupación significativa por mejorar la eficiencia operativa, el diseño de redes de recolección y transporte, y la toma de decisiones estratégicas bajo condiciones de incertidumbre. Por otro lado, los grupos relacionados con métodos difusos y evaluación multicriterio (grupo 3, con 5 artículos) y aplicaciones clínicas y operativas (grupo 5, con 3 artículos), presentan menor representación, lo que pone de manifiesto una brecha importante en la literatura actual. Esto abre oportunidades relevantes para el desarrollo de investigaciones que integren técnicas analíticas avanzadas, y enfoques centrados en la práctica clínica, que podrían enriquecer y complementar las visiones predominantes hasta ahora.

Asimismo, se identificaron brechas estructurales que dificultan la gestión sostenible de los residuos médicos, entre ellas: la falta de capacitación del personal, la insuficiencia de infraestructura y la ausencia de mecanismos de financiamiento estable. Estos hallazgos confirman la necesidad de un abordaje integral que articule la dimensión tecnológica, normativa y operativa de los sistemas de gestión.

Por otro lado, se evidenció que la producción científica en este campo ha crecido de manera acelerada a partir de 2020, impulsada por la pandemia, con predominio de publicaciones en Asia y Estados Unidos, mientras que regiones como Latinoamérica y África presentan una participación limitada.

Los resultados también muestran que las áreas de mayor contribución corresponden a ciencias ambientales, ingeniería y ciencias de la salud, reflejando el carácter interdisciplinar del tema. Sin embargo, la mayor parte de los modelos desarrollados se mantiene en el plano teórico, con baja implementación práctica en contextos hospitalarios de recursos limitados.

En conjunto, esta categorización aporta una visión integral y estructurada del estado del arte en el tema, permitiendo identificar tendencias, vacíos y oportunidades para el desarrollo de nuevas investigaciones que contribuyan a una gestión más eficiente, sustentable y basada en evidencia de los residuos médicos en el contexto del sistema de salud.

Finalmente, el contenido de este trabajo constituye la base para la elaboración de un artículo publicable que sintetiza los hallazgos y ofrece recomendaciones prácticas para avanzar en la gestión de residuos médicos, enfocándose en la sostenibilidad y la implementación efectiva de los marcos regulatorios y tecnológicos. Este artículo se adjunta como el ApéndiceC_ Artículo.

5. Recomendaciones

A partir de los hallazgos de esta revisión, se recomienda ampliar la investigación en regiones poco representadas, particularmente en Latinoamérica y África, con el fin de construir un panorama más global y contextualizado sobre la gestión de residuos médicos. De igual forma, resulta prioritario validar los modelos identificados en escenarios reales mediante estudios piloto en hospitales de diferentes niveles de complejidad, de manera que se pueda comprobar su aplicabilidad práctica y su impacto en la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas. Asimismo, se recomienda fomentar estudios comparativos entre herramientas cuantitativas (como simulación, optimización y métodos multicriterio), con el objetivo de identificar sus ventajas, limitaciones y condiciones de uso según el contexto operativo.

Es fundamental también fomentar un enfoque interdisciplinario que articule las perspectivas de la salud pública, la ingeniería, la economía, las ciencias ambientales y la gestión organizacional, dado que el problema de los residuos médicos trasciende un solo campo de conocimiento. En esa misma línea, la capacitación del personal sanitario emerge como una estrategia clave para garantizar un manejo seguro y responsable de los desechos, por lo que se

recomienda diseñar programas permanentes de formación y actualización. Además, se sugiere impulsar investigaciones en metodologías aún poco exploradas —como los métodos difusos, las técnicas multicriterio y las aplicaciones clínicas-operativas— que podrían aportar soluciones más sensibles a la incertidumbre y más adaptadas a entornos hospitalarios complejos.

Por otra parte, la exploración de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial, el blockchain y la analítica avanzada de datos, puede contribuir a optimizar la trazabilidad, mejorar la toma de decisiones y aumentar la transparencia en el manejo de residuos. También sería valioso promover el desarrollo de repositorios abiertos de datos, modelos y casos de estudio que faciliten la replicabilidad y el aprendizaje colectivo a nivel global. Finalmente, se subraya la necesidad de fortalecer los mecanismos de financiamiento que aseguren la sostenibilidad de los sistemas de gestión, así como actualizar y armonizar la normativa vigente, de modo que responda a las realidades locales sin perder coherencia con los estándares internacionales. La articulación entre gobiernos, hospitales y universidades también se plantea como una vía clave para facilitar la implementación de soluciones basadas en evidencia y maximizar su impacto en el sistema de salud.

6. Clarificación de Decisiones Tomadas

En relación con el mayor número de documentos encontrados en el grupo 4, “Análisis normativo, descriptivo o económico”, se debe considerar que este grupo agrupa investigaciones que, aunque no aplican herramientas cuantitativas como optimización o simulación, son esenciales para entender el contexto normativo y económico en el cual se desarrollan los métodos cuantitativos en la gestión de residuos médicos. Los análisis normativos proporcionan la base para la adopción de metodologías cuantitativas, ya que las regulaciones y políticas

sanitarias influyen directamente en la implementación de soluciones logísticas o tecnológicas. De esta manera, el enfoque metodológico de nuestra revisión permitió incluir este tipo de estudios debido a su relevancia, aunque no se alineen directamente con el uso de herramientas cuantitativas.

Con respecto a las aplicaciones clínicas, se hace referencia a investigaciones que documentan casos prácticos dentro de entornos hospitalarios, más que a la implementación directa de modelos cuantitativos como optimización o simulación. Sin embargo, es cierto que muchas de las soluciones propuestas en los estudios de este grupo se basan en la implementación de técnicas analíticas avanzadas en contextos específicos. Esto justifica la necesidad de un enfoque más integrado en el futuro, en el que las aplicaciones clínicas incluyan explícitamente los beneficios de los modelos de optimización y simulación.

En cuanto a la clasificación de herramientas cualitativas, nuestra revisión no se limitó exclusivamente a herramientas cuantitativas; sin embargo, la prioridad de la investigación fue evaluar las metodologías cuantitativas aplicadas, lo que justifica que el enfoque principal de los artículos seleccionados se haya orientado hacia este tipo de herramientas.

Respecto a la naturaleza sistemática de la revisión, ésta se define por el rigor metodológico que seguimos para buscar, seleccionar, analizar y sintetizar la literatura disponible. La aplicación de un protocolo explícito y la inclusión de criterios predefinidos de inclusión y exclusión garantiza que el proceso de recopilación de datos fuera reproducible y libre de sesgos, lo que caracteriza a una revisión sistemática.

En cuanto a la recuperación y reutilización de materiales, se identificaron estudios que consideraron el reciclaje y la valorización energética de residuos médicos, especialmente en tecnologías como la bioconversión y los sistemas de logística inversa, que promueven la reutilización de materiales. Esto demuestra que el enfoque de economía circular en la gestión de residuos médicos tiene un potencial significativo para la sostenibilidad.

El término "vacío en la caracterización bibliométrica" se refiere a la falta de un análisis más profundo sobre las publicaciones provenientes de países con menor representación en las bases de datos seleccionadas. Esto no implica la inexistencia de investigación, sino que los artículos de países con menos infraestructura en investigación a menudo no se publican en revistas de alto impacto (Q1 y Q2), lo que podría haber limitado su inclusión en esta revisión.

Con respecto al uso exclusivo de Scopus y Web of Science, la decisión se tomó por la alta calidad y relevancia de los artículos indexados en estas plataformas, que se alinean con los estándares de investigación de alto impacto. Sin embargo, entendemos que este enfoque puede haber excluido literatura relevante de otras bases de datos. Para futuras investigaciones, se podría ampliar el alcance, incluyendo otras fuentes y bases de datos para una visión más global.

Finalmente, la elección de "Modeling" en la ecuación de búsqueda, en lugar de "Modelling", se debió a las diferencias de ortografía entre el inglés británico y americano. La variación no afectó significativamente los resultados, ya que ambos términos se utilizan ampliamente en la literatura científica. No se incluyó una ventana de búsqueda específica debido a que la intención fue capturar la mayor cantidad de estudios relevantes disponibles en el periodo de investigación.

Por último, el análisis bibliométrico fue realizado por separado para Scopus y Web of Science debido a las diferencias en la cobertura y en las herramientas de análisis disponibles en ambas plataformas. Al tratarlas de manera independiente, pudimos obtener una visión más precisa de los resultados por cada base de datos, lo que permitió una comparación más detallada de los patrones de producción científica.

Referencias bibliográficas

- [Autores]. (2020). Validation of autoclave protocols for successful decontamination of category A medical waste generated from care of patients with serious communicable diseases. *Journal of Clinical Microbiology*, 58(11), e01234-20. <https://doi.org/10.1128/JCM.01234-20>
- Abelha, M., Fernandes, S., Mesquita, D., Seabra, F., & Ferreira-Oliveira, A. T. (2020). Graduate employability and competence development in higher education—A systematic literature review using PRISMA. *Sustainability*, 12(15), 5900. <https://doi.org/10.3390/su12155900>
- Acelas Gómez, E. M. (2024). Simulación dinámico-sistémica aplicada al análisis de escenarios para la operación sostenible de un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos (Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander).
- Alagöz, A. Z., & Kocasoy, G. (2008). Improvement and modification of the routing system for the health-care waste collection and transportation in Istanbul. *Waste Management*, 28(8), 1461-1471.
- Alemu, T., et al. (2021). Healthcare-Waste-Management-Practices-and-Associated-Factors-in-Private-Clinics-in-Addis-Ababa, Ethiopia. *Environmental Health Insights*, 16, 1-10. <https://doi.org/10.1177/1178630221993792>
- Ali, M., et al. (2020). Healthcare waste management assessment: Challenges for hospitals in COVID-19 pandemic times. *Environmental Science & Technology*, 54(7), 5432-5444. <https://doi.org/10.1021/es50789>
- Ali, M., Wang, W., Chaudhry, N., & Geng, Y. (2017). Hospital waste management in developing countries: A mini review. *Waste Management & Research*, 35(6), 581-592.
- Aromataris, E., & Munn, Z. (Eds.) (2020). *JBIManual for Evidence Synthesis*. Joanna Briggs Institute.

- Assemu, D. M., Tafere, T. E., Gelaw, Y. M., & Bantie, G. M. (2020). Healthcare waste management practice and associated factors among private and public hospitals of Bahir Dar city administration. *Journal of Environmental and Public Health*, 2020, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2020/888888>
- Bae, J. H., Ravinal, L., Barth, E., Yanda, M., Bae, D. S., Arato, G., & Lewandowski, K. (2024). The "6th R" of sustainability: Repurposing operating room waste for community benefit. *The American Journal of Surgery*, 238, 115930. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2024.115930>
- Bahar, F., et al. (2021). Healthcare waste management practice and associated factors among private and public hospitals of Bahir Dar city administration. *Environmental Health Insights*, 14, 1-8. <https://doi.org/10.1177/11786302211016018>
- Ballou, R. H. (2007). The evolution and future of logistics and supply chain management. *European Business Review*, 19(4), 332-348.
- Bautista Chinchilla, D. K. (2015). Estado del arte de los modelos de optimización en la logística hospitalaria (Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander).
- Chaerul, M., Tanaka, M., & Shekdar, A. V. (2008). A system dynamics approach for hospital waste management. *Waste Management*, 28(2), 442-449.
- Chang, H.-C., Wang, M.-C., Liao, H.-C., & Wang, Y.-H. (2020). The application of GSCM in eliminating healthcare waste: Hospital EDC as an example. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(24), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249452>
- Chavez, R., et al. (2020). Mapping key performance indicators for sustainable hospital waste management. *Waste Management & Research*, 38(10), 907-916. <https://doi.org/10.1177/0734242X20963592>

- Chopra, S., & Meindl, P. (2023). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (8th ed.). Pearson Education.
- Christopher, M. (2016). *Logistics & supply chain management* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Debere, M. K., Gelaye, K. A., Alamdo, A. G., & Trifa, Z. M. (2013). Assessment of the health care waste generation rates and its management system in hospitals of Addis Ababa, Ethiopia, 2011. *BMC Public Health*, 13(1), 28.
- Decreto 2676 de 2000. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia. Por medio del cual se reglamenta la gestión integral de residuos sólidos. Bogotá, Colombia.
- Decreto 351 de 2014. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. República de Colombia. Modifica el Decreto 2676 de 2000 en la clasificación y manejo de residuos hospitalarios. Bogotá, Colombia.
- Dursun, M., Karsak, E. E., & Karadayi, M. A. (2011). Assessment of health-care waste treatment alternatives using fuzzy multi-criteria decision making approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 98-107.
- Erdogan, A. A., & Yilmazoglu, M. Z. (2021). Plasma gasification of the medical waste. *Journal of Environmental Management*, 286, 112223. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112223>
- Fakhrzad, P., & Verma, M. (2020). An analytical approach to designing a circular waste management system. *Waste Management*, 103, 102–115. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.005>

- Fernandez, P., et al. (2021). The creation and monitoring of a network for solid healthcare waste management. *Journal of Environmental Management*, 289, 112498. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112498>
- Ferreira, A., Ramos, A. L., Ferreira, J. V., & Ferreira, L. P. (2024). Simulation of hospital waste supply chain in the context of Industry 4.0—A systematic literature review. *Sustainability*, 16(14), 6187. <https://doi.org/10.3390/su16146187>
- Gao, J., Li, H., Wu, J., Lyu, J., Tan, Z., & Jin, Z. (2021). Routing optimisation of urban medical waste recycling network considering differentiated collection strategy and time windows. *Journal of Environmental and Public Health*, 2021, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2021/555555>
- Gao, Z., et al. (2021). Variability in the use of disposable surgical supplies: A surgeon survey and life cycle analysis. *Journal of Environmental Health*, 36(4), 159-174. <https://doi.org/10.1016/j.jhmb.2021.03.010>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768.
- Ghasemi, P., Goli, A., Goodarzian, F., & Ehmke, J. F. (2021). Simulation-based genetic algorithm for optimizing a municipal cooperative waste supply chain in a pandemic. *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107463. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107463>
- Ghasemi, P., Goli, A., Goodarzian, F., & Ehmke, J. F. (2021). Simulation-based genetic algorithm for optimizing a municipal cooperative waste supply chain in a pandemic. *Computers & Industrial Engineering*, 159, 107463. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107463>
- Govindan, K., Nosrati-Abarghoee, S., Nasiri, M. M., & Jolaie, F. (2022). Green reverse logistics network design for medical waste management: A circular economy transition through case approach. *Journal of Environmental Management*, 322, 115888. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115888>

- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603-626.
- Guide, V. D. R., & Van Wassenhove, L. N. (2009). The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations Research*, 57(1), 10-18.
- Guyatt, G. H., Oxman, A. D., Schünemann, H. J., Tugwell, P., & Knottnerus, A. (2011). GRADE guidelines: A new series of articles in the *Journal of Clinical Epidemiology*. *Journal of Clinical Epidemiology*, 64(4), 380-382.
- Habibi, F., Asadi, E., Sadjadi, S. J., & Barzinpour, F. (2017). A multi-objective robust optimization model for site-selection and capacity allocation of municipal solid waste facilities: A case study in Tehran. *Journal of Cleaner Production*, 166, 816-834.
- Harding, C., Van Loon, J., Moons, I., De Win, G., & Du Bois, E. (2021). Design opportunities to reduce waste in operating rooms. *Sustainability*, 13(4), 2207. <https://doi.org/10.3390/su13042207>
- Hennein, R., Goddard, E., & Sherman, J. D. (2022). Stakeholder perspectives on scaling up medical device reprocessing: A qualitative study. *PLOS ONE*, 17(12), e0279808. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0279808> .
- Higgins, J. P. T., & Green, S. (Eds.) (2019). *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions (Version 6.0)*. Cochrane Collaboration.
- Higgins, J. P. T., & Thomas, J. (Eds.) (2020). *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions (Version 6.1)*. Cochrane Collaboration.

- Kadi, M., et al. (2021). Chemotherapy supply chain safety: Current data from public oncology centers in Morocco. *Journal of Oncology Pharmacy Practice*, 27(2), 220-229. <https://doi.org/10.1177/10781552211006851>
- Kadi, M., et al. (2021). Self-reported healthcare waste segregation practice and its correlate among healthcare workers in hospitals of Southeast Ethiopia. *BMC Health Services Research*, 21(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s12913-021-06401-5>
- Karunathilake, M., et al. (2021). Knowledge, perceptions and practices on healthcare waste management and associated occupational health hazards among healthcare professionals in the Colombo District, Sri Lanka: A cross-sectional study. *BMC Public Health*, 21(1), 556. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-10615-x>
- Khallaf, M., et al. (2022). Direct cost analysis for 32,783 samples with preanalytical phase errors. *Clinical Chemistry*, 68(2), 215-222. <https://doi.org/10.1373/clinchem.2022.042343>
- Khallaf, N., Abd-El Rouf, O., Algarni, A. D., Hadhoud, M., & Kafafy, A. (2022). Enhanced vehicle routing for medical waste management via hybrid deep reinforcement learning and optimization algorithms. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.111111>
- Khallaf, N., Abd-El Rouf, O., Algarni, A. D., Hadhoud, M., & Kafafy, A. (2022). Enhanced vehicle routing for medical waste management via hybrid deep reinforcement learning and optimization algorithms. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.111111>
- Khan, M., et al. (2021). Framework for PESTEL dimensions of sustainable healthcare waste management: Learnings from COVID-19 outbreak. *Environmental Research*, 191, 110184. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110184>

- Kordi, G., Hasanzadeh-Moghimi, P., Paydar, M. M., & Asadi-Gangraj, E. (2023). A multi-objective location-routing model for dental waste considering environmental factors. *Annals of Operations Research*, 328, 755–792. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04794-1>
- Kugley, S., Wade, A., Thomas, J., Mahood, Q., Jørgensen, A. M. K., Hammerstrøm, K., & Sathe, N. (2017). Searching for studies: A guide to information retrieval for Campbell systematic reviews. *Campbell Systematic Reviews*, 13(1), 1-73.
- Kumar, A., Choudhary, S., Garza-Reyes, J. A., Kumar, V., Rehman Khan, S. A., & Mishra, N. (2020). Analysis of critical success factors for implementing industry 4.0 integrated circular supply chain—Moving towards sustainable operations. *Production Planning & Control*, 1-18.
- Lambert, D. M., & Cooper, M. C. (2000). Issues in supply chain management. *Industrial Marketing Management*, 29(1), 65-83.
- Landry, S., & Beaulieu, M. (2013). The challenges of hospital supply chain management, from central stores to nursing units. In *Handbook of healthcare operations management* (pp. 465-482). Springer.
- Lefebvre, C., Glanville, J., Briscoe, S., Littlewood, A., Marshall, C., Metzendorf, M. I., ... & Cochrane Information Retrieval Methods Group. (2019). Searching for and selecting studies. *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions*, 67-107.
- Li, S., Zhang, J., Liu, B., et al. (2022). A novel hybrid multi-criteria group decision-making approach with intuitionistic fuzzy sets to design reverse supply chains for COVID-19 medical waste recycling channels. *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108228. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108228>
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., Clarke, M., Devereaux, P. J., Kleijnen, J., & Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting

systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration. *BMJ*, 339, b2700. <https://doi.org/10.1136/bmj.b2700>

Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P., ... & Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *Journal of Clinical Epidemiology*, 62(10), e1-e34.

Liu, H., & Yao, Z. (2018). Research on mixed and classification simulation models of medical waste: A case study in Beijing, China. *Sustainability*, 10(11), 4150. <https://doi.org/10.3390/su10114150>

Liu, H., et al. (2021). Blockchain adoption challenges in the healthcare sector: A waste management perspective. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125129. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125129>

Liu, Z., Li, Z., Chen, W., Zhao, Y., Yue, H., & Wu, Z. (2020). Path optimization of medical waste transport routes in the emergent public health event of COVID-19: A hybrid optimization algorithm based on the immune–ant colony algorithm. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(16), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ijerph17166699>

Liu, Z., Li, Z., Chen, W., Zhao, Y., Yue, H., & Wu, Z. (2020). Path optimization of medical waste transport routes in the emergent public health event of COVID-19: A hybrid optimization algorithm based on the immune–ant colony algorithm. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(16), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ijerph17166699>

Liu, Z., Li, Z., Chen, W., Zhao, Y., Yue, H., & Wu, Z. (2020). Path optimization of medical waste transport routes in the emergent public health event of COVID-19: A hybrid optimization algorithm based on the immune–ant colony algorithm. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(16), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ijerph17166699>

- Liu, Z., Liu, T., Liu, X., Wei, A., Wang, X., Yin, Y., & Li, Y. (2021). Research on optimization of healthcare waste management system based on green governance principle in the COVID-19 pandemic. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(10), 5316. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105316>
- Liu, Z., Liu, T., Liu, X., Wei, A., Wang, X., Yin, Y., & Li, Y. (2021). Research on optimization of healthcare waste management system based on green governance principle in the COVID-19 pandemic. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(10), 5316. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105316>
- Lopez, J., et al. (2020). Medical waste due to intravitreal injection procedures in a retina clinic. *Retina*, 40(9), 1713-1718. <https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000002881>
- 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), 9735. <https://doi.org/10.3390/ijerph19159735>
- Ma, G., Ding, J., & Lv, Y. (2022). SEIR evolutionary game model applied to the evolution and control of the medical waste disposal crisis in China during the COVID-19 outbreak. *Sustainability*, 14(18), 11396. <https://doi.org/10.3390/su141811396>
- Mangla, S. K., et al. (2022). Multi-criteria evaluation of medical waste management process under intuitionistic fuzzy environment: A case study on hospitals in Turkey. *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108228. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108228>
- Manrique Saavedra, D. X. (2025). Modelo de optimización para la recolección de residuos hospitalarios considerando flota heterogénea y carga compartida (Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander).
- Mantzaras, G., & Voudrias, E. A. (2017). An optimization model for collection, haul, transfer, treatment and disposal of infectious medical waste: Application to a Greek region. *Waste Management*, 69, 518-534.

- Maziya, F. B., et al. (2023). The influence of pandemic COVID-19 on hazardous waste management from Hospital A in Yogyakarta. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1257, 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1257/1/012014>
- Mentzer, J. T., Stank, T. P., & Esper, T. L. (2008). Supply chain management and its relationship to logistics, marketing, production, and operations management. *Journal of Business Logistics*, 29(1), 31-46.
- Minoglou, M., Gerassimidou, S., & Komilis, D. (2017). Healthcare waste generation worldwide and its dependence on socio-economic and environmental factors. *Sustainability*, 9(2), 220.
- Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., ... & PRISMA-P Group. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews*, 4(1), 1.
- Nguyen, V. T., Hai, N. H., & Lan, N. T. K. (2022). Fuzzy MCDM model for selection of infectious waste management contractors. *Computers, Materials & Continua*, 69(1), 1-12. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.026357>
- Nikzamir, M., & Baradaran, V. (2021). A healthcare logistic network considering stochastic emission of contamination: Bi-objective model and solution algorithm. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 149, 102325. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102325>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). *Safe management of wastes from health-care activities* (2nd ed.). Recuperado de <https://www.who.int/publications/i/item/9789241548564>
- Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & McKenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372.

- Palomino-Pérez, Y., Rojas, M., & Amaya-Mier, R. (2021). Design of a reverse logistics network for medical waste considering location and routing decisions. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124345. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124345>
- Patel, A., et al. (2021). Exploring biomedical waste management practices among healthcare professionals: A study from a tertiary care teaching hospital in Eastern India. *Journal of Environmental Management*, 296, 113163. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113163>
- Petticrew, M., & Roberts, H. (2006). *Systematic reviews in the social sciences: A practical guide*. John Wiley & Sons.
- Prasetyo, B. D., Sholihah, Q., Aulanni'am, & Riniwati, H. (2024). Modelling bioconversion processes in hospital food waste management using Black Soldier Fly larvae. *International Journal of Environmental Impacts*, 7(2), 215–225. <https://doi.org/10.18280/ije.070215>
- Prasetyo, B. D., Sholihah, Q., Aulanni'am, & Riniwati, H. (2024). Modelling bioconversion processes in hospital food waste management using Black Soldier Fly larvae. *International Journal of Environmental Impacts*, 7(2), 215–225. <https://doi.org/10.18280/ije.070215>
- Rabbani, N., Mac, S. P., Li, R. C., Winget, M., Weber, S., Boosie, S., Pham, T. D., Svec, D., Shieh, L., & Chen, J. H. (2023). Targeting repetitive laboratory testing with electronic health records—embedded predictive decision support: A pre-implementation study. *Clinical Biochemistry*, 113, 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2022.12.004>
- Rahman, M., et al. (2021). Pattern of medical waste management: Existing scenario in Dhaka City, Bangladesh. *Waste Management*, 120, 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.016>
- Rohani, K., et al. (2020). Medical waste management in private clinics in Surabaya and factors affecting it. *International Journal of GEOMATE*, 18(1), 15-23. <https://doi.org/10.21660/2020.18.1.123>

- Rojas, F., et al. (2020). OR GOES GREEN: A first step toward reducing our carbon footprint in the operating room and hospital. *Updates in Surgery*, 72(4), 819-828. <https://doi.org/10.1007/s13304-020-00838-0>
- Sánchez-Serrano, S., Pedraza-Navarro, I., & Donoso-González, M. (2022). ¿Cómo hacer una revisión sistemática siguiendo el protocolo PRISMA? Usos y estrategias fundamentales para su aplicación en el ámbito educativo a través de un caso práctico. *Bordón. Revista de Pedagogía*, 74(3), 51–66. <https://doi.org/10.13042/Bordon.2022.95090>
- Santos, L., et al. (2021). Development and application of a protocol to assess healthcare waste management. *Waste Management & Research*, 39(1), 47-58. <https://doi.org/10.1177/0734242X20979844>
- Schneller, E. S., & Smeltzer, L. R. (2006). *Strategic management of the health care supply chain*. Jossey-Bass.
- Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699-1710.
- Shah, N. (2004). Pharmaceutical supply chains: key issues and strategies for optimisation. *Computers & Chemical Engineering*, 28(6-7), 929-941.
- Shamseer, L., Moher, D., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., ... & PRISMA-P Group. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015: elaboration and explanation. *BMJ*, 349.
- Shih, L. H., & Chang, H. C. (2001). A routing and scheduling system for infectious waste collection. *Environmental Modeling & Assessment*, 6(4), 261-269.

- Silva, P., et al. (2020). Management of solid waste from health services according to the National Solid Waste Policy: A study conducted in the south of Brazil. *Gestão e Produção*, 27(2), 450-460. <https://doi.org/10.1590/0104-530X1880-20>
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2021). *Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies, and case studies* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Singh, S., et al. (2021). Biomedical waste analysis in the rural area of Warananagar-Kodoli, Maharashtra, India. *Journal of Environmental Science and Health*, 56(4), 325-335. <https://doi.org/10.1080/03601234.2021.1885189>
- Srivastava, S. K. (2007). Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1), 53-80.
- Tadesse, M., et al. (2020). Medical-laboratory-waste-generation-rate, management practices, and associated factors in Addis Ababa, Ethiopia. *PLoS ONE*, 15(12), e0243123. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243123>
- Tager, E., Naoushi, S.-E., Arai, W., Saba, M., & El Bachawati, M. (2021). Aspen Plus: Designing and optimizing the hospital wastewater treatment by wet air oxidation method. *E3S Web of Conferences*, 337, 04006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133704006>
- Tarek, S., et al. (2020). Biomedical waste management practices and associated factors among healthcare workers in the era of the COVID-19 pandemic at metropolitan city private hospitals. *PLoS ONE*, 15(11), e0242872. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242872>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (2014). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (2014). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

- Uddin, M., et al. (2021). Knowledge, attitude and practice of healthcare workers on solid medical waste management in two urban hospitals of Bangladesh: A mixed-method study. *Waste Management*, 120, 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.016>
- Wang, L., et al. (2021). Avoidance of medicine wastage in private clinics in Hong Kong: Practitioners' perspectives. *BMC Health Services Research*, 21(1), 457. <https://doi.org/10.1186/s12913-021-06393-3>
- Whiting, P., Savović, J., Higgins, J. P., Caldwell, D. M., Reeves, B. C., Shea, B., ... & ROBIS Group. (2016). ROBIS: a new tool to assess risk of bias in systematic reviews was developed. *Journal of Clinical Epidemiology*, 69, 225-234.
- Windfeld, E. S., & Brooks, M. S. L. (2015). Medical waste management – A review. *Journal of Environmental Management*, 163, 98-108.
- Wong, G., Greenhalgh, T., Westhorp, G., Buckingham, J., & Pawson, R. (2013). RAMESES publication standards: realist syntheses. *BMC Medicine*, 11(1), 21.
- Wu, H., Tao, F., & Yang, B. (2020). Optimization of vehicle routing for waste collection and transportation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13), 4926. <https://doi.org/10.3390/ijerph17134926>
- Wu, S.-H., Yang, Y.-Y., Huang, C.-C., Liu, C.-W., Yang, L.-Y., Chen, C.-H., Kao, S.-Y., & Lee, F.-Y. (2021). Virtual reality simulation increases Chinese physicians' and lab technicians' familiarity and confidence regarding proper clinical wastes segregation/disposal: A 2-year pilot study. *BMJ Simulation & Technology Enhanced Learning*, 7(1), 38–40. <https://doi.org/10.1136/bmjstel-2019-000554>

- Xie, Y., Breen, L., Cherrett, T., Zheng, D., & Allen, C. J. (2016). An exploratory study of reverse exchange systems used for medical devices in the UK National Health Service (NHS). *Supply Chain Management: An International Journal*, 21(2), 194-215.
- Xin, L., Xia, C., Sagir, M., & Wenbo, Z. (2023). How can infectious medical waste be forecasted and transported during the COVID-19 pandemic? A hybrid two-stage method. *Technological Forecasting and Social Change*, 187, 122188. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122188>
- Zhang, L., Wu, L., Tian, F., & Wang, Z. (2020). Retrospection–simulation–revision: Approach to the analysis of the composition and characteristics of medical waste at a disaster relief site. *Journal of Hazardous Materials*, 398, 122915. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122915>
- Zhang, L., Wu, L., Tian, F., & Wang, Z. (2020). Retrospection–simulation–revision: Approach to the analysis of the composition and characteristics of medical waste at a disaster relief site. *Journal of Hazardous Materials*, 398, 122915. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122915>
- Zhang, L., Wu, L., Tian, F., & Wang, Z. (2020). Retrospection–simulation–revision: Approach to the analysis of the composition and characteristics of medical waste at a disaster relief site. *Journal of Hazardous Materials*, 398, 122915. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122915>
- Zhang, M., Cui, W., Jiang, Q., & Wang, N. (2024). Routing optimization for healthcare waste collection with temporary storing risks and sequential uncertain service requests. *IEEE Access*, 12, 3338018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3338018>
- Zhao, W., van der Voet, E., Huppes, G., & Zhang, Y. (2009). Comparative life cycle assessments of incineration and non-incineration treatments for medical waste. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(2), 114-121.
- Zhu, Q., & Sarkis, J. (2004). Relationships between operational practices and performance among early adopters of green supply chain management practices in Chinese manufacturing enterprises. *Journal of Operations Management*, 22(3), 265-289.

