

Principales Tendencias de Investigación en la Gestión de Residuos utilizando Inteligencia Artificial

Major Research Trends in Waste Management using Artificial Intelligence

Gloria María Aponte Figueroa

Universidad Católica Andrés Bello. Venezuela

Correo: gapontef@ucab.edu.ve

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.23196220>

Recibido: 09-04-2025 Aceptado: 03-11-2025

Resumen

La generación de residuos se ha convertido en un problema global debido al crecimiento demográfico, el desarrollo industrial, económico y social; por ello es un área de importante atención para minimizar el impacto ambiental y el riesgo de enfermedades en la población. El objetivo de este trabajo es presentar un análisis de las principales tendencias de investigación en la gestión de residuos utilizando inteligencia artificial mediante la evolución de las publicaciones en revistas y congresos especializados en el área. Se utilizó la investigación documental, aunada a la técnica de análisis bibliométrico y de contenido para examinar la información obtenida en el periodo 2015-2024. Se usó la base de datos Lens.org como fuente de información principal que mediante el uso de palabras clave a través de diferentes estrategias de búsquedas se recuperó la información relevante en el periodo indicado. Los principales resultados evidencian que la comunidad científica internacional presenta un gran interés en realizar investigación relacionada con mejorar la gestión de residuos utilizando la inteligencia artificial, y China es uno de los países líderes que aplica estas herramientas para gestionar los residuos. Las aguas residuales, residuos sólidos, de construcción, plásticos y generación de energía, son los principales residuos tratados con inteligencia artificial.

Palabras clave: gestión de residuos, inteligencia artificial, tendencias de la investigación, rendimiento, utilización. Código UNESCO: 3308.02 – Ingeniería y tecnología ambiental - Residuos Industriales

Abstract

Waste generation has become a global problem due to population growth and industrial, economic, and social development; therefore, it is an area of significant attention to minimize environmental impact and the risk of disease in the population. The objective of this paper is to present an analysis of the main research trends in waste management using artificial intelligence through the evolution of publications in specialized journals and conferences in the area. Documentary research, combined with bibliometric and content analysis techniques, was used to examine the information obtained from 2015 to 2024. The Lens.org database was used as the primary source of information, and through the use of keywords and different search strategies, relevant information was retrieved for the indicated period. The main results show that the international scientific community is greatly interested in conducting research related to improving waste management using artificial intelligence, and China is one of the leading countries applying these tools to waste management. Wastewater, solid waste, construction waste, plastics, and energy generation are the main wastes treated with artificial intelligence.

Keywords: waste management, artificial intelligence, research trends, performance, usage.

UNESCO Code: 3308.02 – Environmental engineering and technology - Industrial Waste

PUBLICACIONES EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA, revista científica de publicación continua, dos números al año, editada en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA) en la ciudad de Barquisimeto, Venezuela, bajo la Licencia CC BY-NC-SA. ISSN:1856-8890, EISSN:2477-9660. Depósitos legales: pp200702LA2730, ppi201402LA4590.

*Autor de Correspondencia

***Gloria María Aponte Figueroa.** ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1029-8264>. Correo: gapontef@ucab.edu.ve. Ingeniero Químico, Docente - Investigadora, Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello (UCAB). Venezuela.

1. Introducción

La gestión de residuos es uno de los problemas más importantes de la civilización moderna [1]. La generación de grandes cantidades de residuos es una situación cada vez más grave a escala global debido al dinámico desarrollo de la economía y la tecnología. Además, es un problema muy complejo y requiere de una solución basada en un enfoque integral. Sin embargo, su naturaleza interdisciplinaria amerita que se realicen investigaciones en una variedad de campos científicos, desde la química y la biología, hasta la gestión y las tecnologías de la información [2].

La producción de residuos está aumentando en todo el mundo. Se estima que en 2020 se generaron 2.240 millones de toneladas de residuos sólidos, lo que equivale a una huella de carbono de 0,79 kilogramos por persona al día. Teniendo en cuenta el rápido crecimiento demográfico y la urbanización, se espera que la generación anual de residuos aumente un 73% en comparación con los niveles de 2020, hasta llegar a 3.880 millones de toneladas en 2050 [3].

En comparación con los países desarrollados, los residentes de los países en desarrollo, especialmente los pobres de las zonas urbanas, se ven más afectados por la gestión insostenible de residuos. En los países de bajos ingresos, más del 90% de los residuos normalmente se tiran en vertederos no regulados o se incineran a cielo abierto. Estas acciones tienen graves impactos en la salud, la seguridad y el medio ambiente. Los residuos mal gestionados pueden convertirse en un caldo de cultivo para vectores de enfermedades, contribuir al cambio climático global al producir metano e incluso promover la violencia urbana [3].

La gestión adecuada de los residuos es esencial para construir ciudades sostenibles y habitables, pero sigue siendo un desafío para diversos países y ciudades en desarrollo. La gestión eficaz de residuos es costosa y a menudo representa entre el 20% y el 50% de los presupuestos municipales. La operación de este servicio municipal esencialmente requiere sistemas integrados que sean eficientes, sostenibles y socialmente respaldados [3]. Considerando los aspectos antes mencionados y tomando en cuenta que la gestión de residuos es una actividad insalubre y la participación del ser humano en dicha actividad afecta directamente su condición física, se hace imprescindible implementar tecnologías que ayuden a mejorar la gestión de residuos y al mismo tiempo permitan que cada vez el ser humano tenga menor participación en dicha actividad [4 y 5]. En esa dirección, surge la aplicación de la inteligencia artificial (IA) con la finalidad de optimizar todos los procesos que están involucrados en la gestión de residuos. La IA se ha convertido en una fuerza transformadora en diversas industrias en los últimos años, y la gestión de residuos no es una excepción. La integración de la IA en este sector revolucionará la forma en cómo se gestionan, procesan y reciclan los residuos, lo que conducirá a prácticas de gestión de residuos más eficientes, sostenibles y rentables [6].

El aporte de este estudio está centrado en analizar las principales tendencias dónde se han concentrado los esfuerzos de investigación relacionados con el uso de la inteligencia artificial en la gestión de residuos, mediante la evolución de las investigaciones publicadas en artículos con aportes originales durante el periodo 2015-2024. Se analizó la evolución en el tiempo de las publicaciones, considerando los principales países, las áreas de investigación y organizaciones; así como las tendencias tanto desde el punto de vista de las tecnologías de inteligencia artificial y las áreas de la gestión de residuos en que se han estado utilizando. Es así como este trabajo permite evidenciar un panorama global de las tendencias a nivel mundial que evidencia los esfuerzos de investigación en el área y cuyo resultado sirve de complemento a los diferentes estudios específicos publicados enmarcados en estados del arte o revisiones sistemáticas de la literatura que se centran, principalmente, en aspectos particulares de la

aplicación de la inteligencia artificial en la gestión de residuos, tal como se mencionan en algunos estudios (ver Tabla 1).

Tabla 1. Algunos estudios realizados en el área de aplicación de IA en la gestión de residuos

Título de la publicación	Aspectos relevantes	Fuente
Inteligencia artificial para la gestión de residuos en ciudades inteligentes: una revisión	Estado del arte sobre el uso de la inteligencia artificial para convertir los residuos en energía	[7]
Algoritmos de inteligencia artificial para la predicción y el análisis de sensibilidad de las propiedades mecánicas del hormigón de agregado reciclado: una revisión	Estado del arte enfocado en el análisis de propiedades mecánicas de reciclado de agregados para concreto usando IA	[8]
Transformación digital y sostenibilidad ambiental: una revisión y una agenda de investigación	Es una revisión sistemática de literatura orientada en la transformación digital enmarcada en la sustentabilidad ambiental	[9]
Avances recientes en aplicaciones de inteligencia artificial en la gestión de residuos sólidos: una revisión.	Es una revisión sobre los avances tecnológicos más recientes de las aplicaciones de la IA en la gestión de residuos	[10]
Aplicaciones de inteligencia artificial en la gestión de residuos sólidos: una revisión sistemática de la investigación.	Revisión sistemática sobre los usos de la IA en la gestión de desechos llevada a cabo con 84 publicaciones realizadas entre 2004-2019.	[11]

La estructura de este trabajo está conformada por: los aspectos teóricos fundamentales relacionados con los procesos asociados a la gestión de residuos, inteligencia artificial y recolección de residuos; así como también la sección de metodología, donde se expone el procedimiento seguido para obtener, procesar y analizar la información que se utilizó para obtener las tendencias, seguido del punto relacionado con las principales tendencias obtenidas del estudio. Finalmente se exponen las principales tendencias y conclusiones; así como algunos aspectos relacionados con la ampliación del estudio y futuras investigaciones y las referencias consultadas para la elaboración del mismo.

2. Metodología

Este trabajo se llevó a cabo mediante una investigación documental en el área de gestión de residuos aplicando inteligencia artificial. Se realizó una búsqueda de información para recuperar los artículos publicados relacionados con el tema de estudio en el período 2015-2024. Se utilizó la base de datos Lens.org, para recuperar la información; esta es una fuente multidisciplinaria de información con alrededor de 280 millones de artículos indizados pertenecientes a las diferentes áreas de la ciencia y tecnología. La búsqueda de información se realizó mediante la combinación de palabras clave acotadas a los siguientes campos: título (TI), resumen (AB), palabras clave (KW) y campo de estudio (SF).

La metodología para obtener el universo de información que posteriormente fue utilizado para obtener las tendencias, consistió en un procedimiento conformado por los siguientes pasos: se seleccionaron las palabras clave que caracterizan las áreas del estudio (ver estrategia aplicada en la Tabla 2). Se acotó la búsqueda de información a los campos de búsqueda: título, resumen, palabras clave y campo de estudio; se limitó la búsqueda al periodo 2015-2024 ya que los años anteriores al 2015 las aplicaciones de inteligencia artificial no eran representativas tal como se observa en la distribución de

las publicaciones en el tiempo. Se procedió a filtrar la información tomando en cuenta solo documentos del tipo artículos con aportes originales publicados en revistas y conferencias. Una vez obtenida la información se eliminaron los duplicados y se seleccionaron los documentos relevantes relacionados con el área de estudio. Para procesar la información se utilizó la herramienta Analysis de la base de datos Lens.org, la cual permite obtener la documentación en función de los parámetros que se deseen representar en las tendencias. Finalmente, para la obtención de las tendencias se utilizó la técnica de análisis bibliométrico en conjunto con la técnica de análisis de contenido.

La estrategia de búsqueda empleada para recuperar los documentos se presenta en la Tabla 2. Dicha estrategia permitió recuperar un total de 9527 artículos en el periodo seleccionado, luego se acotó a los artículos con aportes originales publicados en revistas y congresos, se eliminaron los duplicados y posteriormente aquellos artículos que no eran de interés para obtener un universo de 7521 documentos que fueron utilizados para el estudio de tendencias.

Tabla 2. Estrategia de búsqueda utilizada

Tipo de publicación	Estrategia aplicada	Campos de búsquedas	Período de tiempo
Artículos publicados en revistas y congresos especializados en el área de estudio	((("Artificial intelligence" OR "machine learning" OR "deep learning") AND (waste*) AND (management OR recycl*) NOT review NOT)	Título (TI); Resumen (AB); Palabras clave (KW); Campo de estudio (FS)	2015:2024

Fuente: elaboración propia

3. Aspectos teóricos

3.1 Procesos involucrados en la gestión de residuos sólidos

La gestión de residuos incluye las etapas de: recolección, transporte, procesamiento, reciclaje o eliminación, y seguimiento de materiales de desecho [1]. La etapa de recolección de residuos involucra como etapa previa la clasificación de los mismos, ya que cada tipo de residuo sólido tiene propiedades diferentes que son adecuadas para ciertas tecnologías de reciclaje, por lo que es necesario clasificarlos. Por ejemplo, los residuos orgánicos podrían reciclarse mediante compostaje y digestión anaeróbica, mientras que los residuos plásticos, las latas metálicas, el papel de desecho y el caucho de desecho requieren procesos mecánicos, térmicos e incluso químicos [12].

La heterogeneidad de la composición y los complejos mecanismos de los sistemas de gestión de residuos han limitado no solo el desempeño de los enfoques de tratamientos convencionales, sino también en términos de transporte de residuos, los planes y rutas de transporte inadecuados e ineficientes que consumen una gran cantidad de recursos humanos, físicos financieros, así como el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero [13]. Existen varios métodos tradicionales que se utilizan comúnmente para clasificar los residuos [14] que se describen a continuación.

- Inspección visual: es el método más simple y directo, donde los residuos se clasifican en función de su apariencia. Por ejemplo, el papel, el plástico y el metal a menudo se pueden distinguir fácilmente por su color, forma y textura.
- Muestreo y análisis: este método implica recolectar una muestra representativa de los residuos y analizarla para determinar su composición. Esto se puede hacer mediante una variedad de métodos, como el análisis químico o la espectroscopia.

- c. Clasificación manual: este método consiste en clasificar físicamente los residuos a mano en diferentes categorías. Esto lo pueden hacer los trabajadores de un vertedero o una instalación de reciclaje, o los voluntarios en eventos de limpieza comunitarios.
- d. Tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) se puede utilizar para clasificar los residuos colocando etiquetas con información de su identificación; esta información puede ser leída por escáneres RFID para clasificar automáticamente los residuos.

Los residuos clasificados se colocan en varios contenedores en lugares designados en la vía pública que posteriormente son vaciados en los vehículos recolectores y transportados hacia los centros de selección y transferencia o sitios de tratamiento y disposición final, dependiendo de si se trata de residuos recuperables o no. Los residuos que no pueden ser reciclados o reutilizados se separan en estos centros y se preparan para transportarlos en vehículos de mayor capacidad a los sitios de tratamiento y disposición final. La última etapa, el tratamiento y disposición final de los desechos, se lleva a cabo en lugares autorizados por el gobierno local para su disposición permanente o tratamiento mediante métodos ambientalmente aceptables, como la incineración, el compostaje y la digestión anaeróbica, entre otros [15].

Esta tecnología tradicional utilizada para clasificar residuos presenta una baja eficiencia y baja precisión; para mejorarla se pueden utilizar técnicas inteligentes. La gestión adecuada de los residuos sólidos es esencial, así como el seguimiento de todo el proceso, desde el almacenamiento hasta la eliminación de los residuos [16]. Es allí donde surge la importancia del uso de la inteligencia artificial en la gestión de residuos con la finalidad de mejorar este proceso, reducir la contaminación y evitar lo más posible la intervención de los seres humanos durante el proceso de gestión de residuos.

3.2 Inteligencia artificial aplicada a la gestión de residuos

La comunidad académica y científica internacional ha descubierto que los avances en las técnicas de inteligencia artificial son apropiados para ser aplicadas en la gestión de residuos; ello ayuda a garantizar la seguridad ambiental y la salud pública al lograr controlar adecuadamente la generación de los residuos [15]. El sector de la gestión de residuos ha adquirido una nueva dimensión como resultado de aplicación de las técnicas relacionadas con la economía circular (EC), donde uno de sus principios es reciclar los residuos y crear valor a partir de los residuos generados [17].

Uno de los principales problemas que presenta la gestión de residuos es la transformación de los mismos atendiendo el modelo de la circularidad, particularmente en términos de seleccionar y clasificar los residuos generados [15].

La IA tiene el potencial de acelerar los esfuerzos globales para conservar los recursos y salvaguardar el medio ambiente. Existe una necesidad apremiante de una búsqueda constante de métodos y estrategias que permitan la gestión adecuada de los residuos sólidos municipales en grandes áreas urbanas, teniendo en cuenta las características únicas de cada sector de una ciudad. En ese sentido, puede resultar difícil comprender cómo evolucionan los programas de gestión de residuos sólidos municipales; de tal manera que, para tener un plan exitoso, es necesario evaluar y anticipar la creación de residuos sólidos municipales con anticipación. Los modelos de inteligencia artificial pueden ser eficaces para implementar modelos de pronóstico de residuos sólidos municipales, ya que son buenos para hacer predicciones. Para lidiar de manera efectiva con las toneladas de basura que se producen todos los días, el sistema actual de gestión de residuos debe repensarse y mejorarse. Se prevé que la segregación inteligente, el reciclaje inteligente y la automatización de la clasificación y eliminación de residuos se beneficiarán del uso de la IA [18 y 19].

3.2.1 Aprendizaje automático para la predicción de la generación de residuos

El aumento de la generación de residuos sólidos es un reto ambiental que afecta a los pasos posteriores del proceso: almacenamiento, recogida, transporte, tratamiento, reciclaje y disposición final en forma adecuada [20 y 21]. En este sentido, el uso de técnicas de aprendizaje automático es una forma eficiente de extraer patrones y comprender los factores que influyen en la generación de residuos y la composición esperada. Permite predecir el volumen generado o la composición esperada, desarrollando un enfoque numérico o categórico. Los métodos más utilizados en esta aplicación son principalmente los métodos de Análisis de Clusters, Redes Neuronales Artificiales, Máquinas de Vectores de Soporte Métodos Basados en Árboles y K-Vecinos Más Cercanos.

3.2.2 Mejoras en la recolección: estimación del nivel de contenedores y optimización de rutas

Algunos de los desafíos que se enfrentan en esta etapa de gestión son el alto gasto de combustible, las emisiones atmosféricas, la necesidad de estimar el momento ideal para la recolección y la estimación del nivel ideal de contenedores de residuos. Estas dificultades justifican que la etapa de recolección concentre alrededor del 70% de los costos operativos [22]. Algunas de las aplicaciones para el desarrollo de contenedores inteligentes son: Análisis de cluster, Máquinas de vectores de soporte, redes neuronales convolucionales. La optimización de rutas permite reducir la distancia recorrida y la cantidad de vehículos en circulación, lo que genera mejoras en el tráfico y reducción de emisiones contaminantes [23]. Esto corrobora que la modelización es una herramienta poderosa para la toma de decisiones y la generación de insights para la planificación e implementación de acciones sustentables y eficientes [24].

3.2.3 Clasificación automática

La clasificación automática se considera una tecnología que aproxima la gestión de los residuos sólidos urbanos a prácticas sostenibles y a la optimización del proceso de reciclaje [25]. En esta etapa del proceso, el uso de la detección de imágenes permite la clasificación automática de los residuos. Esto es ventajoso ya que mejora el potencial de una adecuada segregación de los componentes para su reutilización o reciclaje. Los autores [25, 26, 27 y 28], aplicaron con éxito el aprendizaje automático a la clasificación de la composición de los residuos mediante imágenes de manera automática.

Estas aplicaciones confirman que la clasificación automática lograda mediante la aplicación de la IA contribuye también al desarrollo de equipos, lo que mejora los beneficios. Los enfoques citados demuestran el potencial de la IA para reducir los errores en la clasificación, lo que aumenta la eficiencia del proceso de valorización. Además, la IA desempeña un papel importante en la reducción de los riesgos para la salud de los empleados al minimizar el contacto manual entre ellos y las fracciones de residuos sólidos [24, 29, 30].

4. Principales tendencias

Dada la importancia que representa la gestión de residuos en el mundo, la comunidad académica y científica internacional se ha abocado a estudiar el problema de cómo gestionar los residuos producidos en las diferentes áreas industriales y en el quehacer diario de la vida cotidiana. Es así como se observa, en la Figura 1 el esfuerzo de investigación realizado por la comunidad académica y científica internacional, la evolución de los trabajos de investigación publicados internacionalmente, relacionados con la gestión de residuos aplicando inteligencia artificial, durante el periodo objeto de estudio que presenta una tendencia creciente acelerada a partir del año 2020.

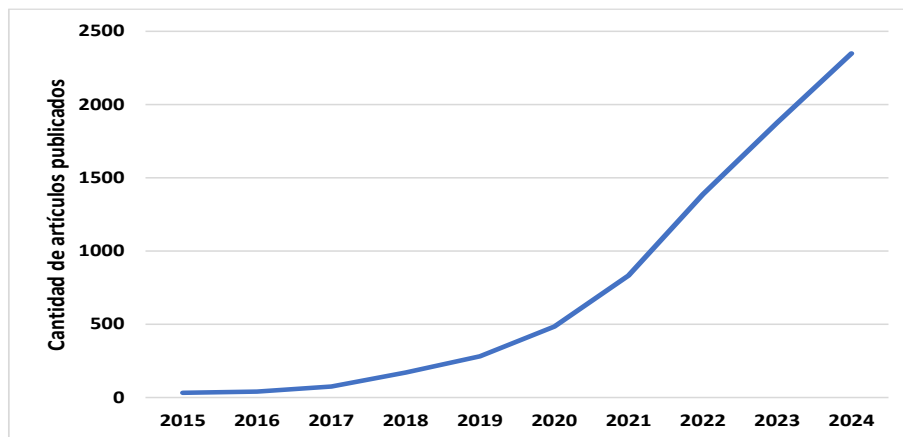


Figura 1. Evolución de los artículos publicados.

Fuente: Elaborado con los datos obtenidos de la base de datos Lens.org

China lidera el esfuerzo de investigación realizado en el periodo de estudio que se ve reflejado con la mayor cantidad de publicaciones realizadas (ver Figura 2), seguido de Estados Unidos; este escenario responde, por una parte, con la necesidad que tienen de controlar y gestionar los residuos industriales debido a que son las mayores economías productoras de residuos en el mundo; China genera el 16% de los residuos en el mundo y EE.UU. genera el 12% [31] y, por otra parte, con la finalidad de cumplir con la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

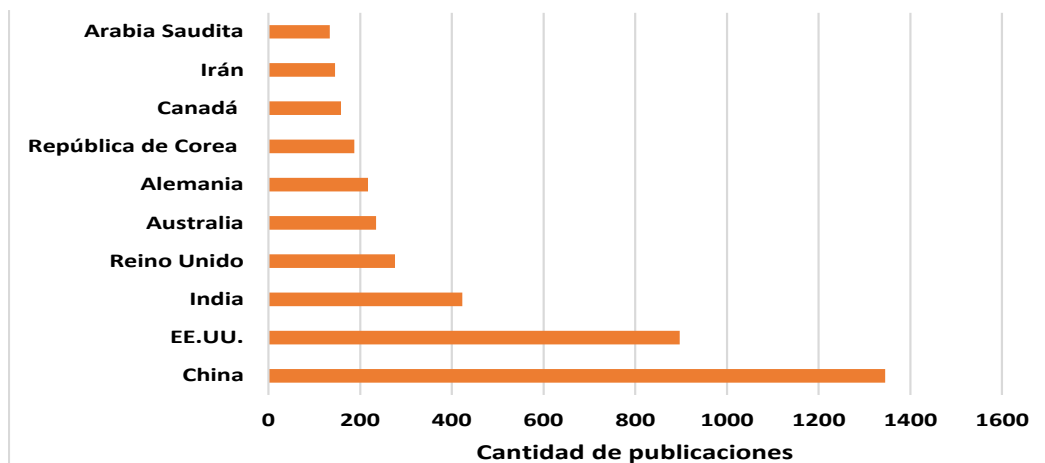


Figura 2. Principales países con investigaciones con publicaciones en el área

Fuente: Elaborado con los datos obtenidos de la base de datos Lens.org

Al realizar un análisis de las publicaciones por tipo de desecho, se observa que las aplicaciones de inteligencia artificial se han enfocado en los residuos generados en los procesos industriales relacionados con la generación de energía, aguas residuales, y los residuos sólidos como los tres sectores principales donde se concentra la mayor cantidad de publicaciones con una tendencia creciente acelerada en los últimos años (ver Figura 3); luego se ubican los residuos plásticos y los residuos provenientes de la industria de la construcción con menor cantidad de publicaciones en el periodo estudiado.

**Figura 3.** Evolución de las publicaciones relacionadas con aplicación de IA en la gestión de residuos*Fuente:* Elaborado con los datos obtenidos de la base de datos Lens.org

Dicha tendencia se puede confirmar al realizar un análisis de las áreas más importantes de publicación enmarcadas en la gestión de residuos por tipo de industria y país, donde el sector industrial que está presente en los principales países analizados es el representado por las energías renovables, sostenibilidad y medio ambiente (ver Tabla 3). Allí también se observa que China, EE.UU. e India son los países que presentan la mayor cantidad de publicaciones en las áreas analizadas y ello está asociado a que en estos países se produce el 40% de los residuos en el mundo [31], lo que representa una tendencia importante de los esfuerzos de investigación que estos países están realizando en esta área.

Tabla 3. Principales áreas de publicación en el área de gestión de residuos por país

País	Principales áreas con generación de residuos donde se aplica IA	Cantidad de artículos
China	- Energía renovable, sostenibilidad y medio ambiente	106
	· Gestión y eliminación de residuos	100
	· Ciencia de los materiales	89
	· Ingeniería industrial y manufactura	89
	· Química ambiental	77
EE.UU.	· Ingeniería Industrial y manufactura	42
	· Química Ambiental	41
	· Medicina general	39
	· Aplicaciones de Ciencias de la Computación	38
	· Energía renovable, sostenibilidad y medioambiente	36
India	· Ciencias ambientales	33
	· Medicina general	29
	· Ingeniería Civil y Estructural	24
	· Ciencias materiales	22
	· Ingeniería Energética y Tecnología Energética	19
Reino Unido	· Energía renovable, sostenibilidad y medio ambiente	13
	· Edificaciones y construcciones	19
	· Disposición y gestión de residuos	19
	· Ingeniería Industrial y de Manufactura	18
	· Ingeniería Civil y Estructural	16

Tabla 3. Principales áreas de publicación en el área de gestión de residuos por país

País	Principales áreas con generación de residuos donde se aplica IA	Cantidad de artículos
Australia	· Ingeniería Civil y Estructural	20
	· Disposición y gestión de residuos	18
	· Edificaciones y construcciones	17
	· Ciencia de los materiales	17
	· Ciencias ambientales	16

Fuente: Elaborados con los datos obtenidos de la base de datos Lens.org

Por otra parte, al realizar un análisis sobre las principales instituciones involucradas en el esfuerzo de investigación realizado en el periodo de estudio se observa que hay instituciones chinas presentes en las diferentes áreas de gestión por tipo de desecho (ver Tabla 4), con mayor presencia en la gestión de las aguas de desecho y el sector energético.

Tabla 4. Principales organizaciones en la gestión de residuos

Áreas	Organización/país	País
Aguas residuales	Chinese Academy of Science	China
	Harbin Institute of Technology	China
	Beijing University of Technology	China
	Central South University	China
	Islamic Azad University	Irán
Energía	National University of Singapore	Singapur
	Chinese Academy of Science	China
	Hong Kong Polytechnic University	China
	Huazhong University of Science & Technology	China
	Prince Sattam Bin Abdulaziz University	Arabia Saudita
Gestión de residuos sólidos	National University of Singapore	Singapur
	Tongji University	China
	King Khali University	Arabia Saudita
	Korea University	República de Corea
	University of Tehran	Irán
Residuos plásticos	Geological Survey of India	India
	Sapienza University of Rome	Italia
	Harvard University	EE.UU.
	Czestochowa University of Technology	Polonia
	Nanyang Technological University	China
Residuos de materiales de construcción	Islamic Azad University	Irán
	Shenzhen University	China
	COMSAT University Islamabad	Paquistán
	Guandong University of Technology	China
	South China University of Technology	China

Fuente: Elaborados con los datos obtenidos de la base de datos Lens.org

Por otra parte, al realizar un análisis sobre las principales instituciones involucradas en el esfuerzo de investigación realizado en el periodo de estudio se observa que hay instituciones chinas presentes en las diferentes áreas de gestión por tipo de desecho (ver Tabla 4), con mayor presencia en la gestión de las aguas de desecho y el sector energético.

Al analizar con más detalle el caso de China y Estados Unidos, dos de los países con mayor cantidad de residuos generados en el mundo, presentan el mayor esfuerzo de investigación y publicaciones en el área. En el caso de China presenta una tendencia creciente acelerada a partir del año 2019; mientras que en el caso de Estados Unidos la evolución de las publicaciones es creciente moderada (ver Figura 4).

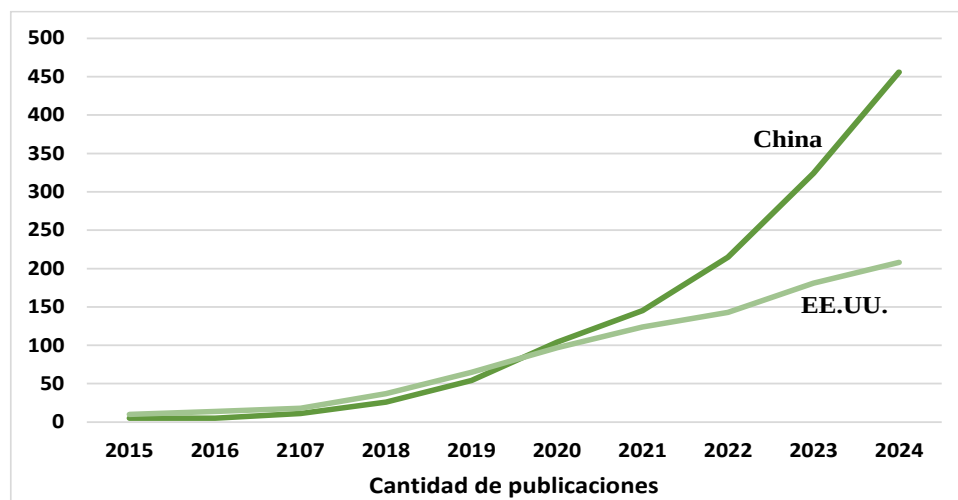


Figura 4. Evolución de las publicaciones: aplicación de IA en la gestión de residuos para China y EE.UU.

Fuente: Elaborados con los datos obtenidos de la base de datos Lens.org

Así mismo, las principales organizaciones involucradas en dichas actividades de investigación, en el caso de China tiene una presencia destacada la Academia de Ciencias China; mientras en Estados Unidos, se observa una participación muy similar de las principales universidades de dicho país (ver Tabla 5).

Tabla 5. Principales instituciones: China y Estados Unidos

País	Institución	Cantidad de publicaciones
China	Chinese Academy of Science	63
	Tsinghua University	53
	Tongji University	39
	Central South University	31
	Beijing University of Technology	27
Estados Unidos	Purdue University	21
	Texas AM University	21
	Stanford University	17
	Cornell University	15
	Massachusetts Institute of Technology	15

Fuente: Elaborados con los datos obtenidos de la base de datos Lens.org

4.1 Modelos de inteligencia artificial utilizados en la gestión de residuos

La aplicación de la inteligencia artificial en la gestión de residuos tiene un gran potencial en la gestión de residuos ya que mejora la eficacia de la recolección, el procesamiento y la clasificación de residuos. Las tecnologías basadas en inteligencia artificial, como los contenedores de basura inteligentes, los robots de clasificación, los modelos predictivos y la detección inalámbrica, permiten supervisar los contenedores de basura, predecir la recolección de residuos y optimizar el rendimiento de las instalaciones de procesamiento de residuos [18].

En la Figura 5 se observa la evolución de las publicaciones relacionadas con investigaciones enfocadas en el uso de las redes neuronales artificiales, árboles de decisión, máquinas de vectores de soporte, algoritmo genético y modelos híbridos como parte de las principales aplicaciones de inteligencia artificial que se están aplicando en la gestión de residuos.

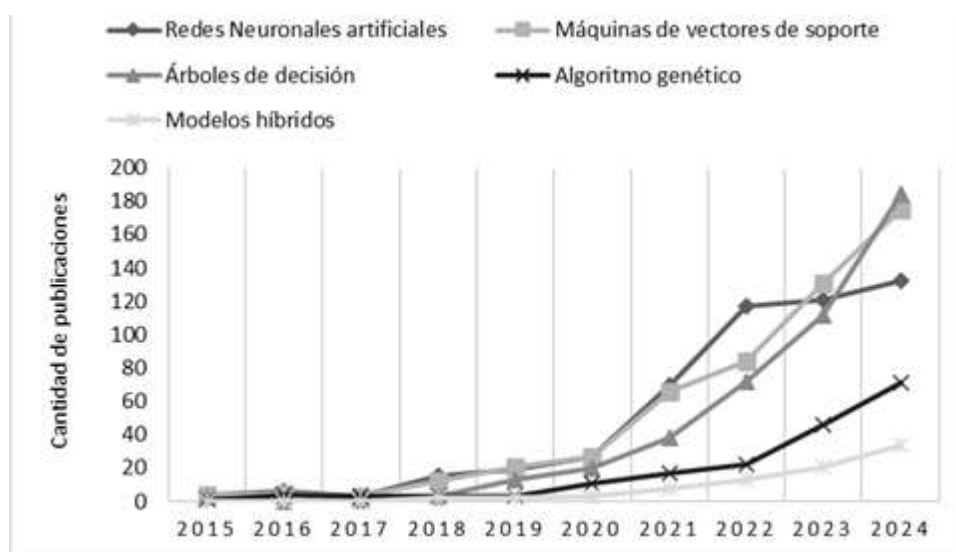


Figura 5. Evolución de las publicaciones sobre modelos de IA utilizados en la gestión de residuos
Fuente: Elaborado con los datos obtenidos de la base de datos Lens.org

Se observa que China e India son los países con mayor cantidad de investigaciones publicadas en el área (ver Figura 6), considerando que ambos países se encuentran en los primeros lugares de producción de residuos en el mundo [3]; también se observan las principales organizaciones con mayor cantidad de publicaciones en el área.

4.2 Principales áreas de aplicación de la IA en las etapas de gestión de residuos

La comunidad científica y académica internacional ha descubierto que los avances en las técnicas de inteligencia artificial son instrumentos apropiados en el campo de la gestión de residuos ya que ayudaría a garantizar la seguridad ambiental y la salud pública mediante el control adecuado de la generación de residuos [15 y 6]. En la Figura 7 se puede apreciar la evolución de los trabajos publicados en el mundo que tratan sobre la aplicación de la IA en las principales etapas de gestión de residuos. La etapa de procesamiento y reciclaje es la que presenta mayor cantidad de publicaciones y tendencia acelerada creciente a partir del año 2021.

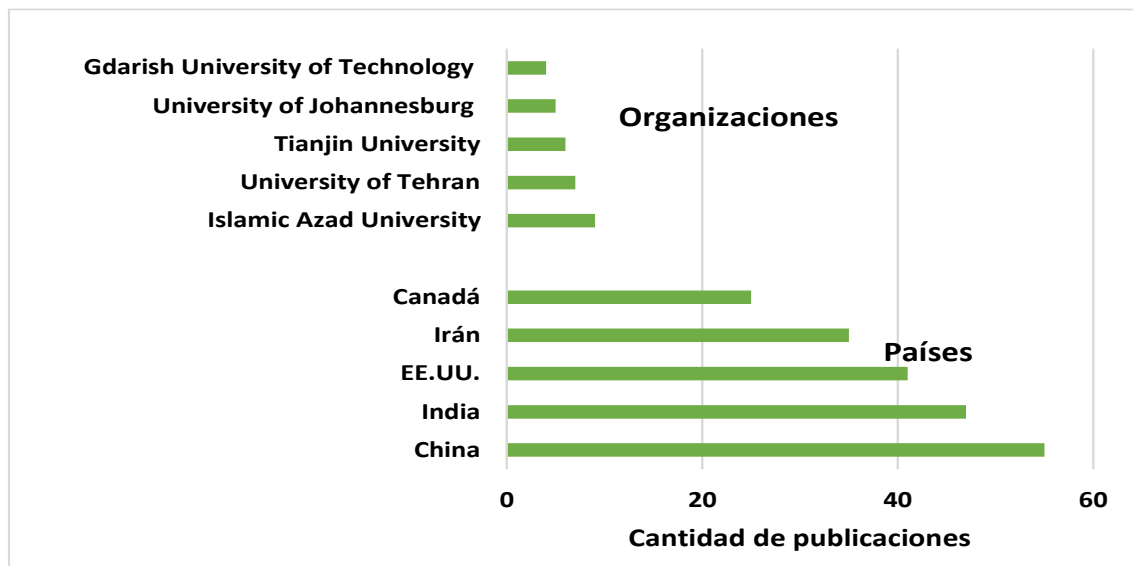


Figura 6. Principales países y organizaciones con publicaciones sobre modelos de IA utilizados en la gestión de residuos

Fuente: Elaborado con los datos obtenidos de la base de datos Lens.org

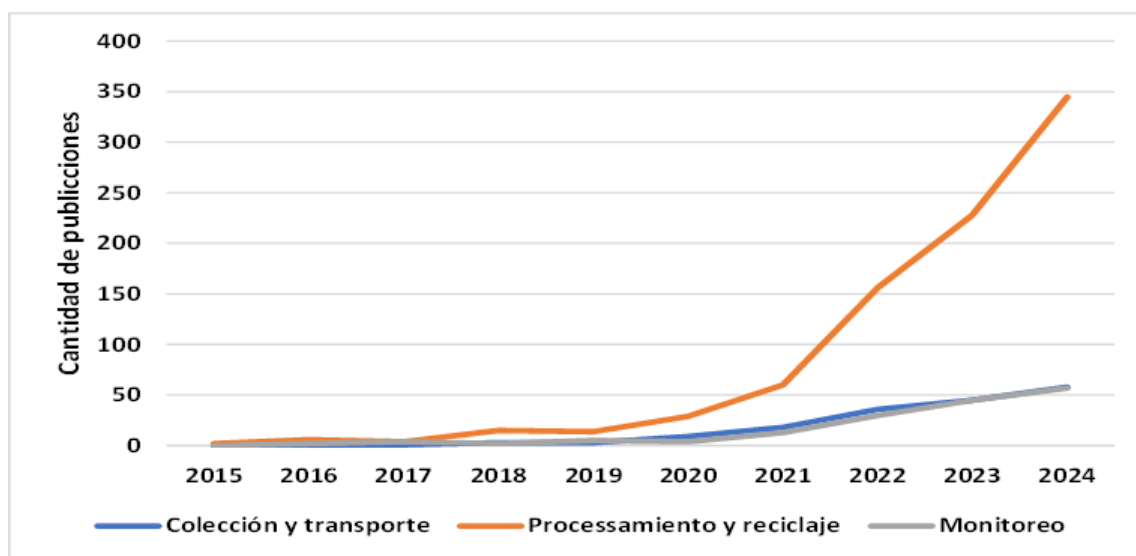


Figura 7. Evolución de las publicaciones de la aplicación de IA en las etapas de gestión de residuos.

Fuente: Elaborado con los datos obtenidos de la base de datos Lens.org

Con respecto a la etapa de colección de los residuos que involucra la clasificación automática de los mismos mediante el uso de IA, eliminado así la necesidad de separar manualmente los residuos. En esta etapa se utilizan redes neuronales artificiales para identificar diferentes fracciones de residuos distintas. También se han utilizado redes neuronales convolucionales profundas para automatizar el procedimiento de segregación de la basura [15]. En la etapa de colección de residuos utilizando IA, China es el país con mayor cantidad de investigaciones publicadas (ver Figura 8) y la organización con mayor cantidad de investigaciones es la Silesian University of Technology de Polonia.

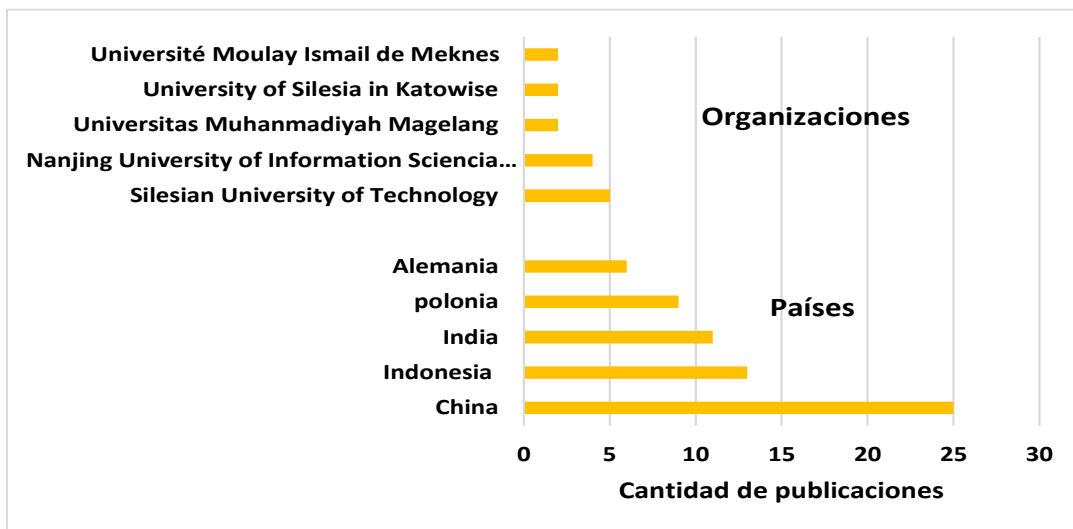


Figura 8. Principales países y organizaciones. IA aplicada en colección de residuos
 Fuente: Elaborados con los datos obtenidos de la base de datos Lens.org

En cuanto a la etapa de procesamiento y reciclaje, se observa que China lideriza las publicaciones relacionadas con la aplicación de IA en esta etapa (ver Figura 9), donde la Beijing University of Technology es la principal organización con trabajos publicados en el área.

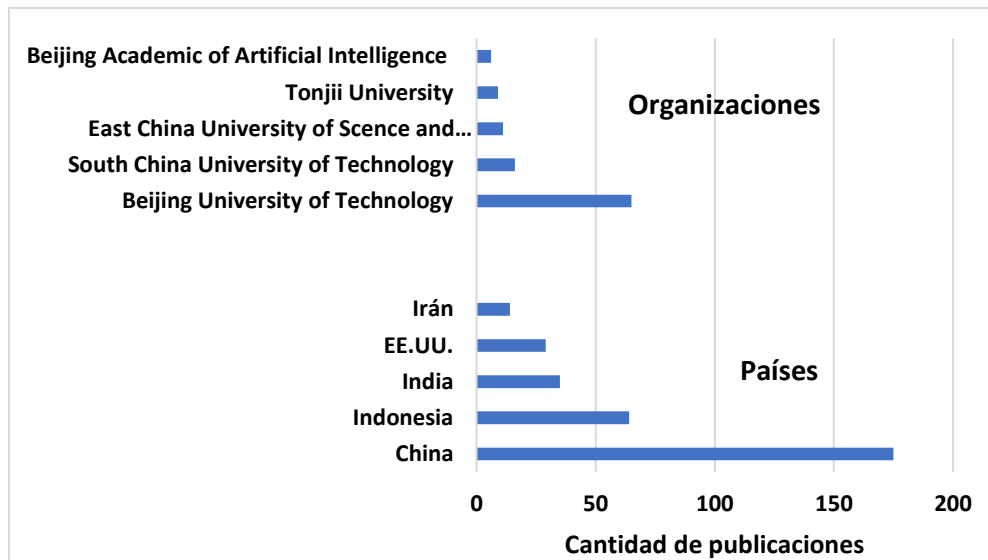


Figura 9. Principales países y organizaciones con IA aplicada en procesamiento y reciclaje
 Fuente: Elaborados con los datos obtenidos de la base de datos Lens.org

Mientras que, en la etapa de monitoreo, se observa a China como el principal país con mayor esfuerzo en investigación en el uso de la IA en dicha etapa (ver Figura 10); así mismo, a nivel de organizaciones, la Beijing University of Technology es la principal.

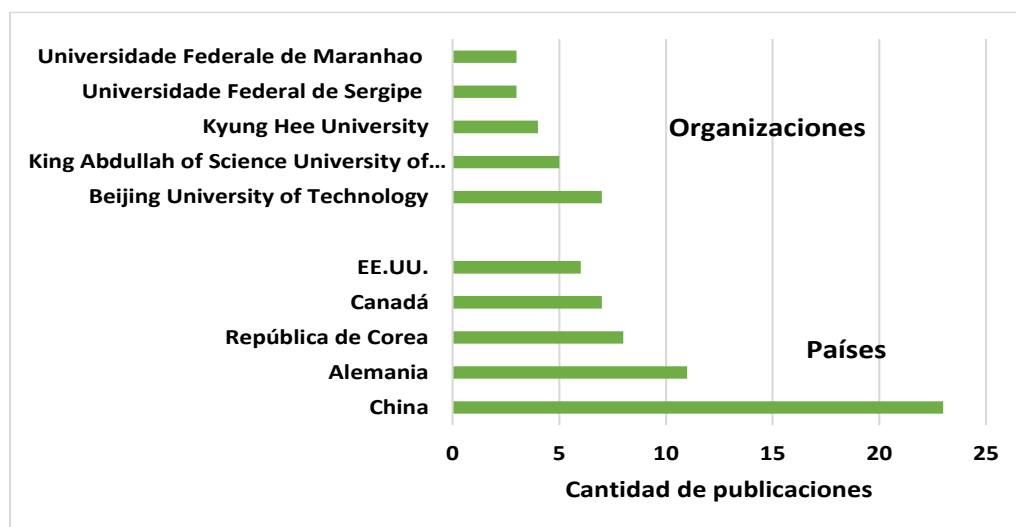


Figura 10. Principales países y organizaciones con IA aplicada en la etapa de monitoreo

Fuente: Elaborados con los datos obtenidos de la base de datos Lens.org

Este estudio muestra un interés significativo de la comunidad internacional en la investigación sobre la aplicación de la IA para mejorar la gestión de residuos. Este hallazgo subraya la creciente importancia de la IA como herramienta para abordar los desafíos asociados con la generación y el manejo de residuos a nivel mundial. La discusión podría profundizar en los factores que impulsan este interés, como la creciente urbanización, la mayor conciencia ambiental y la necesidad de soluciones más eficientes y sostenibles. En las aplicaciones de la IA, el liderazgo de China destaca como uno de los principales países que aplican herramientas de inteligencia artificial para gestionar los residuos de manera más eficiente y segura. Este liderazgo puede atribuirse a la necesidad de China de manejar grandes volúmenes de residuos industriales y urbanos, así como a su enfoque en la innovación tecnológica; sin embargo, se podría ampliar este punto analizando las políticas y estrategias específicas de China que fomentan la adopción de la IA en este sector. En este trabajo se identifican los principales tipos de residuos en los que se está aplicando la inteligencia artificial, incluyendo aguas residuales, residuos sólidos, residuos de deconstrucción, plásticos y generación de energía; así como las principales tecnologías que se utilizan en cada uno de ellos como las Redes Neuronales Artificiales, Árboles de Decisión, Máquinas de Vectores de Soporte, Algoritmo Genético, Modelos Híbridos. Estos resultados destacan la versatilidad de la IA para abordar diferentes tipos de residuos y optimizar los procesos de gestión en diversos sectores.

5. Conclusiones

La gestión de residuos constituye un desafío crítico tanto para las naciones desarrolladas como para aquellas en vías de desarrollo. Existen brechas significativas en los procesos de eliminación y tratamiento, que se manifiestan en una persistente contaminación ambiental, aunada a los elevados costos operacionales y, en ocasiones, a la ausencia de liderazgo estratégico en la implementación de políticas efectivas. No obstante, la Inteligencia Artificial emerge como un catalizador para mejorar la eficiencia del tratamiento, mitigar el daño ecológico y ofrecer soluciones computacionales para una gestión más inteligente e integrada. Específicamente, la aplicación de redes neuronales artificiales para la clasificación automatizada de residuos, y la implementación de redes neuronales convolucionales profundas para automatizar el procedimiento de segregación, representan avances clave. Dicha

automatización no solo optimiza la etapa de separación, sino que también elimina la dependencia de la mano de obra humana en tareas de alto riesgo, lo que consecuentemente minimiza la exposición del personal a la contaminación inherente a esta actividad.

La gestión de residuos, impulsada por la aplicación de la inteligencia artificial, ha cobrado relevancia en la investigación académica y científica, especialmente en países como China y Estados Unidos, que lideran en publicaciones sobre este tema; seguidos de India y Reino Unido. Las investigaciones de China están principalmente centradas en la gestión y eliminación de residuos y en aquellos provenientes de los procesos de las energías renovables; mientras que Estados Unidos presenta un esfuerzo de investigación dirigido hacia el tratamiento y gestión de residuos proveniente de los procesos químicos industriales. La creciente tendencia en la investigación sugiere un compromiso global hacia la sostenibilidad y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, destacando la importancia de innovaciones tecnológicas para mejorar la eficacia en la recolección y procesamiento de residuos.

Las principales organizaciones que dedican esfuerzos de investigación en China se enfocan en el uso de la inteligencia artificial para optimizar la gestión de residuos en las aguas residuales y de energía. Con respecto a las principales aplicaciones de inteligencia artificial que han tenido mayor uso en la gestión de residuos son: las redes neuronales artificiales, árboles de decisión, máquinas de vectores de soporte, algoritmo genético y modelos híbridos. En el caso de Estados Unidos, las investigaciones están más enfocadas en el uso de la inteligencia artificial para tratar los residuos plásticos ya que este país es el principal consumidor de este tipo de materiales y principal generador de este tipo de residuos. También es de interés mencionar a Singapur y Arabia Saudita, cuyo esfuerzo de investigación está centrado en el tratamiento de residuos provenientes de los procesos de energía y los residuos sólidos.

La comunidad científica y académica internacional manifiesta un interés creciente en la investigación sobre la gestión de residuos que trasciendan la mera minimización del impacto ambiental. El foco se ha desplazado hacia la valorización de estos subproductos mediante su reintroducción en los ciclos productivos para la obtención de nuevos materiales o la extensión de su vida útil. Este enfoque es fundamental para la transición hacia una economía circular, dado que contribuye directamente a disminuir la dependencia de recursos naturales vírgenes y favorece la regeneración de los ecosistemas. Consecuentemente, la optimización y seguridad de la gestión de residuos se ha convertido en un área crítica, lo que subraya la pertinencia de los esfuerzos de investigación orientados a la aplicación de la inteligencia artificial para lograr una implementación más eficiente y rigurosa de estos procesos.

Referencias

- [1] Burduk, A. et al. (2022). Waste Management with the Use of Heuristic Algorithms and Internet of Things Technology. *Sensors* 2022, 22(22), 8786. <https://doi.org/10.3390/s22228786>
- [2] Akhtar, M.; Hannan, M.A.; Begum, R.A.; Basri, H.; Scavino, E. (2017). Backtracking search algorithm in CVRP models for efficient solid waste collection and route optimization. *Waste Management*. 2017, 61, 117–118. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.022>
- [3] World Bank Group (2022). Solid waste management. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>

- [4] Karunambiga, K. & Sathiya, M. (2023). Technological View on Smart Waste Management. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*. Volume 12–Issue 03, 30-31, 2023. D <https://doi.org/10.7753/IJCATR1203.1008>
- [5] Alsabt, R.; Alkhaldi W.; Adenle Y.A.; Alshuwaikhat, H. M. (2024). Optimizing waste management strategies through artificial intelligence and machine learning - An economic and environmental impact study. *Cleaner Waste Systems*. Volume 8, August 2024. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100158>.
- [6] SWANA (2023). How AI is revolutionizing solid waste management. <https://swana.org/news/blog/swana-post/swana-blog/2023/12/11/how-ai-is-revolutionizing-solid-waste-management>
- [7] Bingbing F., Jiacheng Y, Zhonghao Chen, Z.; et al. (2023). Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review. *Environmental Chemistry Letters* (2023) 21:1959–1989 <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01604-3>
- [8] Nguyen, TD.; Cherif, R.; Mahieux, P-Y.; Jérôme Lux, J.; Aït-Mokhtar, A. & Bastidas-Arteaga, E. Artificial intelligence algorithms for prediction and sensitivity analysis of mechanical properties of recycled aggregate concrete: A review. *Journal of Building Engineering Année : 2023*. <https://10.1016/j.job.2023.105929>
- [9] Feroz, A.; Zo, H.; Chivaburi, A. (2021). Digital Transformation and Environmental Sustainability: A Review and Research Agenda. *Sustainability* 2021, 13(3), 1530. <https://doi.org/10.3390/su13031530>
- [10] Ihsanullah, I.; Alam, G.; Jamal, A. & Shaik, F. (2022). Recent advances in applications of artificial intelligence in solid waste management: A review. *Chemosphere* Volume 309, Part 1, December 2022
- [11] Abdallah, M.; Talib, MA. Feroz, S.; Nasir, Q.; Abdalla, H. & Mahfood, B. (2020). Artificial intelligence applications in solid waste management: A systematic research review. *Waste management (New York, N.Y.)*, Volume: 109, pp. 231-246. May 15, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.057>
- [12] Tran Luu, TN. Et al. (2023). AI application for solid waste sorting in Global South. <https://sdgs.un.org/sites/default/files/2023-05/A41%20-%20Thien-An%20Tran%20Luu%20-%20AI%20Application%20for%20Solid%20Waste%20in%20the%20global%20south.pdf>
- [13] Zhang, Q., Yang, Q., Zhang, X., Bao, Q., Su, J., and Liu, X. (2021). Waste image classification based on transfer learning and convolutional neural network. *Waste Management*, 2021, 135, pp. 150-157. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.038>
- [14] Nasir, I., & Aziz Al-Talib, G. A. (2023). Waste Classification Using Artificial Intelligence Techniques: Literature Review. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, 5, 49–59. <https://doi.org/10.47577/technium.v5i.8345>

- [15] Sharma, P. & Vaid, U. (2021). Emerging role of artificial intelligence in waste management practices. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science 889 (2021) 012047 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/889/1/012047/pdf>
- [16] Sami, K.; Amin, Z. & Hassan, R. (2020). Waste Management Using Machine Learning and Deep Learning Algorithms. International Journal on Perceptive and Cognitive Computing, 6(2), 97–106. <https://doi.org/10.31436/ijpcc.v6i2.165>
- [17] Aponte, G. (2022). Panorama internacional de la economía circular a través del análisis de la producción científica y tecnológica. Tekhne 25(1), 2022, pp.18-30
- [18] Kumari, N. et al. (2023). Role of Artificial Intelligence in Municipal Solid Waste Management. British Journal of Multidisciplinary And Advanced Studies. VOL. 4 NO. 3 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.105929>
- [19] Shah K.B.;Visalakshi S. Guragain, D.P.; Panigrahi, R. (2024). Advancing smart city sustainability with Internet of Things and artificial intelligence aided low-cost digital twin systems for waste management. Microsystems Technology, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00542-024-05827-4>
- [20] Khan, D.; Samadder, S. (2014). Municipal solid waste management using Geographical Information System aided methods: A mini review.. Waste Management & Research. 2014;32(11):1049-1062.<https://doi.org/10.1177/0734242X14554644>
- [21] Olawade, D.; Fapohunda, O.; Wada, O.; Usman, S. et al. (2024). Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. Waste Management Bulletin. Volume 2, Issue 2, June 2024, Pages 244-263. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.05.001>
- [22] Ferrer, J, Alba, E. (2019) BIN-CT: Urban Waste Collection based on Predicting the Container Fill Level Biosystems Vol. 186, December 2019, 103962. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2019.04.006>
- [23] Kontokosta, C.E.; Hong, B.; Johnson, N. E.; Starobin, D. (2018). Using machine learning and small area estimation to predict building-level municipal solid waste generation in cities. Computers Environment and Urban Systems 70 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.03.004>.
- [24] Bijos, J. et al. (2021). Towards Artificial Intelligence in Urban Waste Management: an early prospect for Latin America. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1196 (2021) 012030 doi:10.1088/1757-899X/1196/1/012030
- [25] Costa, B.; Bernardes, A.; Pereira, J.; Zampa, V.; Pereira, V.; Matos, G.; Soares, E.; Soares, C. and Silva, A. (2018). Artificial Intelligence in Automated Sorting in Trash Recycling. Conference: XV Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional Porto Alegre: SBC pp 198–205
- [26] Arayakandy, A.; Gupta, A. and Thakur, R. (2019). Design and Development of Classification Model for Recyclability Status of Trash Using SVM International. Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET) 7 3, 2146–50. DOI: 10.22214/ijraset.2019.3396
- [27] Bansal, S.; Patel, S.; Shah, I.; Patel, A.; Makwana, J.; Thakker, R. (2019). AGDC: Automatic Garbage Detection and Collection Robotics.

[https://arxiv.org/pdf/1908.05849#:~:text=AGDC%20is%20the%20robotic%20system,microcontr
oller%20controlling%20the%20robotic%20arm](https://arxiv.org/pdf/1908.05849#:~:text=AGDC%20is%20the%20robotic%20system,microcontr%20oll%20controlling%20the%20robotic%20arm)

- [28] Shiraj, T.B. et al. (2024). Sustainable Waste Management System Using Artificial Intelligence and Satellite Communication: A Case Study. 2024 3rd International Conference on Advancement in Electrical and Electronic Engineering, ICAEEE 2024
- [29] Thao, L.Q. (2023). An automated waste management system using artificial intelligence and robotics. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. Volume 25, Issue 6, Pages 3791 - 3800 November 2023
- [30] Sroka, N. (2023). How AI is Revolutionizing Solid Waste Management. Recuperado de: <https://swana.org/news/blog/swana-post/swana-blog/2023/12/11/how-ai-is-revolutionizing-solid-waste-management>
- [31] Statista (2024). Global population and municipal solid waste generation shares in 2018, by select country. <https://www.statista.com/statistics/1026652/population-share-msw-generation-by-select-country/>