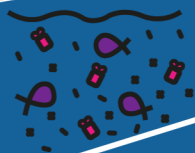


Ingeniería Industrial 360°

Procesos, tecnologías y gestión avanzada de la contaminación industrial



Editor: Óscar Rafael Tinoco Gómez



Ingeniería industrial 360°

Procesos, Tecnologías
y
Gestión Avanzada
de la
Contaminación Industrial

Manuel Enrique Gonzales Aparicio

Betsy Katherine Cambindo Quiñónez

Jessica Gisell Valdivia Cuentas

Domingo Hussein Pacheco Alvaro

Nancy Elizabeth Barreda de Miranda

Nohemy Mirian Canahua Apaza

Mickey Elvis Ayrampo Espinoza

Edgar Jara Acosta

Karenth Elena Ramírez Álvarez

Editor. Óscar Rafael Tinoco Gómez

Ingeniería industrial 360°

Procesos, Tecnologías y Gestión Avanzada de la Contaminación Industrial

Autores:

- © Manuel Enrique Gonzales Aparicio
- © Betsy Katherine Cambindo Quiñónez
- © Jessica Gisell Valdivia Cuentas
- © Domingo Hussein Pacheco Alvaro
- © Nancy Elizabeth Barreda de Miranda
- © Nohemy Mirian Canahua Apaza
- © Mickey Elvis Ayrampo Espinoza
- © Edgar Jara Acosta
- © Karenth Elena Ramírez Álvarez

Editado por :

- © Óscar Rafael Tinoco Gómez
- Calle El Abutillón 3881, Urb. Las Palmeras - Los Olivos. Lima - Perú
otinocog@unmsm.edu.pe

Diagramación de texto, maquetación y diseño:

Carlos Alberto Vega Vidal

Arte y portada

Mariella Soledad Villavicencio Quiñones

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2026-12921

Primera edición digital, octubre 2026

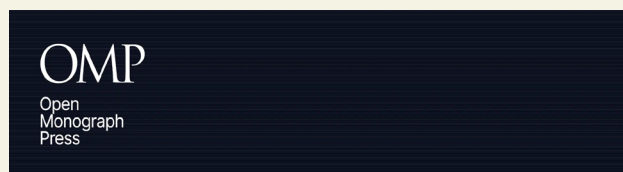
ISBN: 978-612-03-3327-3

Libro electrónico disponible en: [http:// librosctscafe.ctscafe.pe/](http://librosctscafe.ctscafe.pe/)

Contenido

Introducción	6
Capítulo I	7
Gestión de residuos con aplicación de tecnologías emergentes	7
Waste Management with Application of Emerging Technologies	7
Manuel Enrique Gonzales Aparicio Universidad Nacional Mayor de San Marcos Betsy Katherine Cambindo Quiñónez Universidad Nacional Mayor de San Marcos Jessica Gisell Valdivia Cuentas Universidad Nacional Mayor de San Marcos	
Capítulo 2	27
Gestión de procesos textiles bajo un enfoque de sostenibilidad	27
Textile process management under a sustainability approach	27
Domingo Hussein Pacheco Alvaro Universidad Nacional Mayor de San Marcos Nancy Elizabeth Barreda de Miranda Universidad Nacional Mayor de San Marcos Nohemy Mirian Canahua Apaza Universidad Nacional Mayor de San Marcos	
Capítulo 3	44
Economía circular en la industria textil: innovación y sostenibilidad para un futuro responsable	44
Circular economy in the textile industry: innovation and sustainability for a responsible future	44
Mickey Elvis Ayrampo Espinoza Universidad Nacional Mayor de San Marcos Edgar Jara Acosta Universidad Nacional Mayor de San Marcos Karenth Elena Ramírez Álvarez Universidad Nacional Mayor de San Marcos	
Sobre los autores	80

Este libro ha sido sometido a una rigurosa revisión por pares por expertos en el campo por medio del sistema



Agradecemos a los revisores por sus valiosos comentarios y sugerencias, que han contribuido a la calidad final de esta publicación científica

Libro para descarga disponible en <https://librosctscafe.ctscafe.pe/index.php/1>

El arte, el diseño y la tipografía de este libro se han realizado sin el uso de Inteligencia Artificial (IA)

Introducción

En las últimas décadas, la contaminación industrial es un concepto recurrente tanto en la literatura académica y científica como en la prensa cotidiana, asociada a su impacto nocivo en agua, aire y suelo.

La presión social sobre estos impactos genera la formación de opinión en el medio público, el entorno empresarial y en la sociedad civil en su conjunto. Tanto en maestrías como en doctorados se han incrementado el número de tesis asociadas a la gestión que permita dar solución a este flagelo que causa daños inmensos a nuestro planeta. La revisión de literatura especializada en este tema, en idioma español, identifica un vacío que es necesario abordar.

Doctorandos de la cátedra de Gestión y Control de la Contaminación, del doctorado en Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, con perspectiva multidisciplinaria, abordan esta temática, desde la perspectiva del paradigma de Ingeniería Industrial 360^a, el mismo que representa una mirada holística e integral para optimizar sistemas productivos, integrando la gestión de calidad, seguridad y productividad con tecnologías emergentes y sostenibilidad.

Este libro presenta un abordaje multidisciplinario de la gestión y control de la contaminación industrial:

- Gestión de residuos con Aplicación de Tecnologías Emergentes
- Gestión de procesos textiles bajo un enfoque de sostenibilidad
- Economía circular en la industria textil: innovación y sostenibilidad para un futuro responsable

Los autores presentan interesantes casos de estudio que contribuirán al abordaje integral y multidisciplinario de esta problemática.

Dr. Oscar Rafael Tinoco Gómez

Docente Principal UNMSM

Coordinador Grupo de Investigación Producción más Limpia.

Capítulo I

Gestión de residuos con aplicación de tecnologías emergentes

Waste Management with Application of Emerging Technologies

Manuel Enrique Gonzales Aparicio

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Betsy Katherine Cambindo Quinónez

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Jessica Gisell Valdivia Cuentas

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

La acelerada generación de residuos sólidos urbanos e industriales ha evidenciado la insuficiencia de los modelos tradicionales de gestión, demandando enfoques más inteligentes, sostenibles y basados en evidencia. Este capítulo analiza comparativamente la aplicación de tecnologías emergentes —IoT, inteligencia artificial, big data y blockchain— en dos contextos urbanos distintos: el sistema SIGAB en Bogotá (Colombia) y el proyecto Roboat en Ámsterdam (Países Bajos). Mediante una metodología descriptiva-comparativa, se identifican patrones de convergencia tecnológica, impactos operativos y niveles de trazabilidad alcanzados. Los resultados muestran que la integración de estas tecnologías permite optimizar rutas logísticas, reducir emisiones y fortalecer la gobernanza digital. Se concluye que el modelo smart waste management 4.0 ofrece un marco replicable para la modernización de los sistemas de gestión de residuos, especialmente en ciudades que enfrentan desafíos de escala, acceso o infraestructura.

Palabras clave: Gestión inteligente de residuos/ Tecnologías emergentes/ IoT/ IA/ Big data/ Blockchain/ Ciudades sostenibles.

The accelerated generation of urban and industrial solid waste has exposed the limitations of traditional management models, highlighting the need for smarter, more sustainable, and evidence-based approaches. This chapter provides a comparative analysis of the application of emerging technologies—IoT, Artificial Intelligence, Big Data, and Blockchain—in two distinct urban contexts: the SIGAB system in Bogotá (Colombia) and the Roboat project in Amsterdam (Netherlands). Using a descriptive-comparative methodology, the study identifies patterns of technological convergence, operational impacts, and achieved levels

of traceability. The findings indicate that the integration of these technologies enables the optimization of logistics routes, reduction of emissions, and strengthening of digital governance. It is concluded that the Smart Waste Management 4.0 model offers a replicable framework for the modernization of waste management systems, especially in cities facing challenges related to scale, accessibility, or infrastructure.

Keywords: Smart waste management/ Emerging technologies/ IoT/ AI/ Big data/ Blockchain/ Sustainable cities.

Introducción

Tal como exponen Ahmed et al. (2023), la implementación de sensores IoT inteligentes permite optimizar el monitoreo, la recolección y la gestión del ciclo de residuos sólidos urbanos, lo que se traduce en una reducción del 20% de los tiempos de recolección en zonas metropolitanas densas.

En el actual contexto global de crisis ambiental, la gestión de residuos ha adquirido una importancia estratégica para el desarrollo sostenible. Las prácticas tradicionales han resultado insuficientes frente al aumento sostenido de los desechos sólidos urbanos e industriales, impulsado por el crecimiento demográfico, el consumo masivo y la urbanización acelerada.

En respuesta a este desafío, las tecnologías emergentes vinculadas a la industria 4.0 han comenzado a transformar los modelos convencionales de gestión, dando lugar al paradigma de smart waste management 4.0. Este enfoque integra inteligencia artificial (IA), internet de las cosas (IoT), big data y machine learning con el objetivo de optimizar procesos, reducir impactos ambientales y fortalecer la toma de decisiones en tiempo real.

(Olawade et al., 2024) advierte que la complejidad creciente en los sistemas de manejo de residuos exige soluciones tecnológicas innovadoras que superen las limitaciones de los enfoques tradicionales. Tecnologías como el IoT, el big data y el aprendizaje automático permiten mejorar la recolección, clasificación, reciclaje y monitoreo, aunque también presentan desafíos en torno a la calidad de los datos, la privacidad y la sostenibilidad económica.

La gestión de residuos sólidos urbanos e industriales se ha convertido en un desafío determinante en la búsqueda de sostenibilidad ambiental y eficiencia operativa. Diversos autores han destacado que el crecimiento demográfico, el aumento del consumo y la urbanización acelerada generan presiones crecientes sobre los sistemas tradicionales de manejo de residuos.

(Ahmed et al., 2023) destacan el uso de sensores IoT inteligentes para optimizar la recolección y monitoreo de residuos sólidos. Kannan et al. (2024) resaltan la transición

hacia smart waste management 4.0 como un nuevo paradigma en la gestión inteligente e integral de residuos, aplicando tecnologías de industria 4.0 para mejorar la eficiencia en los procesos de las 5R (reducir, reutilizar, reciclar, recuperar y repensar). (Ahmadzadeh et al., 2023) señalan que big data permite anticipar variaciones en la generación de residuos alimentarios, optimizando su reducción. Nesmachnow et al. (2025) argumentan que los sistemas de ciudades inteligentes integran plataformas de residuos con toma de decisiones en tiempo real.

Además, destacan el uso de herramientas computacionales inteligentes para el modelado predictivo, clasificación automatizada, optimización de rutas y mejora de la trazabilidad en sistemas urbanos de residuos, lo cual refuerza el enfoque integral adoptado en el presente capítulo.

Este análisis se sustenta en la literatura reciente sobre herramientas computacionales aplicadas al smart waste management y se enriquece con los hallazgos de (Nesmachnow et al., 2025), quienes sistematizan las tendencias tecnológicas más relevantes en ciudades inteligentes.

En el caso de Roboat en Ámsterdam, se evidencia un modelo operativo de navegación autónoma que puede asociarse al enfoque del generalized vehicle routing problem (GVRP), el cual considera la optimización de rutas a través de clusters, sin necesidad de visitar todos los nodos. Este modelo ha sido ampliamente discutido por Jolfaei et al. (2023) como una solución aplicable a contextos logísticos urbanos donde la eficiencia operativa y la adaptabilidad son prioritarias.

Los hallazgos discutidos en este capítulo se alinean con las tendencias globales identificadas por Nesmachnow et al. (2025), quienes señalan que la combinación de IA, IoT y big data representa el eje más prometedor para el diseño de sistemas de recolección urbanos más eficientes, adaptativos y sostenibles.

Alourani et al. (2025) proponen sistemas inteligentes de clasificación de residuos basados en visión computarizada e inteligencia artificial. (Namoun et al., 2022) validan modelos de predicción de residuos sólidos urbanos usando machine learning con alta precisión.

(Fang et al., 2023) destacan que la inteligencia artificial permite optimizar tanto los procesos de clasificación como de conversión energética de residuos en las ciudades inteligentes, alcanzando una mejora sustancial en los modelos predictivos de manejo de residuos urbanos. Por otro lado Fotovvatikhah et al. (2025) en una revisión sistemática de más de 97 estudios, identifican que los enfoques basados en redes neuronales profundas y visión computacional alcanzan precisiones superiores al 98 % en la clasificación automatizada de residuos, destacando el potencial del aprendizaje profundo y los modelos híbridos en este campo.

A pesar del avance teórico y experimental de estas tecnologías, se requiere mayor evidencia comparada sobre su aplicación en contextos urbanos con características operativas distintas. Este capítulo tiene como propósito analizar y contrastar la implementación de tecnologías emergentes en dos ciudades —Bogotá y Ámsterdam— a fin de identificar patrones, ventajas, desafíos y oportunidades para la gestión inteligente de residuos en entornos urbanos complejos.

Base teórica

La presente sección revisa los principales conceptos y fundamentos relacionados con las tecnologías emergentes y su aplicación en la gestión moderna de residuos. Se abordan diversos enfoques, herramientas tecnológicas y modelos que sustentan el análisis posterior de esta investigación

Tecnologías emergentes aplicadas a la gestión de residuos

En los últimos años, diversas tecnologías emergentes han comenzado a ser aplicadas en los sistemas modernos de gestión de residuos. Estas herramientas permiten optimizar los procesos, mejorar la trazabilidad y reducir los costos operativos. A continuación, se analizan algunas de las principales tecnologías involucradas

Internet de las cosas (IoT) y big data. El internet de las cosas (IoT) ha transformado la forma en que los sistemas de residuos monitorean, controlan y optimizan la recolección de desechos sólidos urbanos. El uso de sensores volumétricos instalados en los contenedores permite obtener información en tiempo real del nivel de llenado, lo que facilita el diseño dinámico de rutas de recolección más eficientes (Ahmed et al., 2023). Estos sensores se comunican con plataformas de control centralizadas, permitiendo minimizar los viajes innecesarios y reduciendo costos operativos y emisiones contaminantes (Morais et al., 2024).

Ehsanifar et al. (2023) proponen un enfoque holístico que combina IoT, IA y aprendizaje automático para hogares inteligentes, logrando eficiencia energética y una clasificación automatizada de residuos domésticos con un 94% de precisión, lo que extiende la gestión de residuos más allá del ámbito municipal.

Por su parte, el big data contribuye al análisis predictivo de la generación de residuos considerando factores socioeconómicos, patrones de consumo, estacionalidad y variables demográficas. Ahmadzadeh et al. (2023) y Alsabt et al. (2024) señalan, que estos modelos incrementan la precisión de la planificación logística, permitiendo anticipar picos de generación de residuos y optimizar los recursos operativos.

Inteligencia artificial para clasificación y logística. La inteligencia artificial (IA) desempeña un papel fundamental tanto en la automatización de la clasificación de residuos como en la optimización logística. Las redes neuronales convolucionales (CNN), aplicadas a sistemas de visión computacional, han logrado tasas de precisión superiores al 98% en la identificación automática de materiales reciclables (Alourani et al., 2025; Fotovvatikhah et al., 2025).

Asimismo, el aprendizaje automático permite predecir la generación de residuos a partir de grandes volúmenes de datos históricos, mejorando la asignación de recursos y la programación de rutas logísticas (Alsabt et al., 2024; Fang et al., 2023; Namoun et al., 2022). Los modelos predictivos basados en machine learning han alcanzado precisiones de hasta el 85% en proyecciones de residuos sólidos urbanos (Alsabt et al., 2024).

Una dimensión logística avanzada de esta aplicación tecnológica está representada por el enfoque del generalized vehicle routing problem (GVRP), que permite optimizar rutas sin necesidad de visitar todos los puntos posibles, agrupando nodos en clústeres. Jolfaei et al., (2023) destacan la utilidad de este modelo en sistemas urbanos complejos, como el caso Roboat en Ámsterdam, donde embarcaciones autónomas operan bajo principios similares, aplicando algoritmos de IA y sensores para rutas fluviales adaptativas

Blockchain y transparencia en la cadena de valor. El blockchain se ha consolidado como una tecnología disruptiva con alto potencial para garantizar la transparencia, trazabilidad y verificación confiable de los flujos de materiales a lo largo de toda la cadena de gestión de residuos (Bułkowska et al. 2024; Gazeau et al., 2024). A través de contratos inteligentes y registros descentralizados, permite automatizar procesos clave como la validación de certificaciones ambientales, la gestión de pagos y la auditoría de cumplimiento regulatorio, fortaleciendo así la rendición de cuentas de los actores involucrados.

Esta tecnología también favorece la interoperabilidad entre plataformas digitales, lo cual reduce los costos administrativos y mejora significativamente el seguimiento de residuos peligrosos, industriales y reciclables de alto valor. De manera particular, Bułkowska et al. (2023) destacan que la incorporación del blockchain en los sistemas de gestión de residuos impulsa la trazabilidad integral de los procesos de recolección, transporte y disposición final, disminuyendo el riesgo de fraude y facilitando la supervisión por parte de entidades fiscalizadoras.

Convergencia tecnológica (IoT + IA + Blockchain + Big data). El verdadero potencial reside en la convergencia de estas tecnologías emergentes. La integración de IoT, IA, big data y blockchain permite el desarrollo de sistemas adaptativos que optimizan integralmente la generación, recolección, clasificación, transporte, valorización y trazabilidad de los residuos (Ahmed et al., 2023; Fang et al., 2023; Morais et al., 2024; Sulistio & S, 2024) . Estos ecosistemas inteligentes ofrecen soluciones escalables,

adaptables a los contextos urbanos complejos, reduciendo la huella ambiental y mejorando la eficiencia de los sistemas de gestión.

Nesmachnow et al. (2025) complementan este enfoque al identificar que los sistemas de gestión de residuos más eficientes en ciudades inteligentes combinan modelos predictivos basados en inteligencia artificial, sensores IoT distribuidos en tiempo real, y plataformas de big data para toma de decisiones automatizadas. Su revisión sistemática destaca que esta convergencia tecnológica no solo incrementa la eficiencia operativa, sino que mejora la trazabilidad y el control ambiental, ofreciendo un marco referencial robusto para el desarrollo del paradigma smart waste management 4.0. Además, Kannan et al. (2024) proponen el marco conceptual 'smart waste management 4.0', destacando la necesidad de integrar tecnologías disruptivas bajo un enfoque sistémico, resiliente y participativo en la gestión de residuos sólidos urbanos.

Economía circular y sostenibilidad industrial

(Afshari et al., 2024) argumentan que la convergencia entre la economía circular y la industria 4.0 impulsan la adopción de tecnologías disruptivas para alcanzar prácticas de gestión de residuos más sostenibles. Su estudio propone un marco teórico que destaca la importancia de modelos de negocio innovadores, el involucramiento de actores clave y la adecuación normativa como factores esenciales para una transición eficaz hacia una economía circular digitalizada. Este enfoque puede potenciar significativamente la eficiencia en el uso de materiales y la trazabilidad en toda la cadena de valor.

El marco de la economía circular busca cerrar los ciclos de materiales mediante la reutilización, el reciclaje y la recuperación de recursos, minimizando la extracción de materias primas vírgenes (Gazeau et al., 2024). Las tecnologías emergentes analizadas permiten maximizar la eficiencia de los flujos de materiales y mejorar la calidad de los productos reciclados, generando valor económico y reduciendo los impactos ambientales (Bułkowska et al., 2024).

Sistemas como SIGAB en Bogotá, por ejemplo, integran información en tiempo real para optimizar políticas públicas, promoviendo la eficiencia operativa y reduciendo externalidades negativas (Minatta & Basani, 2020; Observatory of Public Sector Innovation, n.d.).

Síntesis del marco conceptual

Este modelo integral se encuentra alineado con el marco analítico de Afshari et al. (2024), que propone una sinergia entre economía circular y tecnologías 4.0 como eje estructural para sistemas urbanos de gestión de residuos con alta eficiencia, resiliencia y trazabilidad.

La aplicación conjunta de IoT, IA, big data y blockchain configura un modelo tecnológico integral que transforma la gestión de residuos sólidos hacia esquemas inteligentes, transparentes y sostenibles. Esta convergencia tecnológica permite a los sistemas municipales anticipar la generación de residuos, optimizar recursos logísticos, maximizar la recuperación de materiales y garantizar la trazabilidad a lo largo de todo el ciclo productivo.

Caso de estudio

En esta sección se presentan dos casos reales de aplicación de tecnologías emergentes en la gestión de residuos sólidos, representando escenarios de innovación tanto en América Latina como en Europa. La metodología comparativa permite evaluar resultados, limitaciones y lecciones aprendidas en la implementación de IoT, big data, inteligencia artificial (IA) y blockchain.

Metodología

Este capítulo adopta una metodología de análisis descriptiva-comparativa, orientada a evaluar el grado de implementación y efectividad de tecnologías emergentes en la gestión de residuos sólidos urbanos en dos contextos contrastantes: Bogotá (Colombia) y Ámsterdam (Países Bajos). La selección de los casos se basó en su relevancia tecnológica, diversidad territorial y disponibilidad de evidencia reciente.

La comparación se estructura en torno a cuatro dimensiones analíticas: (1) tecnologías aplicadas, (2) resultados operativos, (3) niveles de trazabilidad alcanzados y (4) escalabilidad del modelo. Se utilizaron fuentes secundarias confiables, incluyendo publicaciones científicas indexadas, informes técnicos y plataformas institucionales especializadas en sostenibilidad urbana.

Este enfoque metodológico permite identificar patrones de convergencia tecnológica, evaluar impactos diferenciados según el entorno de aplicación y extraer aprendizajes replicables para el diseño de sistemas inteligentes de gestión de residuos.

Fuentes y criterios de selección. La selección de los casos de estudio respondió a criterios de diversidad geográfica, madurez tecnológica e innovación documentada. Se priorizó el análisis de experiencias operativas con evidencia sistematizada entre los años 2020 y 2025.

Las fuentes consultadas incluyeron artículos científicos de acceso abierto y con revisión por pares indexados en Scopus y Web of Science (preferentemente en revistas Q1), así como informes técnicos del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el MIT Senseable City Lab, el AMS Institute y observatorios urbanos especializados. Se aplicaron criterios

de inclusión enfocados en estudios empíricos y revisiones sistemáticas que abordaran tecnologías aplicadas a contextos urbanos reales.

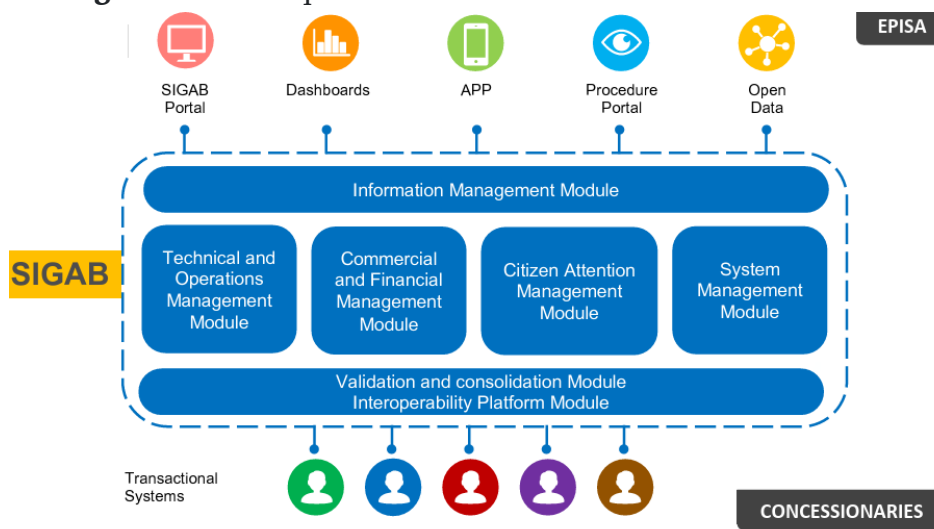
El análisis se desarrolló mediante una revisión documental estructurada, con un enfoque multidimensional, permitiendo evaluar la aplicabilidad de los modelos tecnológicos en función de su contexto operativo. Esta estrategia busca aportar validez analítica y facilitar la replicabilidad en ciudades que enfrentan desafíos similares en materia de sostenibilidad y gestión de residuos.

Caso Bogotá - SIGAB y piloto BID de transformación digital (2023-2024)

El sistema SIGAB, implementado en Bogotá (Colombia), constituye un modelo de referencia en la integración de tecnologías digitales para la optimización de los servicios públicos de limpieza urbana SIGA (Banco Interamericano de Desarrollo, 2024; Observatory of Public Sector Innovation, n.d.). A través de una plataforma centralizada, este sistema gestiona en tiempo real la operación de recolección, la localización de vehículos, la asignación dinámica de rutas y el monitoreo de niveles de llenado de contenedores. La interoperabilidad de sus módulos permite consolidar información financiera, operativa y ambiental, lo que mejora la toma de decisiones por parte de los entes reguladores. Además, incorpora sistemas de trazabilidad mediante códigos QR y monitoreo georreferenciado para garantizar la transparencia del servicio (Minatta & Basani, 2020).

La figura n.º 1 presenta la arquitectura funcional del sistema SIGAB, donde se visualiza la integración de módulos ciudadanos, operativos y financieros bajo una lógica de interoperabilidad digital.

Figura N.º 1: Arquitectura funcional del sistema SIGAB.



Fuente: Imagen tomada de SIGAB – The new waste management scheme of Bogotá: An example of innovation with technology (p. 26), presentación en PowerPoint de UAESP s.f., <https://www.sigab.gov.co>

Adicionalmente, durante el periodo 2023–2024, (Banco Interamericano de Desarrollo, 2024), en alianza con la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y la Alcaldía Mayor, desarrolló un piloto de transformación digital para fortalecer el manejo inteligente de residuos sólidos urbanos. Este piloto incluyó:

- Sensores IoT instalados en contenedores para medir niveles de llenado en tiempo real.
- Plataformas big data para el análisis de patrones de generación de residuos.
- Algoritmos de inteligencia artificial (IA) aplicados a la optimización dinámica de rutas de recolección.
- Blockchain para la trazabilidad integral de las operaciones logísticas.

Los resultados operativos reportados fueron relevantes:

- Reducción del 30 % en la distancia recorrida por los vehículos recolectores.
- Disminución del 10 % en el consumo de combustible y emisiones de CO₂.
- Incremento de 2.5 horas diarias en eficiencia operativa.
- Nivel de trazabilidad superior al 90 %.

Este modelo constituye un referente regional de integración avanzada de tecnologías emergentes aplicadas a sistemas públicos de gestión de residuos urbanos.

Caso Ámsterdam - Proyecto Roboat (Países Bajos, 2020–2024)

El proyecto Roboat, desarrollado en Ámsterdam entre 2016 y 2024, representa una innovación pionera en el uso de embarcaciones autónomas para operaciones logísticas urbanas, particularmente en la recolección de residuos sólidos en entornos fluviales. Esta iniciativa es fruto de una alianza estratégica entre el Massachusetts Institute of Technology (MIT Senseable City Lab) y el Ámsterdam Institute for Advanced Metropolitan Solutions (AMS Institute), con el apoyo de la Ciudad de Ámsterdam, la empresa pública Waternet y la Ciudad de Boston (AMS Institute, n.d.).

Durante los primeros tres años del programa, se desarrollaron y probaron prototipos a escala 1:4 y 1:2, para validar funciones básicas de navegación, detección y maniobrabilidad. En el cuarto trimestre de 2020, se presentó el primer prototipo a escala real, diseñado para operar de forma completamente autónoma en los canales urbanos. Estas embarcaciones utilizan tecnología LiDAR (Laser imaging detection and ranging) para generar mapas tridimensionales del entorno urbano, complementados con visión computarizada, algoritmos de clasificación de objetos, sistemas de control de trayectoria y motores eléctricos silenciosos (AMS Institute, n.d.).

La figura n.º 2 ilustra uno de los módulos desarrollados en el marco del proyecto Roboat, específicamente diseñado para la recolección autónoma de residuos sólidos flotantes en los canales de Ámsterdam.

Figura N.º 2 : Módulo autónomo de recolección de residuos del proyecto Roboat, Ámsterdam.



Fuente: Imagen tomada de AMS Institute. (2024). Roboat: Autonomous Waste Collection Module. <https://www.ams-institute.org/urban-challenges/smart-urban-mobility/roboat/>

La aplicación del sistema roboat a la gestión de residuos se ha enfocado en el desarrollo de contenedores flotantes autónomos, capaces de recolectar residuos sólidos urbanos desde estaciones acuáticas distribuidas estratégicamente. Estas embarcaciones inteligentes pueden programar rutas óptimas en tiempo real, evitar colisiones y ejecutar misiones de recolección y entrega sin intervención humana. Este enfoque ofrece una alternativa eficaz a los métodos tradicionales de recolección terrestre, que resultan ineficientes o inviables en zonas patrimoniales con restricciones de acceso, como el centro histórico de Ámsterdam (Urban Mobility Observatory, 2021)

Además de la logística, roboat también contribuye a la mejora de la separación de residuos en origen. Los prototipos están diseñados para permitir la clasificación a bordo, y podrían integrarse con estrategias municipales de economía circular. La ciudad de Ámsterdam ha identificado esta aplicación como una oportunidad para mejorar significativamente los niveles de recuperación de materiales reciclables, los cuales tradicionalmente han sido bajos debido a la complejidad del sistema de puntos fijos de recolección (AMS Institute, s. f.).

Estudios recientes como el de (Fang et al., 2023) y (Gast et al., 2020) documentan el uso de sensores LiDAR y visión computarizada en roboat, demostrando su alta precisión en entornos urbanos dinámicos.

El proyecto roboat se ha consolidado como una referencia mundial en la aplicación de tecnologías emergentes para la gestión ambiental urbana. No solo ofrece soluciones viables para ciudades construidas sobre cuerpos de agua —como Venecia, Bangkok o Estocolmo—, sino que también representa un modelo escalable de movilidad sostenible e infraestructura dinámica basada en inteligencia artificial, IoT y sistemas ciberfísicos.

El sistema incluye contenedores flotantes con sensores volumétricos que monitorean en tiempo real el nivel de llenado. Cuando se alcanza un umbral preestablecido, el sistema lanza una misión automatizada para que el roboat recoja los residuos y los traslade a centros de acopio descentralizados (Nesmachnow et al., 2025)

Resultados operativos clave:

- Reducción del 40 % en los tiempos de recolección en zonas históricas.
- Disminución del 25 % en emisiones generadas por vehículos recolectores terrestres.
- Mejora de la trazabilidad operativa y planificación mediante dashboards con datos en tiempo real.
- Liberación de espacio en calles y puentes urbanos, favoreciendo la movilidad peatonal.

Este modelo ha sido destacado por su escalabilidad, su capacidad de operar en ciudades patrimoniales con alta restricción vehicular, y por ser una de las primeras implementaciones exitosas de movilidad autónoma fluvial con impacto ambiental positivo en Europa (Fang et al., 2023; Urban Mobility Observatory, 2021).

Tecnologías aplicadas

Además, estudios como el de Li et al. (2025) y (Ramos et al. (2018) y Pereira Ramos et al. (2018) confirman que el uso de algoritmos avanzados para el ruteo inteligente, como los modelos adaptativos VRP y ALNS, mejora significativamente la eficiencia energética y logística de los sistemas urbanos de recolección. Estos enfoques, integrados con IoT y big data, permiten anticipar la demanda operativa y optimizar la asignación de recursos en tiempo real, lo que se traduce en una reducción sustancial de emisiones y costos operativos.

En ambos casos de estudio, la integración de tecnologías emergentes permitió diseñar sistemas de gestión de residuos adaptados a las particularidades de cada contexto urbano. En Bogotá, el uso combinado de IoT, big data, inteligencia artificial y blockchain permitió optimizar rutas terrestres, mejorar la previsión de generación de residuos y asegurar la trazabilidad de las operaciones logísticas. En Ámsterdam, la innovación se centró en la automatización de la recolección acuática mediante embarcaciones autónomas, donde el uso de sensores IoT, algoritmos de optimización ALNS y análisis de big data fueron

claves para el manejo eficiente de los residuos en un entorno fluvial histórico. Aunque ambos sistemas comparten tecnologías base, presentan diferencias en su aplicación operativa según el contexto geográfico y logístico.

Tabla N.º 1: Tecnologías emergentes aplicadas en los casos de Bogotá y Ámsterdam para la gestión inteligente de residuos

Tecnología	Bogotá (Colombia)	Ámsterdam (Países Bajos)
IoT	Sensores volumétricos y GPS en contenedores urbanos	Sensores en contenedores flotantes en canales urbanos
Big data	Plataforma de análisis predictivo de generación de residuos	Dashboards en tiempo real para planificación logística fluvial
IA (Logística)	Algoritmos para rutas dinámicas y optimización diaria	Algoritmo ALNS para planificación autónoma de embarcaciones
Blockchain	Registro inalterable de las operaciones residuales	No implementado en esta etapa

Fuente : La tabla resume las tecnologías emergentes aplicadas en los casos de Bogotá y Ámsterdam. Ambos integran sensores IoT y analítica de datos, pero difieren en su contexto: terrestre en Bogotá y fluvial en Ámsterdam. La IA se aplica a rutas dinámicas en Bogotá y a navegación autónoma en Ámsterdam. Solo Bogotá implementa blockchain para trazabilidad. Adaptado a partir de datos de AMS Institute (s. f.), Urban Mobility Observatory (2021), Banco Interamericano de Desarrollo (2024) y Minatta & Basani (2020).

Resultados comparativos

Los casos analizados muestran mejoras concretas en la eficiencia operativa de los sistemas de gestión de residuos, aunque con diferencias propias de cada contexto y modalidad de intervención. En el caso de Bogotá, se observó una disminución considerable en las distancias recorridas, acompañada de una reducción en el consumo de combustible y en las emisiones generadas por el transporte terrestre. Por su parte, la experiencia de Ámsterdam permitió optimizar significativamente los tiempos de operación mediante la incorporación de embarcaciones autónomas adaptadas a un entorno fluvial de alta complejidad. Respecto a la trazabilidad de las operaciones, Bogotá alcanza niveles superiores gracias a la incorporación de blockchain, tecnología que aún no ha sido implementada en la fase actual del programa piloto desarrollado en Ámsterdam.

Tabla N° 2: Comparación de resultados operacionales obtenidos en los casos de Bogotá y Ámsterdam

Indicador	Bogotá (2024)	Ámsterdam (2023)
Reducción de recorrido (%)	30 %	25 %
Reducción de emisiones (%)	10 %	No reportado
Mejora operativa (horas/día)	+2,5 h	Reducción aproximada de hasta 25% en tiempo operativo según reportes
Nivel de trazabilidad (%)	>90 %	No aplicable en esta fase

Fuente: La tabla compara indicadores operativos reportados en los casos de Bogotá y Ámsterdam tras la aplicación de tecnologías emergentes en la gestión de residuos. Adaptado a partir de datos del Banco Interamericano de Desarrollo (2024), Urban Mobility Observatory (2021) y AMS Institute (s. f.).

Como se ha visto, tanto Bogotá como Ámsterdam han logrado avances importantes al aplicar tecnologías emergentes en sus sistemas de gestión de residuos, aunque con enfoques distintos y adaptados a sus realidades locales. Bogotá apuesta por la trazabilidad y la eficiencia en rutas terrestres, mientras que Ámsterdam innova con soluciones fluviales para una ciudad con restricciones patrimoniales. Estas diferencias no son menores, ya que reflejan cómo la tecnología puede y debe ajustarse a las condiciones del entorno para ser realmente útil. Más allá de los logros técnicos, estos casos nos invitan a pensar en lo que funciona, lo que todavía falta por resolver y lo que se puede aprender cuando se combina innovación, planificación y contexto. Estos hallazgos abren nuevas preguntas: ¿cómo escalar modelos tecnológicos sin perder de vista la diversidad urbana? ¿Qué limitaciones debemos reconocer antes de replicar soluciones? Estas interrogantes serán abordadas en el siguiente capítulo, desde una mirada crítica sobre los aprendizajes reales, los límites encontrados y los desafíos aún pendientes en ciudades que, más que ideales, son complejas, vivas y desiguales.

Discusión

Mensah et al. (2023) critican el uso exclusivo de la tasa de desvío como indicador de eficiencia en la gestión de residuos, proponiendo un enfoque más amplio que combine métricas económicas, ambientales y sociales. Sus hallazgos muestran que algunos aumentos en la inversión o el PIB no se traducen necesariamente en mejoras en la

eficiencia del desvío, lo cual invita a repensar los marcos de evaluación de políticas públicas sobre residuos sólidos urbanos

El análisis comparativo de los casos de Bogotá y Ámsterdam permite identificar patrones comunes y particularidades en la aplicación de tecnologías emergentes para la gestión inteligente de residuos sólidos urbanos.

En ambos contextos, la incorporación de sensores IoT ha resultado fundamental para el monitoreo en tiempo real de los niveles de llenado de los contenedores (Ahmed et al., 2023; Urban Mobility Observatory, 2021). Este componente ha facilitado la transición desde modelos de recolección estáticos hacia esquemas dinámicos de rutas optimizadas que ajustan la frecuencia de los recorridos en función de la demanda operativa real (Morais et al., 2024).

El uso de big data, tanto en la predicción de la generación de residuos (Ahmadzadeh et al., 2023; Alsabt et al., 2024), como en la planificación de rutas adaptativas (Gast et al., 2020) ha permitido anticipar variaciones estacionales y fluctuaciones en la producción de residuos en ambos entornos urbanos. Estos enfoques predictivos han demostrado alta capacidad de adaptación a entornos urbanos dinámicos, maximizando la eficiencia operativa.

En el componente de inteligencia artificial aplicada a la logística, Bogotá ha implementado algoritmos de optimización de rutas diarias en el transporte terrestre (Fang et al., 2023; Namoun et al., 2022), mientras que en Ámsterdam destaca el desarrollo de algoritmos ALNS (Adaptive Large Neighbourhood Search) para la programación dinámica de embarcaciones fluviales (Gast et al., 2020). Ambos casos reflejan cómo los modelos de inteligencia artificial pueden adaptarse a diferentes realidades urbanas, priorizando tanto la eficiencia energética como la reducción de externalidades logísticas.

En cuanto a la trazabilidad, el caso de Bogotá destaca por la incorporación de blockchain para registrar de forma inalterable las operaciones logísticas, garantizando niveles de trazabilidad superiores al 90% (BID, 2024; Minatta & Basani, 2020). Esta tecnología aún no ha sido implementada en Ámsterdam en la fase actual de desarrollo (MIT Senseable City Lab, 2020). El uso de blockchain representa una oportunidad para ampliar los mecanismos de certificación, transparencia y control en la economía circular (Bułkowska et al., 2024; Gazeau et al., 2024).

Desde la perspectiva de resultados operativos, ambos casos presentan mejoras sustantivas en eficiencia: reducción del 30% de recorridos en Bogotá y 25% en Ámsterdam; disminución de emisiones en el caso terrestre; y optimización de tiempos de recolección en el caso acuático (AMS Institute, 2023; Banco Interamericano de Desarrollo, 2024).

Finalmente, estos casos confirman que la integración adaptativa de IoT, Big Data, IA y Blockchain permite desarrollar modelos flexibles de gestión de residuos que responden a las condiciones geográficas, logísticas y regulatorias de cada ciudad (Bułkowska et al.,

2024; Gazeau et al., 2024; Morais et al., 2024; Nesmachnow et al., 2025). Este tipo de convergencia tecnológica representa el núcleo conceptual de los modelos emergentes de Smart Waste Management 4.0, promoviendo la transición hacia sistemas urbanos sostenibles y resilientes.

Ambos casos permiten confirmar que la tecnología, por sí sola, no garantiza un sistema de gestión inteligente de residuos: el entorno institucional, las capacidades locales y la regulación son tan decisivos como el algoritmo más avanzado. En Bogotá, la brecha no está en el sensor, sino en la interoperabilidad entre entidades; en Ámsterdam, el problema no es el robot, sino el marco normativo que aún no lo contempla.

Estas realidades invitan a abandonar una visión tecnodeterminista y abrazar un enfoque más complejo, donde la gobernanza, la inclusión y la sostenibilidad estructuran el verdadero cambio. Este capítulo propone, en ese sentido, una mirada integradora: las tecnologías emergentes deben articularse con los principios de la economía circular urbana y las capacidades adaptativas de cada ciudad. Solo así será posible construir modelos replicables que no solo recojan residuos con eficiencia, sino que construyan entornos urbanos más resilientes, justos y preparados para el futuro.

Conclusiones

El análisis comparado de los casos de Bogotá y Ámsterdam confirma que la convergencia de tecnologías emergentes —particularmente IoT, Big Data, Inteligencia Artificial y Blockchain— constituye el eje transformador de los sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos hacia esquemas adaptativos, eficientes y sostenibles.

En el contexto de Bogotá, la integración multisistémica permitió optimizar las rutas de recolección terrestre, incrementar los niveles de trazabilidad operativa mediante blockchain y reducir significativamente los recorridos logísticos y emisiones asociadas. La incorporación de plataformas Big Data e inteligencia artificial contribuyó adicionalmente a anticipar patrones de generación de residuos, fortaleciendo la planificación operativa bajo entornos urbanos complejos.

Por su parte, la experiencia de Ámsterdam evidencia cómo la automatización fluvial mediante embarcaciones autónomas y algoritmos ALNS constituye una alternativa viable para sistemas urbanos patrimoniales con limitaciones de infraestructura terrestre. El uso intensivo de sensores IoT, el análisis de datos en tiempo real y la optimización logística han demostrado impactos sustantivos en la reducción de tiempos operativos y la racionalización de puntos de acopio en entornos altamente sensibles.

Ambos casos validan el potencial de los modelos inteligentes adaptativos para maximizar la eficiencia operativa, optimizar el uso de recursos logísticos y reducir externalidades ambientales, respetando la singularidad geográfica y regulatoria de cada entorno urbano.

Desde un enfoque sistémico, los hallazgos aquí documentados permiten proponer un marco de transición hacia modelos de Smart Waste Management 4.0, sustentados en la convergencia tecnológica como habilitador de procesos urbanos resilientes y circulares. Este capítulo contribuye al desarrollo de enfoques comparativos para la gestión ambiental urbana, resaltando la necesidad de adaptar soluciones tecnológicas a las condiciones geográficas, institucionales y socioculturales de cada ciudad. Si bien los resultados obtenidos son prometedores, se reconoce la necesidad de profundizar en estudios longitudinales y en aplicaciones en contextos diversos, que permitan validar la escalabilidad y sostenibilidad de estos modelos bajo diferentes condiciones regulatorias y económicas

Recomendaciones

Con base en los hallazgos empíricos y teóricos desarrollados en este capítulo, se proponen las siguientes recomendaciones orientadas a consolidar modelos inteligentes de gestión de residuos sólidos urbanos, adaptados a contextos diversos y con base en evidencia:

Impulsar la cooperación internacional para el escalamiento tecnológico

Es prioritario fortalecer alianzas con organismos multilaterales como el BID, ONUDI o la Comisión Europea, a fin de facilitar la transferencia de conocimiento, la financiación de pilotos tecnológicos y la sistematización de experiencias replicables en ciudades latinoamericanas. Estas alianzas deben orientarse al desarrollo conjunto de estándares interoperables que permitan escalar las buenas prácticas derivadas de los casos de Bogotá y Ámsterdam.

Consolidar plataformas de gobernanza digital interinstitucional

La eficiencia operativa y la trazabilidad ambiental exigen la articulación de sistemas de información que integren dimensiones logísticas, administrativas, regulatorias y ciudadanas. Se recomienda desarrollar plataformas interoperables que combinen IoT, big data y mecanismos de control distribuido, asegurando una gestión transparente y coordinada entre actores públicos y privados. La capacitación de los equipos técnicos municipales será clave para su implementación efectiva.

Integrar las tecnologías emergentes en sistemas urbanos adaptativos

Apesar de los avances logrados, persiste una implementación fragmentada de herramientas digitales. Se sugiere avanzar hacia la convergencia total entre IA, blockchain, IoT y análisis multiescala de datos para lograr sistemas de gestión predictivos y resilientes. En particular, la incorporación de blockchain en plataformas existentes como SIGAB podría reforzar la trazabilidad de residuos peligrosos e industriales, así como la certificación de materiales reciclados en mercados circulares.

Desarrollar marcos normativos proactivos y flexibles

La innovación tecnológica debe ir acompañada de marcos regulatorios que permitan su adopción responsable. Se recomienda diseñar normativa habilitante que contemple el tratamiento ético de los datos, la validación de algoritmos de IA aplicados a servicios públicos, la interoperabilidad entre plataformas y la actualización de estándares de calidad ambiental. Estos marcos deben prever escenarios dinámicos y procesos de aprendizaje institucional progresivo.

Fortalecer los modelos de análisis predictivo multiescala

Para enfrentar entornos urbanos altamente variables, es necesario incorporar modelos de IA que integren variables socioeconómicas, climáticas, demográficas y de movilidad urbana en la planificación operativa. Se recomienda el uso de sistemas de aprendizaje profundo y simulación urbana para anticipar la generación de residuos y optimizar la asignación de recursos en tiempo real.

Diseñar pilotos replicables en ciudades con distintas tipologías

Los modelos analizados en Bogotá y Ámsterdam demuestran que el éxito de la gestión inteligente depende de su adaptación al contexto. Por ello, se sugiere implementar nuevos pilotos en ciudades intermedias, zonas costeras o patrimoniales, donde los desafíos de infraestructura, movilidad o normatividad requieren ajustes técnicos específicos. Estos ensayos permitirán validar la escalabilidad y sostenibilidad de los modelos propuestos.

Estimular líneas de investigación inter y transdisciplinarias de alto impacto

Se propone impulsar agendas académicas que articulen ciencia de datos, ingeniería urbana, administración pública, economía circular y derecho digital. Estas investigaciones pueden enfocarse en temas como: trazabilidad en cadenas circulares, algoritmos adaptativos para gestión de residuos, modelos institucionales de gobernanza digital o impactos socioambientales de la automatización en zonas vulnerables. La articulación con programas de doctorado e innovación pública será clave para consolidar marcos conceptuales integradores y operativos.

Referencias

- Afshari, H., Gurtu, A., & Jaber, M. Y. (2024). Unlocking the potential of solid waste management with circular economy and Industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 195, 110457. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110457>
- Ahmadzadeh, S., Ajmal, T., Ramanathan, R., & Duan, Y. (2023). A Comprehensive Review on Food Waste Reduction Based on IoT and Big Data Technologies. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15043482>

- Ahmed, M. M., Hassanien, E., & Hassanien, A. E. (2023). IoT-based intelligent waste management system. *Neural Computing and Applications*, 35(32), 23551–23579. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08970-7>
- Alourani, A., Ashraf, M. U., & Aloraini, M. (2025). Smart waste management and classification system using advanced IoT and AI technologies. *PeerJ Computer Science*, 11. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2777>
- Alsabt, R., Alkhalidi, 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*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100158>
- AMS Institute. (n.d.). Roboat Project Amsterdam: World's first fleet of autonomous boats.
- AMS Institute. (2023). Annual Report 2022. www.ams-institute.org
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2024). Digital Transformation of Solid Waste Management Waste Collection Innovation, Business Intelligence, and Digital Technologies to Transition Waste Management Towards Circularity in Latin America and the Caribbean. <http://www.iadb.org>. <http://dx.doi.org/10.18235/0013169>
- Bułkowska, K., Zielińska, M., & Bułkowski, M. (2023). Implementation of Blockchain Technology in Waste Management. *Energies*, 16(23), 7742. <https://doi.org/10.3390/en16237742>
- Bułkowska, K., Zielińska, M., & Bułkowski, M. (2024). Blockchain-Based Management of Recyclable Plastic Waste. In *Energies* (Vol. 17, Issue 12). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en17122937>
- Ehsanifar, M., Dekamini, F., Spulbar, C., Birau, R., Khazaei, M., & Bărbăcioru, I. C. (2023). A Sustainable Pattern of Waste Management and Energy Efficiency in Smart Homes Using the Internet of Things (IoT). *Sustainability*, 15(6), 5081. <https://doi.org/10.3390/su15065081>
- Fang, B., Yu, J., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Hamza, E. H., Rooney, D. W., & Yap, P-S. (2023). Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(4), 1959–1989. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01604-3>
- Fotovvatikhah, F., Ahmedy, I., Noor, R. M., & Munir, M. U. (2025). A Systematic Review of AI-Based Techniques for Automated Waste Classification. In *Sensors* (Vol. 25, Issue 10). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/s25103181>

- Gast, T., Atasoy, B., Duarte, F., & Rus, D. (2020). An Adaptive Large Neighbourhood Search for Real-Time Waste Collection Inventory Routing with Autonomous Vessels. <http://www.roboat.org>
- Gazeau, B., Zaman, A., Minunno, R., & Shaikh, F. (2024). Developing Traceability Systems for Effective Circular Economy of Plastic: A Systematic Review and Meta-Analysis. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 16, Issue 22). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su16229973>
- Jinjing Guo. (2024). Tecnología IoT en la gestión de residuos urbanos: Contenedores inteligentes Sistemas. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06738-8>
- Jolfaei, A. A., Alinaghian, M., Bahrami, R., & Tirkolaee, E. B. (2023). Generalized vehicle routing problem: Contemporary trends and research directions. *Heliyon*, 9(12), e22733. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22733>
- Kannan, D., Khademolqorani, S., Janatyan, N., & Alavi, S. (2024). Smart waste management 4.0: The transition from a systematic review to an integrated framework. In *Waste Management* (Vol. 174, pp. 1–14). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.041>
- Li, W., Ng, T. F., Ibrahim, H., & Wang, S. L. (2025). A literature review of the state of the art of sustainable waste collection and vehicle routing problem. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 75(1), 3–26. <https://doi.org/10.1080/10962247.2024.2415298>
- Mensah, D., Karimi, N., Ng, K. T. W., Mahmud, T. S., Tang, Y., & Igoniko, S. (2023). Ranking Canadian waste management system efficiencies using three waste performance indicators. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(17), 51030–51041. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25866-0>
- Minatta, A., & Basani, M. (2020). Innovation in Water, Sanitation, and Solid Waste Assessment, perspectives, and opportunities for Latin America and the Caribbean. <http://www.iadb.org>
- MIT Senseable City Lab. (2020). Roboat II: A Novel Autonomous Surface Vessel for Urban Environments.
- Morais, Ramos, T. R. P., Lopes, M., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2024). A data-driven optimization approach to plan smart waste collection operations. *International Transactions in Operational Research*, 31(4), 2178–2208. <https://doi.org/10.1111/itor.13235>

- Namoun, A., Tufail, A., Khan, M. Y., Alrehaili, A., Syed, T. A., & BenRhouma, O. (2022). Solid Waste Generation and Disposal Using Machine Learning Approaches: A Survey of Solutions and Challenges. In *Sustainability* (Switzerland) (Vol. 14, Issue 20). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su142013578>
- Nesmachnow, S., Rossit, D., & Moreno-Bernal, P. (2025). A Literature Review of Recent Advances on Innovative Computational Tools for Waste Management in Smart Cities. *Urban Science*, 9(1), 16. <https://doi.org/10.3390/urbansci9010016>
- Observatory of Public Sector Innovation. (n.d.). SIGAB – Information system for new waste management model in Bogotá. Retrieved June 16, 2025, from <https://oecd-opsi.org/innovations/sigab-information-system-for-new-waste-management-model-in-bogota/>
- Olawade, D. B., Fapohunda, O., Wada, O. Z., Usman, S. O., Ige, A. O., Ajisafe, O., & Oladapo, B. I. (2024). Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*, 2(2), 244–263. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.05.001>
- Ramos, T. R. P., de Moraes, C. S., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2018). The smart waste collection routing problem: Alternative operational management approaches. *Expert Systems with Applications*, 103, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.03.001>
- Sulistio, B., & S, A. (2024). Effectiveness of Smart Waste Recycling Management Applications. *Journal of Computer Science Application and Engineering (JOSAPEN)*, 2(2), 43–47. <https://doi.org/10.70356/josapen.v2i2.33>
- Urban Mobility Observatory. (2021a). Autonomous boats on the Amsterdam Canals. https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/news-events/news/autonomous-boats-amsterdam-canals-2021-11-18_en
- Urban Mobility Observatory. (2021b). Waste streams: the concept of autonomous waste collection in the Amsterdam canals. https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/news-events/news/autonomous-boats-amsterdam-canals-2021-11-18_en

Sobre los autores

Mg. Manuel Enrique Gonzales Aparicio



Ingeniero industrial, MBA internacional y magíster en Dirección de empresas industriales y de servicios. Actualmente cursa estudios doctorales en ingeniería industrial y es candidato a doctor en administración de negocios. Cuenta con especializaciones en gestión pública, finanzas y supply chain management, además de certificación profesional en contrataciones del Estado. Posee más de veinte años de experiencia en dirección de operaciones, logística y cadena de suministro en los sectores industrial, alimentario y público. Ha ocupado cargos ejecutivos liderando proyectos de optimización productiva, implementación de lean manufacturing y lean 4.0, control de costos, aseguramiento sanitario y cumplimiento normativo en plantas de procesamiento de alimentos, integrando herramientas de mejora continua con tecnologías digitales para fortalecer la eficiencia operativa, la trazabilidad y la competitividad empresarial. Se desempeña como docente universitario en programas de pregrado y posgrado en gestión de procesos, logística e innovación, además de asesorar tesis en ingeniería y administración. Es autor de artículos científicos y capítulos de libro publicados en editoriales académicas con revisión por pares. Sus líneas de investigación se centran en manufactura esbelta, transformación digital, clima organizacional, eficiencia productiva y sostenibilidad en sistemas industriales complejos, con énfasis en la modernización de la industria alimentaria latinoamericana.

Mg. Ing. Betsy Katherine Cambindo Quiñónez



Ingeniera industrial de profesión, con maestría en Sistemas de Gestión de la Calidad con mención en Sistemas Integrados por la Universidad Indoamérica del Ecuador – sede Quito. Experta auditora en sistemas integrados de gestión alineados a las normas ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45001. Actualmente cursando el sexto ciclo del doctorado en Ingeniería Industrial en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Docente con cuatro años de experiencia en la Facultad de Ingenierías de la Universidad Técnica “Luis Vargas Torres” de Esmeraldas, participando en la formación académica de futuros profesionales del área técnica e industrial. Imparte las asignaturas de Gestión de Mantenimiento, Física II y Metodología de la Investigación (UIC).

Mg. Jessica Gisell Valdivia Cuentas



Doctorando en Ingeniería Industrial en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Magister en Dirección de empresas en la Universidad ESAN e ingeniera industrial de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa. Fue directora de la Escuela de Ingeniería Industrial (2020-2023) en la Universidad Católica San Pablo y en la actualidad se viene desempeñando como docente a tiempo completo y dictando cursos relacionados a Gestión y Procesos. Líder del foco de Internacionalización en el Departamento de Ingenierías de la Industria y el

Ambiente, forma parte del comité de calidad de la Escuela de Ingeniería Industrial de dicha universidad, además de poseer una gran experiencia en trabajo de acreditación modelo ICACIT y ABET. Cinética y diseño de reactores y tratamiento de aguas.

Mg. Ing. Domingo Hussein Pacheco Alvaro



Auditor MINTRA | CIP 196890 | Especialista en sistemas de gestión, seguridad y salud en el trabajo y sostenibilidad. Profesional con más de 16 años de experiencia en sectores estratégicos como minería, petróleo, construcción, manufactura y educación superior. Especialista en sistemas integrados de gestión, mejora continua, sostenibilidad, lean six sigma y seguridad ocupacional, con una sólida trayectoria en auditorías legales, implementación de normas internacionales (ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001, ISO 50001, ISO 37001, BASC,

GRS) y gestión por procesos. Ha liderado proyectos de certificación, optimización operativa y reducción de impactos ambientales, integrando herramientas estadísticas y enfoques de economía circular.

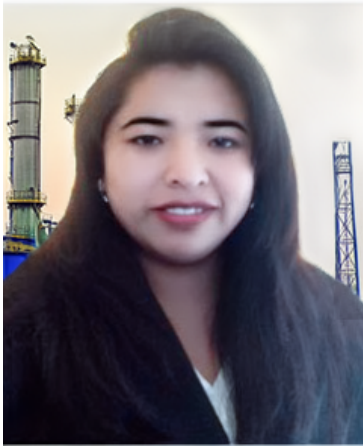
Mg. Ing. Nancy Elizabeth Barreda de Miranda



Ingeniera química de FQIQ-UNMSM. Profesional con 20 años de experiencia en la industria textil exportadora, como jefa de laboratorio textil y de planta de tintorería. Docente investigadora (cátedra) de la EPITC-FII-UNMSM. Docente de maestría en la FII-UNMSM. Con estudios de doctorado en Ingeniería industrial en FII-UNMSM. Coordinadora de laboratorio de fibrología y procesos textiles de EPITC.

Ha realizado pasantías en la Universidad de Texas USA 2009, Universidad Carolina del Norte al College de Textiles, USA 2009, Universidad Sao Paulo, Brasil 2017 y Universidad Bolivariana Medellín Colombia.

Mg. Ing. Nohemy Miriam Canahua Apaza



Ingeniera industrial por la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas - UPC, con grado de magíster en Ingeniería Industrial concedido por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – UNMSM Con más de 12 años de experiencia en rubros tales como: Diseño de programas de actividades de fiscalización en el sector público. reingeniería de procesos y diseño de manuales de organización de funciones para empresas financieras; planeamiento y análisis de actividades en organizaciones de mantenimiento para empresas mineras; organización y administración de actividades logísticas para el sector privado. Experiencia en el planeamiento, diseño e implementación de programas de actividades para obtener certificaciones ISO 14001 y OHSAS 18001. Actualmente cursa estudios de doctorado en Ingeniería Industrial, se desempeña como catedrática universitaria en programas de pregrado en gestión de la innovación, logística, procesos, cadena de suministros, gestión de proyectos, asesora de tesis en ingeniería y grupos de investigación, autora de artículos científicos publicados en revistas indexadas en Scopus y SciELO

Mg. Ing. Mickey Elvis Ayrampo Espinoza



Gerente general del Instituto de Innovación en Gestión Estratégica y Sostenible S.A.C. evaluador del Premio Nacional a la Calidad, y de 5S Kaizen; auditor SST por el MTPE (RD N° 73-2018) y auditor ISO. Ha sido gerente de control de calidad, jefe de seguridad e higiene ocupacional, física patrimonial, ambiental, aseguramiento de calidad, sistema integrado de gestión y optimización; con más de 25 años de experiencia en los sectores industrial y servicios de: agua potable y alcantarillado, textil, construcción modular, agro industrial, azucarero, pesquero, plásticos, metal mecánica, servicios, educación, minero, energía, security y laboratorio. Doctorando en ingeniería industrial [UNMSM]; magíster en Gestión Integrada en Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente [UNMSM]. Ingeniero industrial colegiado [UNAC]. Diplomado en Prevención de Riesgos Laborales y Diseño Organizacional (ESAN) Becado en la especialización de “The Program on Quality Management” [AOTS] Japón 2006. y “The Training Course on Practical Solution of Quality Related Problems” [AOTS] Japón 2004. realizando visitas técnicas de estudio en TOYOTA; KOKUSAN DENKI; SUMITOMO; GC FUJI OYAMA FACTORY, DAINIPPON; SHARP ELECTRIC; KOMATSU. Estudios y conferencista en QHSE en Italia, Brasil, México, España, Colombia, Chile, Ecuador y Cuba. Visitó la empresa FPT Industrial en Turín Italia: Motores para vehículos industriales. Docente de pre y posgrado en universidades. asesor y jurado de tesis de maestrías en la UNI Escuela de Ingeniería Ambiental.

Mg. Ing. Edgar Jara Acosta



Ingeniero industrial y magíster en Administración de Negocios (MBA) por la Pontificia Universidad Católica del Perú, candidato a doctor en ingeniería industrial por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Cuenta con especializaciones en Dirección de Marketing por la Universidad del Pacífico, en Habilidades Directivas por la Universidad Complutense de Madrid (España) y en Calidad y Evaluación Universitaria por la Universidad Internacional de La Rioja. Profesional con amplia trayectoria en el ámbito industrial, empresarial y académico. En el sector empresarial, ha desempeñado funciones en organizaciones como

Embotelladora Latinoamericana S.A. - Coca Cola y Confiperú S.A. perteneciente al Grupo Confiteca. En el ámbito académico, ha ejercido como docente universitario en la PUCP, UPN, Continental, además de haber ocupado cargos directivos en diversas universidades (Universidad Privada del Norte, Universidad Tecnológica del Perú, Universidad Peruana Cayetano Heredia y Universidad Continental) con responsabilidades de diseño, implementación curricular y gestión estratégica universitaria.

Mg. Ing. Karenth Elena Ramírez Alvarez



Ingeniero químico de profesión, con maestría en Ingeniería Ambiental y Desarrollo Sustentable de la Pontificia Universidad Católica Argentina – sede Rosario, cursando el 6to ciclo del doctorado en Ingeniería Industrial en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Docente con 9 años de experiencia en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana -UNAP, en el departamento académico de ingeniería química. Docente de los cursos de Ingeniería en Gestión Industrial, Cinética y Diseño de Reactores y Tratamiento de aguas.

DIBUJO Y ARTE DE LA PORTADA : *MARIELLA SOLEDAD VILLAVICENCIO QUIÑONES*
DISEÑO DE PORTADA: *CARLOS ALBERTO VEGA VIDAL*

ISBN: 978-612-03-3327-3

