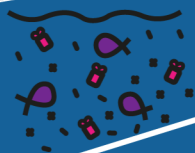


Ingeniería Industrial 360°

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

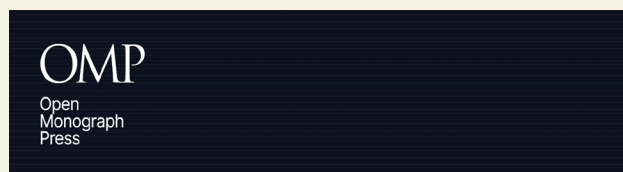
ISBN: 978-612-03-3327-3

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.

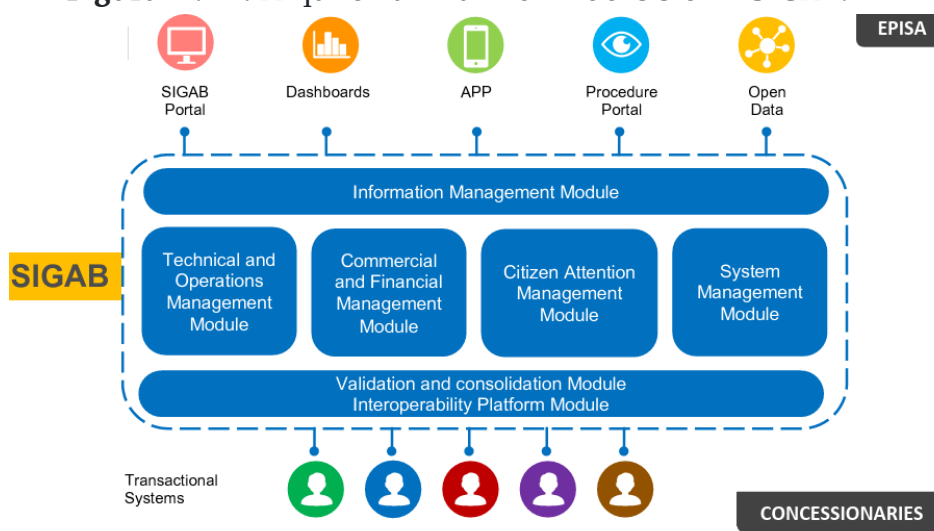
El análisis se desarrolló mediante una revisión documental estructurada, con un enfoque multidimensional, permitiendo evaluar la aplicabilidad de los modelos tecnológicos en función de su contexto operativo. Esta estrategia busca aportar validez analítica y facilitar la replicabilidad en ciudades que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

Capítulo 2

Gestión de procesos textiles bajo un enfoque de sostenibilidad

Textile process management under a sustainability approach

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

En este capítulo se analiza y presenta el control de los factores de producción insumos, aditivos químicos, máquinas, las variables de proceso etc. en todas las etapas de fabricación de hilo filamento reciclado, determina en gran medida la obtención de un filamento reciclado para uso textil de alto valor agregado y con sostenibilidad para el medio ambiente y la economía circular

Palabras clave: Gestión/ Procesos textiles/ Sostenibilidad.

This chapter analyzes and presents how the control of production factors—inputs, chemical additives, machinery, process variables, etc.—at all stages of recycled filament yarn manufacturing largely determines the production of a high value-added recycled filament for textile use that is sustainable for the environment and the circular economy.

Keywords: Management/ Textile processes/ Sustainability.

Introducción

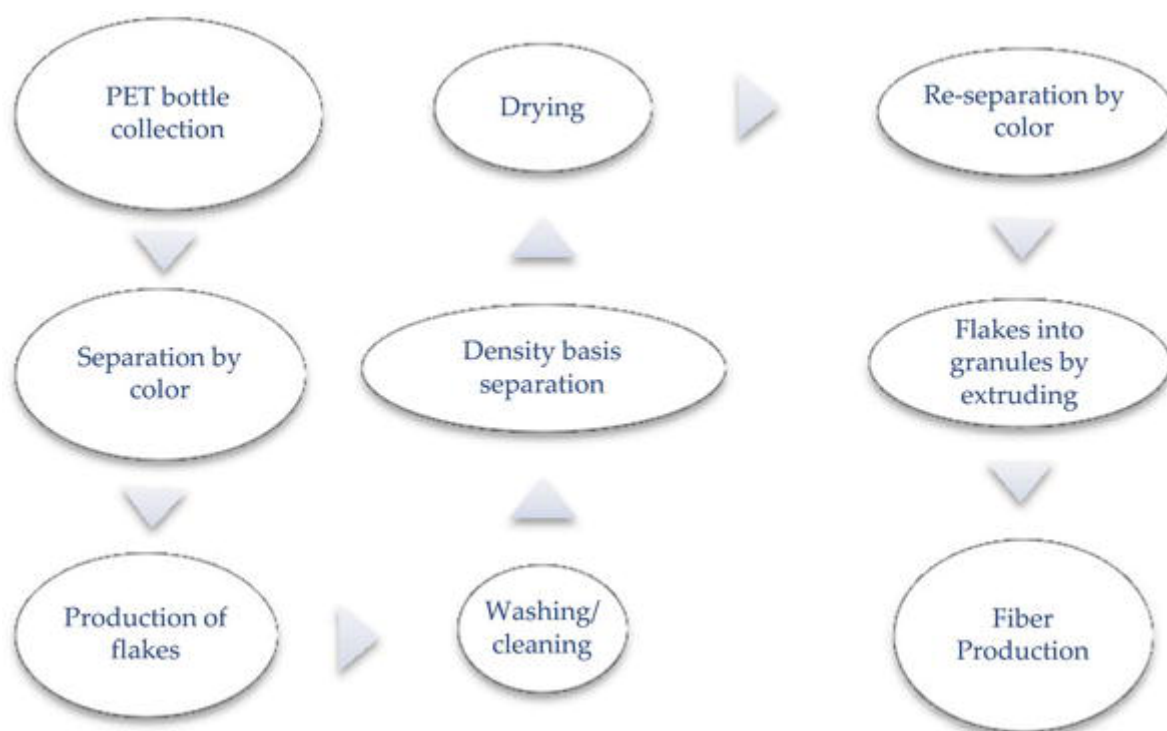
El desarrollo de las economías en muchos países aún está ligado a la economía lineal junto con el crecimiento poblacional y un mundo mucho más industrializado; tienen como consecuencia impactos ambientales en la generación de residuos, los cuales año tras año van incrementado su presencia (Sarioğlu & Kaynak, 2018).

El plástico al no ser biodegradable no puede ser simplemente enterrado bajo tierra y el reciclaje de este material es un tema importante para el cuidado del ambiente debido a que una botella de plástico puede tener una duración aproximadamente de 450 años y junto con el incremento del uso de los plásticos para la mayoría de las industrias adicionando una gestión deficiente para su eliminación, esto no solo produce un daño al ambiente sino también un daño colateral a muchas especies animales (incluida la humana) como la aparición de enfermedades y trastornos (Simon & Milad, 2019).

Tereftalato de polietileno (PET) es un plástico que pertenece al grupo de los poliésteres teniendo un alto potencial de reciclabilidad (siendo el más reciclado en el mundo con respecto a los plásticos) entre otras ventajas como ligereza, resistencia entre otros. Los materiales obtenidos a través del PET son considerados productos ecológicos siendo utilizados en textiles para la obtención de fibras (Sarioğlu & Kaynak, 2018).

En la figura n.º 1 “Bottle-to-fiber recycling se representa el flujo para la obtención de hilo PES desde la obtención de las botellas recicladas

Figura N.º 1: Ciclo de reciclaje desde la botella hasta la fibra



Fuente: Sarioğlu & Kaynak (2018)

Objetivo general del capítulo

Gestionar el análisis de la situación actual y la descripción del proceso productivo para la generación de hilo PES desde la obtención de botellas recicladas PET.

Objetivo específico del capítulo

- Presentar la situación actual de la generación de hilo PES desde la obtención de botellas PET recicladas
- Describir el proceso productivo del ciclo de reciclaje de las botellas recicladas PET hasta la obtención del hilo PET.

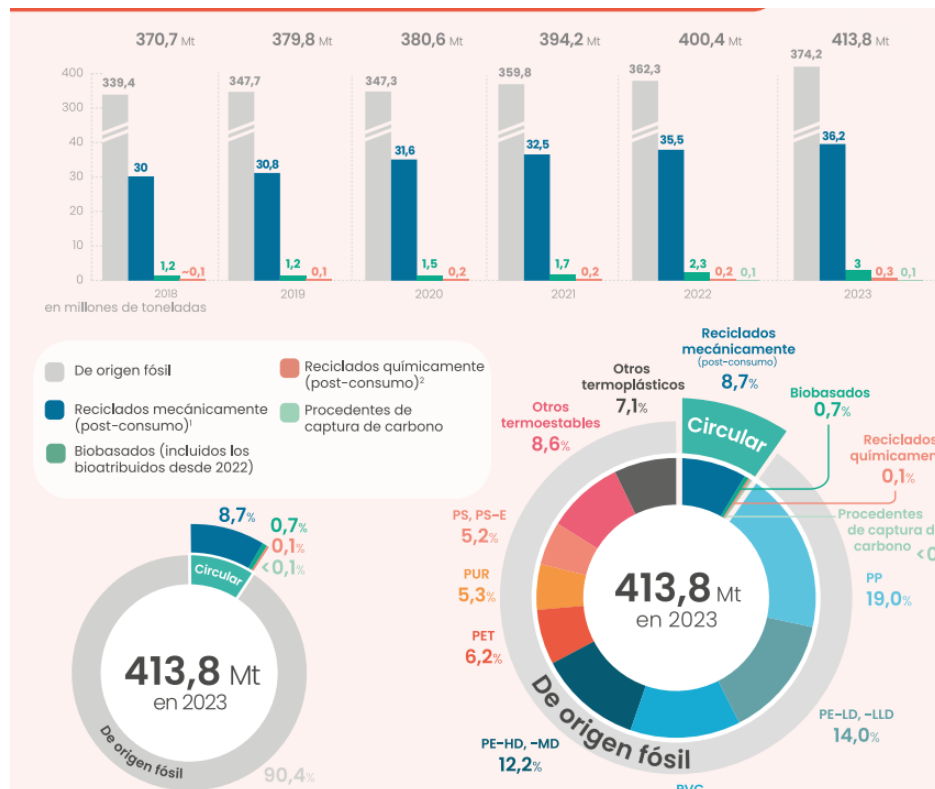
Metodología

Parte 1: Recolección y transformación del PET post-consumo (botellas)

Producción mundial de plásticos:

Plastics Europe (2024) la producción mundial del plásticos para el año 2023 fue de 413.8 millones de toneladas, siendo 13.4 mt. más con respecto al año 2022, lo cual representa un incremento del 3.35%; de los cuales solamente el 8.70% son representados por plásticos circulares (la diferencia corresponde a plásticos de origen fósil) y con relación a los plásticos PET estos representan el 6.20%.

Figura N.º 2: Producción mundial de plásticos 2023



Fuente: Plastics Europe (2024)

Fuentes comunes de PET post-consumo:

Según Luna Ramos (2024) el PET es el tipo de plástico con mayor utilización y también el que más potencial tiene a ser reciclado de una forma simple, al ser simple dicha forma esta se vuelve compleja por la cantidad de actividades que requieren trabajo arduo.

Las botellas PET que serán consideradas para la elaboración de hilo PET son las que hayan contenido:

- Agua
- Agua mineral
- Gaseosas
- Refrescos

Imagen N.º 1: Tipos de botellas PET



Fuente: Ingeniería Química Reviews (2020).

Para poder elaborar el hilo a base de botellas PET recicladas se requiere:

- 250 ml
- 600 ml
- 1500 ml
- 2500 ml
- 3000 ml

Dichas botellas no deben contener:

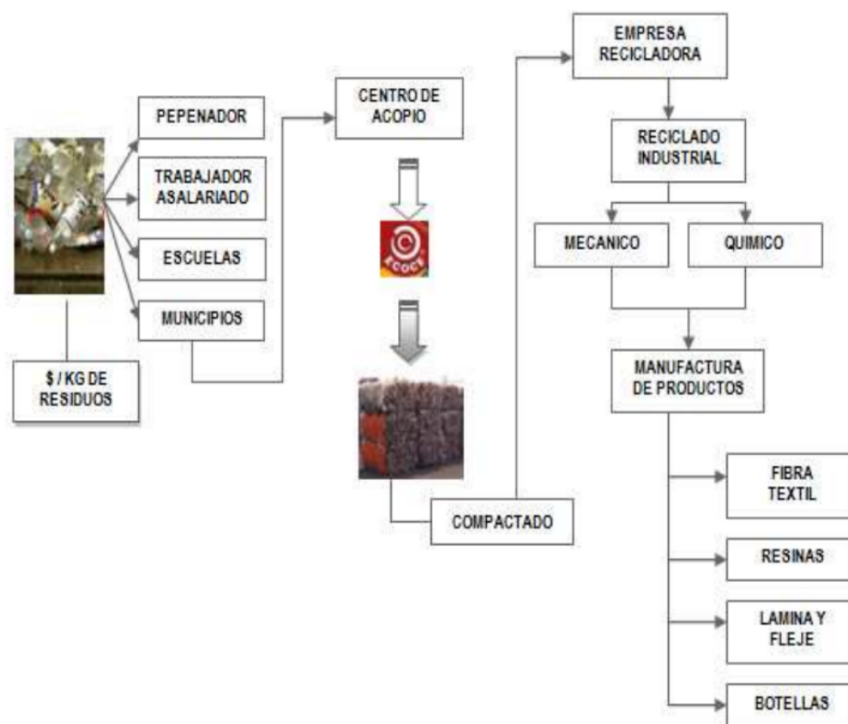
- Tapa de polipropileno
- Etiqueta de polipropileno
- Ningún producto químico

Clasificación y separación de botellas:

El proceso de recolección de botellas PET cuenta con un gran aliado, los cuales son los recicladores locales, quienes realizan la primera fase de captación de botellas PET para su almacenamiento, ellos tienen convenios con empresas para que les faciliten dichos productos, sin embargo muchos de ellos buscan y recolectan las botellas PET dentro de los contenedores de residuos (debemos tener en cuenta que esta actividad debe realizarse en contenedores asignados solamente a plásticos, el obtener botellas PET de residuos contaminados por otros presentaría el riesgo de contaminación).

Los recicladores venden los plásticos recolectados a centros de acopio que son los responsables del compactado de las botellas (previa clasificación por colores y tipo de botella PET) para posteriormente pasar al molido cuyo producto final son las escamas PET, estas finalmente son lavadas y previamente inspeccionadas a fin de no encontrar otro tipo de restos que puedan contaminar las escamas PET.

Figura N.º 3: Proceso de recolección y reciclaje del PET



Fuente: Flores (2012), citado en Luna Ramos (2024).

Lavado, triturado y obtención de escamas:

Las botellas se lavan y trituran para obtener escamas limpias, que luego se usan como materia prima (Chen et al., 2021). La limpieza garantiza calidad en el producto final.

Relevancia de la trazabilidad y sostenibilidad en esta etapa:

La trazabilidad asegura que el PET usado cumpla estándares ambientales. Hoy se usan tecnologías como blockchain para validar este proceso (Zhao et al., 2022).

Indicadores ambientales de mejora (agua, energía, residuos):

El reciclaje de PET consume menos agua y energía que el poliéster virgen, y reduce emisiones hasta en un 60% (Textile Exchange, 2023).

Parte 2: Extrusión y obtención de filamento reciclado (PET reciclado)

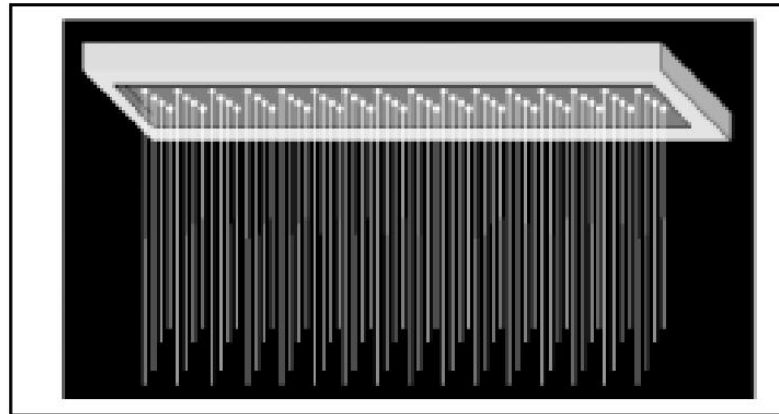
Fusión y filtrado de las escamas PET

Consiste en fundir las escamas de plástico para producir fibra de poliéster 100% reciclada. La estructura química del PET consiste en una unidad repetitiva del éster de Tereftalato de etileno para formar el polímero en su punto de fusión de 260°C, el PET es lo suficientemente flexible como para cambiar su forma física sin degradar su cadena polimérica ni comprometer su composición química.

Procesos de extrusión: chips de PET reciclado y filamento

Las escamas puras y secas se vierten en una extrusora, que funde el plástico hasta convertirlo en un líquido viscoso y lo empuja a través de una hilera figura n.º 4. La hilera alberga una placa de matriz similar a un cabezal de ducha, que estira el poliéster fundido reciclado en filamento. El estirado o alargamiento aumenta la cristalinidad y distribución interna ordenada, reduce el diámetro (disminuyendo por consiguiente el título o denier) y agrupa las moléculas juntándolas más. La cristalinidad y orientación se relaciona con propiedades físicas de la fibra. La resistencia a la abrasión, la elongación, la absorción de humedad, así como la receptividad de la fibra a los colorantes son algunas de esas propiedades. Miles de estos filamentos extruidos se unen para formar un hilo de poliéster esponjoso. El hilo se enrolla y se envía para su posterior procesamiento.

Figura N.º 4: Hilera con capilares, donde pasan los filamentos



Fuente: elaboración propia

Tecnología involucrada: maquinaria y eficiencia energética

Se presenta el diseño de modelo ProLab, para la obtención de filamento de poliéster, a partir de PET reciclado.

El proceso de recuperación mecánico del PET se divide en dos fases. La primera fase es el proceso de producción de escamas PET reciclado y la segunda fase es el proceso de transformación de residuos PET reciclado en hilos filamentos PET reciclado.

Primera fase: Proceso de producción de escama PET reciclado

En la línea de producción de PET reciclado se cuentan con tres máquinas: La máquina de lavado y trituradora en la figura n.º 5.

La máquina secadora de escama PET reciclado en la figura n.º 6

La máquina de zaranda vibratoria, para separar los pellets o escamas que pasaran al siguiente proceso en la figura n.º 7.

Figura N.º 5: Máquina lavadora de plástico y trituradora.



Fuente: elaboración propia

Figura N.º 6: Máquina de secado de escama PET



Fuente: elaboración propia

Figura N.º 7: Máquina zaranda vibratoria



Fuente: elaboración propia

Segunda fase: Proceso de transformación de residuos PET reciclado en hilos filamentos PET reciclado

En la línea de producción se cuenta con dos máquinas: línea de extrusión presentada en la figura n.º 8 y la máquina texturizadora (ovilladora) presentada en la figura n.º 9.

Figura N.º 8: Línea de extrusión



Fuente: elaboración propia

Figura N.º 9: Máquina texturizadora (ovilladora)



Fuente: elaboración propia

Eficiencia energética

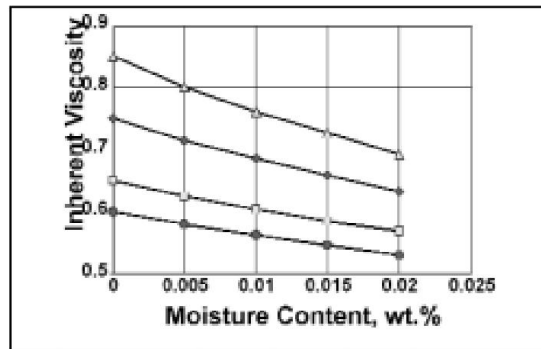
El reciclaje de PET tiene una reducción de consumo de energía 76% comparado con el PET virgen.

Control de calidad del PET reciclado (parámetros físicos y químicos)

Para la obtención de filamento PET reciclado para uso textil de alto valor agregado se tiene que tener en cuenta las propiedades del filamento como alta tenacidad, elongación, módulo inicial, tacto suave. La uniformidad de las propiedades en todos los filamentos como el denier/filamento y la orientación molecular (cristalinidad)/filamento.

Las escamas o pellets cuando no están completamente secos, antes de entrar en la extrusora, la reacción del agua y el polímero es instantánea, el PET es higroscópico. En la figura n.º 9 se muestra la absorción de humedad por el polímero y la viscosidad inherente del polímero. Una disminución de 0,05 en viscosidad inherente da como resultado una disminución de la viscosidad de la fusión del 50%, de modo que cada disminución de 0.01 en la viscosidad inherente tiene el efecto sobre la viscosidad de la fusión como un aumento de la temperatura de 4°C.

Figura N.º 10: Procesamiento por fusión de polímero PET - Degradación del PET en función del contenido de humedad.



Fuente: elaboración propia

En la fabricación del PET reciclado, se tiene que tener en cuenta las condiciones óptimas del proceso como: la viscosidad intrínseca del polímero, la viscosidad de fusión del polímero, presión, temperatura, tiempo, caudal volumétrico, velocidad de extrusión etc. entre las principales variables en el proceso de extrusión.

Las fibras recién hiladas tienen alta extensibilidad, baja resistencia y baja orientación molecular en comparación con las fibras estiradas. El estiraje genera alta resistencia y alta orientación molecular (cristalinidad) importante para las propiedades de tracción, el porcentaje de elongación y el módulo inicial. Las variaciones en el estiraje genera variaciones en la orientación molecular (cristalinidad) de filamento a filamento y a lo largo de cada filamento, entre las principales variables en el proceso de estiraje. Se mide diámetro, birrefringencia y denier/filamento.

Parámetros físicos

- Diámetro, se mide el diámetro de un filamento, con un microscopio con software que le permite realizar mediciones, etc..
- Birrefringencia, mide la orientación molecular (cristalinidad).
- Denier/filamento, mide la masa en gramos en 9000 metros de filamento.
- Tenacidad, mide la resistencia en gramo-fuerza por denier del filamento.
- Elongación, mide el alargamiento de longitud del filamento, antes de romperse. Varía en seco o húmedo.
- Retracción residual, mide la deformación permanente que queda en un polímero, después que se ha eliminado la carga o tensión aplicada.

Parámetros químicos

Viscosidad inherente o intrínseca, se refiere a la medida de la resistencia del polímero a fluir en disolución, lo que está relacionado con su peso molecular y estructura química.

Viscosidad de fundido, se refiere a la resistencia del polímero fundido a fluir cuando se encuentra en estado líquido. El flujo a través de cada capilar en la hilera, depende inversamente de la fusión del polímero.

Índice de fluidez. Medir (denier) / filamento. Denier es la masa en gramos de un filamento en 9000 metros de longitud.

Reducción de huella de carbono en esta etapa

El impacto en la industria del plástico que consiste en la producción, el uso y la eliminación de plásticos, actualmente representa aproximadamente el 3,4 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI); se prevé que esta cifra aumente al 19% del presupuesto mundial de carbono para el 2040, según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, tanto la conversión de combustibles fósiles en aditivos y resinas plásticas, como la incineración de plásticos después de su eliminación, dan lugar a la liberación al aire de sustancias altamente tóxicas, como dioxinas, furanos, mercurio y PCB, que lo contaminan. Otra ramificación ambiental perjudicial es que la producción de plásticos se considera de alto impacto debido a su fuerte dependencia de los combustibles fósiles, un recurso no renovable, lo que impide el desarrollo global.

Datos de impacto de energía

Los datos de impacto de energía agua y equivalente de CO₂ asociados con la producción de un kg de PET virgen y de un kg de PET reciclado, junto con la reducción porcentual en cada uno de los tres impactos que se monitorearon al usar el PET reciclado sobre el PET virgen. La empresa utiliza un 20% menos de agua y el 80% restante se recicla y reutiliza durante el proceso de producción, lo que hace que el ahorro total de agua sea superior al 20% para la formación de escamas de PET. Toda la operación desde el plástico hasta la tela de poliéster reciclado, utiliza un 90% menos de agua que el poliéster fabricado con materiales novedosos. Un kg de plástico reciclado consume un 76% menos de energía en comparación con la producción de PET virgen. Tabla n.º 1.

Tabla N.º1: Datos de impacto de PET virgen comparados con PET reciclado

Impactos por Kg	Virgen	Reciclado	Aceite a la prenda Proceso	% Reducción
Consumo de energía	61.4 MJ	14.8 MJ	125 MJ	76%
Consumo de agua	10 litros	< 8.0 litros Θ	30.0 litros	> 20%, 90%
Emisiones de CO ₂ -eq	2.15 kg	0.45 kg	14.2 kg	79%

Fuente: elaboración propia

Θ Estos 8.0 litros se reciclan y reutilizan, por lo que el consumo total es inferior al 20% del de PET virgen.

Parte 3: Hilatura del filamento rPET y aplicación textil

Procesos de hilatura: texturizado y bobinado

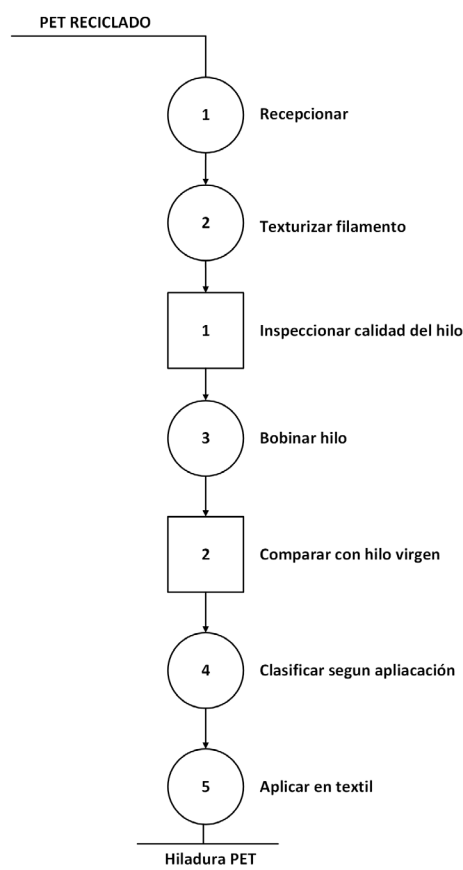
El proceso de texturizado transforma filamentos lisos de PET en hilos con mayor volumen, elasticidad y capacidad de absorción, mediante calor y tensión mecánica. Este proceso es esencial para mejorar el comportamiento del hilo en aplicaciones textiles como ropa deportiva o tapicería (El Darai, Ter-Halle, Blanzat, & Sartor, 2024). El bobinado, por su parte, es la etapa final de la hilatura, donde los filamentos se enrollan en bobinas con tensión controlada, lo que facilita su uso posterior en procesos de tejido o confección (Despras et al., 2024)

Diagrama de operaciones del proceso (DOP)

El siguiente diagrama representa el flujo del proceso de hilatura del PET reciclado.

Figura N.º11: Flujo del proceso de hilatura del PET reciclado.

DOP DEL PROCESO DE HILATADURA DEL PET RECICLADO



Fuente: elaboración propia

Propiedades del hilo de PET reciclado vs. PET virgen

El hilo de PET reciclado (rPET) presenta una ligera disminución en propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción y la elongación, debido a la degradación térmica durante el reciclaje (El Darai et al., 2024). Sin embargo, estas diferencias pueden mitigarse mediante mezclas con PET virgen o mediante reciclaje químico avanzado (Franceschi et al., 2024). Entre las ventajas del rPET se encuentran la reducción de emisiones de CO₂, menor consumo de agua y energía, y su contribución a la economía circular. Las desventajas incluyen la variabilidad en la calidad del material y la posible presencia de contaminantes si no se controla adecuadamente el proceso.

Resultados

Aplicaciones comunes en la industria textil

El PET reciclado se utiliza ampliamente en la industria textil, especialmente en ropa deportiva y casual, por su resistencia y ligereza; en tapicería y textiles para el hogar, como alfombras y cortinas y en accesorios y calzado, gracias a su versatilidad (El Darai et al., 2024; Cassel et al., 2024). Estas aplicaciones permiten sustituir fibras vírgenes sin comprometer la funcionalidad del producto final.

Certificaciones y estándares sostenibles

Para garantizar la trazabilidad y sostenibilidad del PET reciclado, existen certificaciones como Global Recycled Standard (GRS), que verifica el contenido reciclado y las prácticas responsables en la cadena de suministro, y OEKO-TEX Standard 100, que asegura que los productos textiles no contienen sustancias nocivas para la salud humana (El Darai et al., 2024; Garrigues et al., 2024). Estas certificaciones son fundamentales para acceder a mercados internacionales y generar confianza en los consumidores.

Perspectivas de mejora continua y economía circular

El PET reciclado es clave en la transición hacia una economía circular. Las mejoras futuras incluyen el reciclaje químico mediante procesos como la glicólisis o la hidrólisis, que permiten recuperar monómeros de alta pureza; la automatización en la clasificación de residuos textiles para mejorar la eficiencia del reciclaje y el diseño para el reciclaje, promoviendo productos textiles más fáciles de desensamblar (El Darai et al., 2024; Déjournat et al., 2024). Estas estrategias buscan cerrar el ciclo de vida del producto y reducir el impacto ambiental de la industria textil.

Conclusiones

- El control de los factores de producción insumos, aditivos químicos, máquinas, las variables de proceso etc. en todas las etapas de fabricación de hilo filamento reciclado, determina en gran medida la obtención de un filamento reciclado para uso textil de alto valor agregado.
- Dependiendo de la especificación de calidad del filamento PET reciclado, se adaptan las especificaciones del proceso, como son temperatura de operación, presión, caudal o flujo, temperatura de secado, aditivos químicos, antibacterial, antiestático, porcentaje máximo de humedad del PET.
- Las propiedades de calidad del filamento como tenacidad, elongación, retracción residual, denier etc. son uniformes en toda la producción de lote a lote de filamento PET reciclado y contribuye a la cadena de valor de telas y prendas.

Referencias

- Benjamin Piribauer, Andreas Bartl (2019) Textile recycling state of the art and current developments: A mini review_ Sage Journals [https:// journals.sagepub.com](https://journals.sagepub.com)
- Laura Mansilla Pérez, Marcos Ruiz Ruiz (2009) Reciclaje de botellas de PET para obtener fibra de poliester. Ingeniería Industrial n° 27, 2009, pp. 123-137
- Teresa Massoud, Jacinta Dsilva (2024) Cerrando el ciclo del reciclaje de plástico PET: una transformación sostenible del plástico a la fibra. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100095>
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2020). Plastics recycling: challenges and opportunities. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 364(1526), 2115-2126.
- PlasticsEurope. (2024). Plastics - the Facts 2024. <https://plasticseurope.org>
- Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K. (2019). Present and future development in plastics from biomass. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 13(2), 445-459.
- UNEP (2021). From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution.
- Textile Exchange. (2023). Preferred Fiber and Materials Market Report 2023. [https:// textileexchange.org](https://textileexchange.org)
- Zhao, H., Yang, X., & Lin, Q. (2022). Blockchain technology for sustainable supply chains: A review. Sustainable Production and Consumption, 30, 631-644.
- Luna Ramos, J. I. (2024). Desarrollo de un sistema de acondicionamiento de señal para determinar elementos en un sistema de clasificación para botellas PET post-consumo [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Querétaro]. Universidad Autónoma de Querétaro. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
- Sarioğlu, E., & Kaynak, H. K. (2018). PET bottle recycling for sustainable textiles. InTechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72589>
- Milad Bhuiya, M., & Simon Hasan, K. (2019). Developing a model for recycling plastic bottle into synthetic fiber (Tesis de licenciatura, International University of Business Agriculture and Technology). <https://www.researchgate.net/publication/338232283>

- El Darai, T., Ter-Halle, A., Blanzat, M., Despras, G., Sartor, V., Bordeau, G., Lattes, A., Franceschi, S., Cassel, S., Chouini-Lalanne, N., Perez, E., Déjugnat, C., & Garrigues, J.-C. (2024). Chemical recycling of polyester textile wastes: shifting towards sustainability. *Green Chemistry*, Royal Society of Chemistry. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/gc/d4gc00911h>
- Plastics Europe. (2024). *Plastics: The fast facts 2024*. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>
- Ingeniería Química Reviews. (2020, diciembre). Botellas PET: proceso de fabricación, definiciones y aplicaciones. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/12/botellas-pet-proceso-fabricacion-definiciones.html>
- Gregory D. R., (2000). Improving Properties and processing performance of melt-spun fibers. *International Nonwovens Journal*, 9, n3, 15-21.
- García, A.& Tapia, J., (2007). Diseño de un nuevo proceso para la obtención de fibras de poliéster a partir de PET reciclado. *Conciencia Tecnológica*, num.34, 2007, pág. 60-61 <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94403418>
- Salazar, A., Valera, B., Del Rosario, G., Francia, J., (2022). Tesis de Magister Centrum PUCP. Modelo ProLab; Kawsay, una propuesta para reutilizar el plástico PET generado por empresas industriales. Modelo Canvas.

Capítulo 3

Economía circular en la industria textil: innovación y sostenibilidad para un futuro responsable

Circular economy in the textile industry: innovation and sustainability for a responsible future

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

Este trabajo aborda la ingeniería y la economía circular, poniendo énfasis en la sostenibilidad, la gestión de recursos y el impacto de políticas relacionadas en Chile y otros lugares. Se discuten estrategias para implementar la economía circular, con ejemplos de leyes y centros especializados. también se revisan fundamentos técnicos y educativos para formar profesionales con visión sostenible y se resaltan desafíos y oportunidades en la transición hacia un futuro responsable.

Palabras clave: Economía circular/ Industria textil/ Sostenibilidad.

This work addresses engineering and the circular economy, emphasizing sustainability, resource management, and the impact of related policies in Chile and elsewhere. Strategies for implementing the circular economy are discussed, with examples of legislation and specialized centers. Technical and educational foundations for training professionals with a sustainable vision are also reviewed, and challenges and opportunities in the transition to a responsible future are highlighted.

Keywords: Circular economy/ Textile industry/ Sustainability.

Introducción

La industria textil representa uno de los sectores con mayor impacto ambiental, desde la extracción de fibras hasta el desecho de productos. La transición hacia un modelo económico más sostenible exige adoptar principios de economía circular, los cuales

promueven el uso eficiente de los recursos, la minimización de residuos y la innovación sistémica. Esta obra se inspira en los aportes de Cortés García (2020), integrando estos principios al contexto de la industria textil para promover un cambio cultural, económico y ambiental urgente.

En esta sección, se expone la relevancia de adoptar principios de economía circular en el ámbito textil, considerando los impactos ambientales, sociales y económicos que genera la producción convencional. Se presenta el contexto global y nacional, resaltando tendencias actuales, necesidades de innovación en procesos y productos, y antecedentes sobre la problemática del desperdicio, la sobreexplotación de recursos y la contaminación en la industria textil. Además, se explica qué motiva esta obra, la importancia de impulsar modelos de negocio sostenibles y cómo el enfoque circular puede transformar radicalmente el sector hacia una economía más responsable y resiliente.

La globalización y el crecimiento acelerado de la industria textil han generado una serie de desafíos críticos relacionados con la sostenibilidad ambiental, social y económica. La producción textil, tradicionalmente caracterizada por un alto consumo de recursos naturales —como agua, energía y materias primas— y una generación significativa de residuos y contaminación, ha alcanzado niveles que amenazan la salud del planeta y el bienestar social. Factores como la creciente demanda de moda rápida, la obsolescencia programada y las prácticas de consumo desmedido contribuyen a un ciclo insostenible que requiere ser reorganizado urgentemente.

Motivación principal: El impulso para explorar y aplicar principios de economía circular en este sector surge ante la evidencia tangible de estos impactos negativos y la necesidad imperante de disminuir la huella ecológica del proceso productivo textil. La economía circular ofrece un paradigma alternativo que propone mantener los recursos en uso durante el mayor tiempo posible, reparar, reutilizar y reciclar productos, y minimizar los residuos y emisiones nocivas. La adopción de estos principios no solo puede reducir costos y optimizar los recursos, sino que además puede ser un eje central para innovación, diferenciación y competitividad en un mercado cada vez más consciente y exigente en temas de sostenibilidad.

Antecedentes y contexto internacional: Desde principios del siglo XXI, diversos países y organizaciones internacionales han comenzado a implementar políticas y normativas que fomentan modelos de producción más responsables. La Unión Europea, por ejemplo, ha desarrollado estrategias de economía circular mediante directrices y legislación que buscan transformar los métodos tradicionales en cadenas de valor sostenibles. La ONU y la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI), han promovido campañas y programas específicos para el sector textil, destacando la importancia de reducir residuos textiles y promover procesos de reciclaje y reutilización en sus agendas globales de sostenibilidad.

Contexto en América Latina y Colombia: En países como Colombia, se ha avanzado institucionalmente en la formulación de políticas que promueven la economía circular en diferentes sectores, incluyendo el textil. La estrategia nacional refleja un compromiso con transformar los modelos de producción y consumo para disminuir la dependencia de recursos no renovables y reducir la generación de residuos sólidos. Sin embargo, a nivel práctico, la industria aún enfrenta barreras relacionadas con la viabilidad técnica, la inversión en tecnología y la sensibilización del sector empresarial y los consumidores.

Relevancia actual: El contexto de crisis sanitaria global derivada de la pandemia de COVID-19 ha actuado como catalizador para repensar las cadenas de suministro, promover la autosuficiencia y valorar procesos circulares que sean resilientes, eficientes y sostenibles. La creciente conciencia social y ambiental, junto con las innovaciones tecnológicas en materiales, diseño y producción, habilitan ahora mayores oportunidades para transformar integralmente el sector textil bajo una visión de economía circular.

Propósito del trabajo: Este trabajo pretende ser una guía accesible que ayude a comprender y aplicar los principios de economía circular en la industria textil. Busca inspirar a actores clave —empresas, académicos, diseñadores, reguladores y consumidores— a colaborar en un proceso de cambio sistémico, que permita reducir el impacto ambiental, promover la innovación y crear modelos de negocio responsables y sostenibles. La obra se basa en experiencias internacionales, estudios de casos reales, análisis de políticas y tendencias emergentes, con el objetivo de contribuir a un sector más justo, eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

La industria textil es una de las más antiguas del mundo y también una de las más influyentes en la vida cotidiana de las personas. Sin embargo, esta influencia ha venido acompañada de un alto costo ambiental, social y económico. A lo largo de las últimas décadas, el modelo de producción y consumo que rige este sector ha sido mayormente lineal: extraer recursos, fabricar productos, consumirlos y finalmente desecharlos. Este enfoque ha derivado en la sobreexplotación de materias primas, el uso intensivo de agua, la contaminación por colorantes y productos químicos, y la generación masiva de residuos textiles que, en muchos casos, no son biodegradables ni reciclables.

Diversos informes internacionales han alertado sobre la insostenibilidad del modelo textil actual. Por ejemplo, según la Fundación Ellen MacArthur (2017), el sector textil consume alrededor de 93 mil millones de metros cúbicos de agua al año y genera más emisiones de carbono que los vuelos internacionales y el transporte marítimo combinados. Además, menos del 1% de los materiales utilizados en la producción de ropa se reciclan para fabricar nuevas prendas. A esto se suma una cadena de suministro caracterizada por prácticas laborales injustas, condiciones inseguras y falta de trazabilidad.

Frente a este escenario, surge la economía circular como una propuesta transformadora que permite reconfigurar la manera en que diseñamos, producimos y consumimos bienes. A diferencia del modelo lineal tradicional, la economía circular propone mantener los

recursos en uso el mayor tiempo posible, extraer el máximo valor de ellos durante su vida útil y regenerar productos y materiales al final de su ciclo. En lugar de ser el fin del ciclo, el residuo se convierte en el inicio de uno nuevo, promoviendo la regeneración y la eficiencia sistémica.

Este libro se basa en los fundamentos expuestos por Francisco Joaquín Cortés García en su obra *La economía circular* (2020), que recoge y sintetiza múltiples enfoques académicos y técnicos sobre la transición hacia modelos económicos regenerativos. En este nuevo volumen, se busca aplicar esos principios específicamente al contexto de la industria textil, una de las más complejas y urgentes de transformar. La motivación principal es brindar un marco de reflexión y acción a tomadores de decisiones, técnicos, estudiantes y empresarios del sector textil, proponiendo alternativas viables, ejemplos exitosos y estrategias concretas para hacer realidad la sostenibilidad a través de la innovación.

Además, se reconoce que la economía circular no puede implementarse de forma aislada. Requiere una integración multisectorial, cambios en la cultura organizacional, políticas públicas coherentes, incentivos para la innovación y, sobre todo, una ciudadanía informada y comprometida. Es por ello que, a lo largo de este libro, se combinará el análisis teórico con casos prácticos, evidenciando cómo la circularidad puede ser una herramienta poderosa para construir un futuro más responsable, justo y ecológicamente equilibrado dentro de la industria textil.

Este esfuerzo no pretende ser una guía exhaustiva, sino un punto de partida para repensar el diseño, el uso y el destino final de cada hilo, fibra y prenda que usamos, promoviendo una economía donde nada se desperdicia y todo se transforma.

Base teórica:

En este capítulo se detallan los conceptos fundamentales y las estrategias que sustentan la economía circular en la industria textil. Se abordan temas esenciales como la reducción de insumos y residuos, el diseño para la durabilidad y la reparabilidad, las técnicas de reciclaje textil, el uso eficiente de recursos hídricos y energéticos, y la incorporación de materiales innovadores y biodegradables. También se analizan marcos conceptuales, normativas internacionales y nacionales, indicadores de medición, y modelos de negocio que facilitan la transición hacia una producción y consumo más sostenibles.

La base teórica de la economía circular es fundamental para comprender los conceptos, principios y modelos que sustentan una transición hacia sistemas productivos más sostenibles y responsables. Este marco conceptual sirve como fundamento para analizar cómo las industrias, específicamente el sector textil, pueden incorporar prácticas que favorezcan la economía circular, promoviendo la eficiencia en el uso de recursos y la minimización de residuos.

Basada en el libro *La economía circular* (Cortés García, 2020), se desarrollan los siguientes conceptos:

- Evolución del concepto de sostenibilidad.
- De la economía lineal a la economía circular.
- Principios de la economía circular según Ellen MacArthur y autores como Stahel, McDonough y Braungart.
- Herramientas clave: jerarquía de residuos, diseño regenerativo, cradle to cradle, biomímesis y valorización energética.
- Teorías base: ecología industrial, economía del rendimiento y capitalismo natural.

Concepto de economía circular

La economía circular se define como un modelo económico que busca mantener los productos, componentes y materiales en su mayor ciclo de utilidad por el mayor tiempo posible, mediante la reutilización, el reciclaje, la reparación y la valorización de residuos, estableciendo una simbiosis con los principios de desarrollo sostenible 116. A diferencia del modelo lineal tradicional —que sigue la secuencia de “extraer, producir, consumir y desechar”—, la economía circular intenta cerrar los ciclos de vida de los productos para reducir la dependencia de recursos finitos y disminuir la generación de residuos.

Dimensiones y principios fundamentales

Los principios rectores de la economía circular incluyen:

- Rediseñar productos y procesos para maximizar la durabilidad, reparabilidad y reciclabilidad.
- Reducir el consumo de recursos y la generación de residuos desde la fase de diseño.
- Reutilizar, extendiendo la vida útil de los productos y componentes.
- Reciclar, recuperando materiales para su reinserción en nuevos procesos productivos.
- Reparar productos y componentes dañados para prolongar su utilización.
- Remanufacturar y rediseñar productos para optimizar su ciclo de vida y valor.
- Recuperar recursos energéticos de residuos no reciclables o sobrantes.

Estos principios se complementan con las 9 R del movimiento de economía circular, que guían las estrategias de manejo de recursos y residuos 109, de los cuales se destacan: reducir, reusar, reciclar, rediseñar, remanufacturar y otros.

Modelos y estrategias conceptuales

Diversos modelos y estrategias sustentan la implementación de la economía circular en industrias específicas, incluyendo:

- Círculos de valor: modelos que buscan integrar diferentes actores para cerrar los ciclos de materiales y energía, fomentando la colaboración y la innovación.
- Eco-diseño: diseñar productos considerando su ciclo completo, facilitando reparaciones, reutilización y reciclaje.
- Sistemas de recuperación: mecanismos que permiten la recolección y valorización de residuos textiles para su reincorporación en nuevos procesos productivos.
- Economía de la utilidad o servicios en lugar del producto: promoviendo modelos en los que se comercializa el uso o servicio en lugar del bien en sí, minimizando la producción y disposición de productos.

En estos modelos, la innovación tecnológica y la integración de procesos de información son clave para facilitar decisiones basadas en datos reales y optimizar los recursos.

Normas, estándares y marco legal

Para regular, estandarizar y potenciar la economía circular, han sido desarrolladas diversas normativas internacionales y nacionales. La ISO/TC 323 por ejemplo, ha elaborado normas relacionadas con la medición de circularidad y modelos de negocio sostenibles 49. En Colombia, el CONPES 3874 de 2016 y la Estrategia Nacional de Economía Circular establecen lineamientos específicos dirigidos a promover estos principios en diferentes sectores, incluyendo la industria textil 50.

Las normas sirven como herramientas que garantizan la coherencia, el reconocimiento internacional y la facilitación de la implementación de procesos sostenibles.

Impacto de la economía circular en la industria textil

La industria textil, con su elevada huella ambiental, resulta ideal para la aplicación de estos principios. La base teórica contempla aspectos como:

- La reutilización de fibras textiles y residuos de corte.
- La innovadora utilización de materiales reciclados en la fabricación de nuevos productos.
- El diseño de prendas y textiles que puedan ser fácilmente reparados o reciclados.
- La creación de cadenas de valor cerradas que involucren a proveedores, productores, consumidores y gestores de residuos.
- La integración de tecnologías digitales para el seguimiento de materiales y ciclos de vida, facilitando decisiones informadas y transparentes.

Estos elementos, fundamentados en la teoría, permiten transformar modelos productivos lineales en cadenas de valor circulares, promoviendo la sostenibilidad y la competitividad.

Metodología

Casos de estudio

Aquí se presentan experiencias reales y prácticas del sector textil que ejemplifican la aplicación de principios de economía circular. Se describen proyectos en diferentes contextos, como empresas que implementan sistemas de reciclaje de fibras, desarrollo de productos de bajo impacto, nuevos modelos de reuso y recompra, innovación en la cadena de suministro y procesos de economía colaborativa. Cada caso se analiza en detalle, resaltando las metodologías, resultados, desafíos y lecciones aprendidas, con el fin de ofrecer ejemplos concretos y replicables.

Casos de estudio en economía circular

La implementación de estrategias de economía circular en diferentes sectores productivos ha sido abordada mediante casos de estudio que permiten entender de forma práctica cómo se pueden aplicar estos principios en escenarios reales. En particular, en este análisis se consideran casos relacionados con la valorización de residuos provenientes de las industrias automotriz y agroindustrial, los cuales presentan oportunidades significativas para cerrar ciclos de materiales y promover la sustentabilidad en la construcción y otros ámbitos.

Caso 1: Valorización de residuos del sector automotriz para materiales de construcción

Este caso ilustra la utilización de residuos provenientes de la industria automotriz — como plásticos reciclados, tejidos reutilizados o partes metálicas— en la fabricación de materiales de construcción, en particular, en componentes como bloques, paneles aislantes o cementos con aditivos reciclados.

- **Contexto y problemática:** El sector automotriz produce una significativa cantidad de residuos sólidos, incluyendo plásticos, vidrios, metales, tejidos y componentes retirados de vehículos en desuso o en proceso de reciclaje. La gestión de estos residuos en muchas ocasiones confronta limitaciones en su revaloración, generando un problema de acumulación y contaminación.
- **Estrategia de economía circular aplicada:** El ejemplo analizado muestra cómo la recuperación y el reciclaje de estos residuos, mediante procesos de triturado, refinado y compatibilización, permiten incorporarlos en productos de construcción. Por ejemplo, los plásticos triturados pueden usarse como aditivos en mezclas de concreto, aportando propiedades de aislamiento térmico o acústico, además de reducir el consumo de cemento y otros ingredientes primarios

Resultados y beneficios:

- Reducción significativa de residuos en vertederos y plantas de tratamiento.
- Disminución del uso de materias primas vírgenes, promoviendo la sostenibilidad de recursos naturales.
- Mejora en las propiedades físicas y funcionales de materiales de construcción, como mayor aislamiento.
- Contribución a la economía circular mediante la creación de nuevas cadenas de valor y generación de empleo en la recuperación de residuos.

Desafíos y consideraciones:

Se requieren estándares de calidad, procesos de certificación y normativas específicas que aseguren la compatibilidad y seguridad del producto final, además de la aceptación del mercado.

Caso 2: Reutilización de residuos agroindustriales en la fabricación de materiales de construcción sostenibles

Este caso involucra residuos agroindustriales, como cáscaras, bagazo de caña, residuos de arroz o fibras vegetales, valorizados mediante procesos de tratamiento y compatibilización para la fabricación de bloques, tableros o componentes constructivos.

Contexto y problemática:

Los residuos agrícolas en muchas regiones quedan sin aprovechar, causando problemas de disposición y pérdidas económicas. La búsqueda de soluciones sostenibles ha permitido transformar estos residuos en insumos valiosos, en línea con los principios de economía circular.

Estrategia de circularidad:

Se tratan residuos agrícolas mediante procesos de secado, triturado y, en algunos casos, impregnación con aglutinantes ecológicos. Posteriormente, estos insumos se emplean en la fabricación de componentes constructivos, como bloques estructurales o aislantes.

Resultados y beneficios:

- Aprovechamiento de residuos agrícolas y reducción del impacto ambiental por disposición inadecuada.
- Producción de materiales con propiedades aislantes y de menor peso.
- Diversificación de productos en la cadena de valor de la construcción, promoviendo empleo local y desarrollo regional.
- Fomento de prácticas sostenibles en comunidades agrícolas y constructoras.

Desafíos y consideraciones:

Es fundamental garantizar la durabilidad y resistencia de los materiales, además de cumplir con las normas técnicas y de seguridad. La innovación en el adobo de fibras vegetales y el uso de aglutinantes ecológicos es clave para ampliar su aceptación en el mercado.

Dimensiones para la evaluación de propuestas de economía circular (como conclusión de los casos)

Al evaluar la viabilidad y sostenibilidad de estas iniciativas, se consideran dimensiones como:

- Económica: costos de recuperación, procesamiento y comercialización; valor agregado; oportunidad de mercado.
- Ambiental: reducción de residuos, huella de carbono, uso eficiente de recursos.
- Social: creación de empleo, inclusión social, aceptación comunitaria.
- Técnica: viabilidad de procesos, calidad del material producido, cumplimiento de normativas.

Por otro lado, otros datos:

- Reutilización de residuos textiles industriales en Perú y Colombia.
- Upcycling de prendas de vestir con modelos C2C en marcas latinoamericanas.
- Valorización energética de residuos textiles en países de la UE y su aplicación potencial en América Latina.
- Implementación de RAP (Responsabilidad ampliada del productor) en grandes cadenas de moda.

Caso 2: Reutilización de residuos textiles industriales en Perú y Colombia

Ubicación: Lima (Perú) y Medellín (Colombia)

Actores clave: Pequeñas empresas textiles y ONGs locales

Este caso muestra cómo, en dos contextos latinoamericanos distintos pero similares en problemática, pequeñas y medianas empresas han articulado alianzas con organizaciones sociales y ambientales para recolectar residuos textiles de talleres y confecciones, clasificarlos y reutilizarlos para nuevos productos como:

- Trapos industriales.
- Relleno para colchones o peluches.
- Bolsos, mochilas y accesorios elaborados artesanalmente con retazos.

Además de reducir residuos en vertederos, esta iniciativa genera empleos inclusivos para mujeres en situación de vulnerabilidad. En ambos países se desarrollaron manuales

técnicos de clasificación por tipo de tela y coloración, y se capacitó al personal en diseño para upcycling.

Impacto circular:

- Reducción de residuos postindustriales.
- Inclusión social y empleo verde.
- Promoción del consumo responsable.

Caso 3: Upcycling y rediseño de prendas – Moda sostenible en Latinoamérica

Ubicación: Buenos Aires (Argentina), Bogotá (Colombia), Ciudad de México (México).

Actores clave: Startups de moda circular, diseñadores independientes.

Empresas emergentes como *Hilando Verde*, *Remender* y *Textiles ReCircula* han puesto en marcha modelos de negocio basados en la transformación creativa de ropa en desuso, combinando principios de economía circular con tendencias de moda ética.

En lugar de desechar prendas viejas, estas empresas:

- Las rediseñan en talleres especializados.
- Les agregan valor artesanal o cultural.
- Venden ediciones limitadas con trazabilidad.

Muchas también incluyen campañas de “tráenos tu ropa usada y recibe un descuento”, promoviendo la logística inversa y extendiendo el ciclo de vida útil de los productos.

Impacto circular:

- Cambia la percepción del “residuo” como recurso.
- Fomenta el diseño regenerativo y artesanal.
- Disminuye la dependencia de materia prima virgen.

Caso 4: Valorización energética de residuos textiles no reciclables en Europa

Ubicación: Países Bajos, Alemania y Suecia.

Actores clave: Consorcios públicos y privados, plantas de conversión térmica.

Este caso demuestra cómo los residuos textiles que no pueden ser reutilizados ni reciclados mecánicamente se convierten en fuente de energía mediante tecnologías como:

- Incineración con recuperación de calor.
- Pirolisis para obtención de biocombustibles.
- Gasificación de fibras sintéticas.

Estos proyectos están regulados por normas estrictas de emisiones y solo se aplican tras agotar todas las estrategias de reutilización y reciclaje. Algunos municipios holandeses incluso han establecido centros de acopio selectivo para clasificación previa.

Impacto circular:

- Recuperación de energía de residuos no aprovechables.
- Reducción de la presión sobre rellenos sanitarios.
- Integración con sistemas de calefacción urbana.

Caso 5: Responsabilidad ampliada del productor (RAP) en la industria textil – H&M y Decathlon

Ubicación: Unión Europea.

Actores clave: Empresas multinacionales del retail textil.

En varios países de la UE, ya es obligatoria la aplicación de esquemas de RAP en el sector textil, lo que significa que las marcas son responsables de los productos más allá del punto de venta, incluyendo su recolección, reciclaje y disposición final.

Empresas como H&M y Decathlon han desarrollado:

- Puntos de acopio en tiendas físicas.
- Plataformas digitales de devolución.
- Centros de clasificación para recuperación de fibras.

Además, algunas prendas ya están diseñadas para facilitar su desmontaje y reciclaje mecánico (ecoetiquetado y materiales monocomponentes).

Impacto circular:

- Fomenta la innovación en diseño ecológico.
- Incentiva la circularidad desde el modelo de negocio.
- Responsabiliza a los productores por el ciclo de vida completo.

Caso 5: Inditex – Transformación hacia la economía circular

Contexto general

Inditex (Industria de Diseño Textil S.A.), matriz de marcas como Zara, Bershka, Pull&Bear y Massimo Dutti, es una de las empresas de moda más grandes del mundo. Fundada en Galicia (España), ha sido históricamente asociada al modelo de moda rápida (fast fashion), caracterizada por:

- Producción masiva y continua de colecciones.
- Rotación constante de inventario.
- Costos bajos.
- Vida útil corta de las prendas.

Este modelo le otorgó un crecimiento acelerado, pero también críticas significativas por sus impactos sociales, laborales y medioambientales. Frente a la presión de la opinión pública, nuevas regulaciones europeas y la emergencia climática, Inditex emprendió un

proceso de revisión estratégica e incorporación progresiva de principios de economía circular.

Estrategias circulares implementadas

Etiqueta “Join Life”

Es una submarca ambiental interna que identifica productos fabricados bajo criterios de sostenibilidad.

Exige que las prendas cumplan con al menos uno de los siguientes criterios:

- Uso de materias primas con bajo impacto ambiental (algodón orgánico, poliéster reciclado, TENCEL™).
- Proveedores con certificaciones medioambientales y sociales.
- Procesos que reduzcan el consumo de agua, energía o productos químicos.

En 2019, el 19% de las prendas de Inditex ya formaban parte de esta línea, con la meta de llegar al 100% de fibras sostenibles en 2025.

Programa de recolección y reciclaje de ropa usada

Implementado en tiendas de Zara y otras marcas en varios países.

En alianza con organizaciones como Cáritas, Cruz Roja y Oxfam, se recolecta ropa usada que es:

- Donada si está en buenas condiciones.
- Reutilizada como materia prima para nuevas prendas.
- Reciclada para usos industriales o aislantes.

En algunos casos, la ropa no reciclable se valoriza energéticamente.

Este sistema se integra a su estrategia de logística inversa y busca extender el ciclo de vida de las prendas.

Ecodiseño y colaboración con proveedores

Inditex ha iniciado un rediseño de procesos productivos basado en criterios de ecodiseño.

Destacan alianzas con proveedores de textiles innovadores, como:

- Lenzing AG, fabricante de fibras Lyocell Refibra™, elaboradas a partir de residuos de algodón reciclado y madera certificada.
- Incorporación de poliéster reciclado proveniente de botellas PET.

El proceso de diseño ahora integra desde su fase inicial parámetros como reciclabilidad, menor uso de agua, reducción de energía y facilidad de desmontaje del producto.

Objetivos de sostenibilidad a largo plazo

Inditex ha establecido compromisos públicos para el mediano y largo plazo, entre ellos:

- Cero residuos a vertedero en 2023 (logrado parcialmente).
- Uso de energías 100% renovables en su red logística global.
- Eliminación del plástico de un solo uso en todas sus operaciones.
- Certificación ambiental LEED en sus centros logísticos.

Resultados e impactos

Tabla N.º 1

Indicador	Resultado
Ahorro de agua	Hasta 90% en algunas prendas Join Life
Reducción de CO ₂	12% menos en productos Join Life
Recolección de prendas	26% de prendas vendidas fueron retornadas para reutilización/reciclaje
Incorporación de fibras sostenibles	91% del algodón y 100% del lino eran sostenibles en 2020
Posicionamiento	Incluida en el Dow Jones Sustainability Index

Fuente: elaboración propia

Efecto reputacional y de liderazgo:

Pese a críticas por prácticas anteriores, Inditex ha conseguido reposicionarse como una empresa líder en sostenibilidad textil, siendo reconocida por su enfoque de transparencia, trazabilidad y adaptación a la economía circular.

Lecciones aprendidas

La transición es posible incluso en modelos tradicionales

Aunque Inditex era ícono del fast fashion, ha demostrado que es posible transformar gradualmente la cadena de valor sin perder competitividad.

La circularidad requiere innovación sistémica

No basta con cambiar materiales: se necesita repensar desde el diseño hasta la logística, incluyendo relaciones con consumidores y aliados sociales.

Las alianzas son clave

La colaboración con ONGs, tecnólogos, startups y universidades ha sido fundamental para avanzar hacia un modelo circular creíble y escalable.

La circularidad mejora eficiencia y reputación

Reducción de costes por eficiencia energética y menor uso de materias primas.

Mejora de la imagen de marca frente a consumidores más exigentes.

Desafíos y críticas

- Persisten cuestionamientos sobre la coherencia del modelo: ¿puede una empresa de moda rápida ser realmente circular sin reducir su volumen de producción?
- Existen límites tecnológicos para el reciclaje textil a gran escala.
- La transformación cultural del consumidor aún es parcial: la demanda sigue centrada en precio y moda efímera.
- Aunque se implementan prácticas circulares, la producción masiva sigue generando un volumen significativo de residuos.

Conclusión del caso

El caso de Inditex demuestra que la economía circular no es exclusiva de pequeñas marcas sostenibles. También puede ser adoptada por gigantes del sector, siempre que exista voluntad estratégica, inversión en innovación y compromiso con el cambio estructural. Sin embargo, también deja claro que la verdadera circularidad exige cambios en los modelos de negocio, no solo en los materiales, y plantea un debate ético sobre los límites del crecimiento en la industria de la moda.

Modelo de evaluación del ciclo de vida sostenible (LCSA) aplicado a Inditex

¿Qué es el LCSA?

El Life cycle sustainability assessment (LCSA) o evaluación del ciclo de vida sostenible es una metodología que busca medir de forma integrada los impactos ambientales, sociales y económicos de un producto, servicio o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida. Esta herramienta es clave dentro del enfoque de economía circular, ya que permite evaluar si una estrategia “sostenible” lo es realmente en términos sistémicos.

El modelo se basa en tres pilares:

- LCA (Life cycle assessment): Evaluación del impacto ambiental.
- LCC (Life cycle costing): Evaluación de los costos económicos totales.
- S-LCA (Social life cycle assessment): Evaluación de impactos sociales.

$LCSA = LCA + LCC + S-LCA$

Aplicación del LCSA a productos textiles de Inditex

El estudio de Blanco Alcántara et al. aplica el LCSA a un producto emblemático del grupo Inditex: una camiseta básica de algodón, comparando su impacto según dos líneas de producción:

- Camiseta estándar: fabricada con algodón convencional, sin criterios ambientales especiales.
- Camiseta Join Life: fabricada con algodón orgánico y procesos bajo estándares sostenibles.

Análisis ambiental (LCA)

Metodología

Se utiliza la norma ISO 14040 e ISO 14044 para evaluar los impactos en distintas categorías, desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida útil (cradle-to-grave).

Indicadores evaluados:

- Consumo de agua (huella hídrica).
- Emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂ equivalente).
- Uso de energía no renovable.
- Impacto en la acidificación y eutrofización.

Resultados:

Tabla N° 2

Indicador	Camiseta estándar	Camiseta Join Life	Mejora (%)
Consumo de agua	2.700 litros	270 litros	-90%
Emisiones de CO ₂ eq.	3,2 kg	2,8 kg	-12%
Energía primaria utilizada	Alta	Moderada	-25%
Impacto en eutrofización	Elevado	Reducido	-30%

Fuente: Elaboración propia

Conclusión ambiental:

El uso de algodón orgánico, mejores prácticas agrícolas y procesos eficientes reduce notablemente el impacto ambiental. El ecodiseño y la menor dependencia de químicos contaminantes hacen del producto Join Life una alternativa más coherente con los principios de economía circular.

Análisis económico (LCC)

Objetivo:

Calcular el costo total del producto durante todo su ciclo de vida, incluyendo:

- Costes de materia prima.
- Costes de fabricación y logística.
- Costes ocultos (externalidades, gestión de residuos).
- Costes para el consumidor (lavado, mantenimiento, descarte).

Resultados destacados:

- La camiseta Join Life tiene un costo inicial de producción ligeramente más alto (+5–10%), debido al uso de insumos certificados y procesos más controlados.
- Sin embargo, el ahorro en agua, energía y gestión de residuos reduce los costes totales a lo largo del ciclo de vida.
- Para el consumidor, el producto tiene mayor durabilidad, lo que representa un menor coste por uso (€/uso).

Conclusión económica:

Aunque la camiseta Join Life puede parecer más cara al principio, resulta más económica a largo plazo y más eficiente para el sistema productivo global si se considera la inclusión de costes ambientales y sociales.

Análisis social (S-LCA)

Objetivo:

Evaluar los impactos sociales del ciclo de vida en los diferentes grupos de interés:

- Trabajadores (condiciones laborales).
- Comunidades locales (salud, equidad).
- Consumidores (salud y transparencia).
- Proveedores (comercio justo y formalización).

Resultados:

- La camiseta Join Life se produce en fábricas certificadas con auditorías sociales regulares (BSCI, Sedex).
- Se promueve la inclusión de mujeres en la cadena de suministro.
- Mayor transparencia en el origen de los materiales y respeto de los derechos laborales.
- Incentivo a relaciones comerciales duraderas con proveedores sostenibles.

Conclusión social:

El modelo Join Life tiene menores riesgos de vulneración de derechos humanos y laborales, y mejora la reputación social de la empresa, alineándose con los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), en particular los ODS 8 (Trabajo decente) y 12 (Consumo responsable).

Resumen comparativo del LCSA aplicado a Inditex

Tabla N° 3

Dimensión	Camiseta Estándar	Camiseta Join Life	Mejora significativa
Ambiental	Alto impacto	Bajo impacto	sí
Económica	Menor coste inicial, mayor a largo plazo	Mayor coste inicial, menor a largo plazo	sí
Social	Riesgo alto en condiciones laborales y trazabilidad	Mejora en condiciones, transparencia y equidad	sí

Fuente: Elaboración propia

Implicancias para la industria textil

- El LCSA demuestra que la sostenibilidad no es solo ambiental, sino también económica y social.
- El enfoque circular debe evaluarse con herramientas integradas, y no con visiones parciales o cosméticas.
- Empresas que aplican LCSA ganan ventaja competitiva, mejoran su reputación, reducen riesgos y anticipan regulaciones.
- Consumidores informados valoran productos con menor impacto a lo largo de su ciclo de vida, aunque su coste inicial sea superior.

Recomendación para replicabilidad

El caso Inditex muestra que el LCSA puede ser adaptado por otras empresas, incluso PYMEs, como herramienta de mejora continua. Para ello se sugiere:

- Capacitar en ACV, ecodiseño y contabilidad ambiental.
- Establecer alianzas con universidades o centros de ecoinnovación.
- Digitalizar los procesos para mejorar trazabilidad y medición de impactos.
- Comunicar los resultados al consumidor de forma clara y transparente.

Caso 6: Diseño de prendas sostenibles: Casos Join Life (Inditex)

¿Qué es Join Life?

Join Life es la etiqueta de sostenibilidad desarrollada por Inditex (Zara y otras marcas del grupo), cuyo objetivo es identificar prendas que cumplen con criterios rigurosos en sostenibilidad ambiental y social, desde el diseño hasta el uso final del producto.

Cada prenda Join Life responde a tres categorías básicas:

- Care for fiber (Cuidado por la fibra): Uso de materiales sostenibles.
- Care for water (Cuidado del agua): Procesos de teñido y lavado con bajo impacto hídrico.
- Care for planet (Cuidado por el planeta): Producción con bajas emisiones y ahorro energético.

Principios de diseño sostenible aplicados en Join Life

El diseño de prendas Join Life se basa en los principios de ecodiseño y economía circular, lo que implica:

Selección responsable de materiales

- Uso de algodón orgánico: cultivado sin pesticidas ni fertilizantes químicos, con un consumo de agua hasta 90% menor que el algodón convencional.
- Uso de fibras celulósicas responsables: como TENCEL™ Lyocell, producida a partir de pulpa de madera certificada (FSC o PEFC), con un proceso cerrado que reutiliza más del 99% de los solventes.
- Utilización de fibras recicladas: como poliéster reciclado proveniente de botellas PET, nailon regenerado o mezclas de fibras recicladas pre-consumo (residuos de producción).
- Eliminación de tejidos de mezcla no reciclables (como algodón con elastano no separable), buscando monomateriales que faciliten el reciclaje posterior.

Optimización del diseño para facilitar reutilización y reciclaje

- Prendas diseñadas con costuras simples y elementos desmontables.
- Evitación de accesorios innecesarios (cierres, botones metálicos, etiquetas plásticas) que dificultan el reciclaje.
- Prioridad por diseños atemporales que prolongan la vigencia de uso de la prenda.

Diseño para alargar la vida útil

- Aplicación de criterios de calidad para mejorar la resistencia a lavados, tracción y abrasión.

- Instrucciones claras de cuidado, incentivando el uso responsable por parte del consumidor (lavado a baja temperatura, secado natural).
- Promoción del reacondicionamiento y reventa: parte de la estrategia circular para reducir el impacto postconsumo.

Reducción de impactos en la etapa de producción

- Procesos de teñido en seco (dry-dye) o con bajo consumo de agua y sin metales pesados.
- Certificaciones de procesos, como OEKO-TEX®, GOTS, Better Cotton Initiative o Global Recycled Standard (GRS).
- Implementación de energías renovables en las plantas de producción.
- Control de la huella de carbono y del uso de productos químicos en todas las etapas.

Casos concretos de prendas Join Life

Camiseta básica 100% algodón orgánico

- Fabricada sin uso de pesticidas ni semillas transgénicas.
- Consume un 91% menos de agua que una camiseta convencional.
- Se distribuye en empaque reciclado y con etiqueta reciclable.

Vaquero (jean) sostenible

- Utiliza denim reciclado y algodón orgánico.
- Producción con ahorro del 80% de agua en procesos de lavado.
- Tinte sin químicos contaminantes.
- Incluye código QR que permite al consumidor conocer el origen de las fibras y la fábrica donde se confeccionó.

Camisa de TENCEL™ Lyocell

- Fibra proveniente de madera de bosques sostenibles.
- Proceso de producción con circuito cerrado de agua y solventes.
- Tejido biodegradable en condiciones industriales.

Resultados obtenidos en diseño y producción circular**Tabla N.º 4**

Indicador	Resultado con Join Life
Consumo de agua	-90% respecto a prenda convencional
Uso de fibras sostenibles	91% en algodón, 100% en lino (2020)
Aumento de prendas circulares	De 9% (2017) a 25% (2020), con meta del 100%
Trazabilidad	Aumento de proveedores auditados y certificados
Calidad/durabilidad	Incremento del número de usos por prenda

Fuente: elaboración propia

Lecciones aprendidas del diseño circular en Join Life

- Diseñar sosteniblemente no implica pérdida de estética o moda: Join Life demuestra que es posible unir sostenibilidad con diseño comercial atractivo.
- El cambio comienza desde la fase conceptual: Toda prenda Join Life es concebida con criterios circulares desde el diseño, no como una adaptación posterior.
- La trazabilidad es fundamental: Conocer el origen de los materiales, las condiciones de trabajo y el destino del residuo permite mejorar la gestión del ciclo de vida.
- El consumidor juega un rol activo: Al ofrecer información clara, Join Life empodera al consumidor para que tome decisiones de compra más conscientes.

Implicancias para el ecosistema textil

- Para diseñadores: Se requiere un cambio de paradigma hacia el “diseño para el desensamblaje”, durabilidad, y trazabilidad.
- Para marcas pequeñas y PYMEs: Es posible adaptar muchas de estas estrategias a menor escala, usando materiales locales y producción responsable.
- Para universidades: El caso Join Life debe incorporarse en los programas de formación en diseño, ingeniería textil y moda sostenible.
- Para reguladores: La experiencia Join Life puede servir de base para definir criterios mínimos de ecodiseño en políticas públicas.

Conclusión del caso Join Life y diseño sostenible

Join Life no es simplemente una línea de ropa, sino un modelo operativo que reconfigura el diseño textil bajo criterios de economía circular. Su aplicación ha permitido a Inditex

avanzar hacia metas ambientales concretas, reducir costos en el largo plazo, y generar valor reputacional y comercial alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Este caso representa un ejemplo realista y replicable para empresas del sector textil que desean iniciar o acelerar su transición hacia modelos más regenerativos, eficientes y éticamente responsables.

Reflexión general sobre los casos

Cada uno de estos casos ilustra un aspecto del enfoque circular aplicado al sector textil. Aunque varían en escala, madurez y contexto, todos comparten características esenciales:

- Visión sistémica.
- Rediseño de procesos.
- Compromiso con la sostenibilidad.
- Participación de múltiples actores.

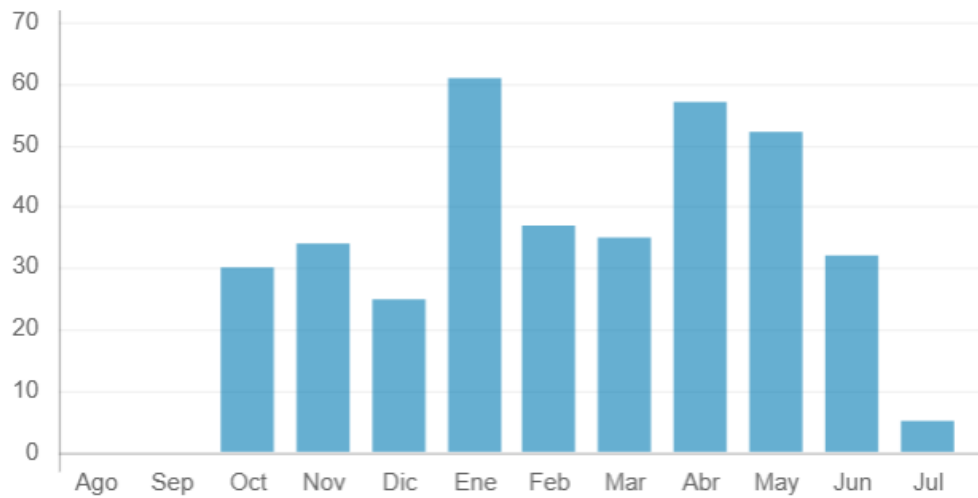
Discusión:

En esta sección se reflexiona acerca de los obstáculos, oportunidades y tendencias que enfrenta la industria textil para adoptar plenamente la economía circular. Se analizan aspectos económicos, tecnológicos, sociales y regulatorios, así como la percepción del consumidor y la influencia de políticas públicas. Se evalúan los beneficios ambientales y de negocio, discutiendo cómo la integración de estrategias circulares puede potenciar la innovación y la competitividad, además de fortalecer el compromiso social y ético del sector.

Caso 7: Responsabilidad social corporativa, criterios ESG y su comunicación en el sector textil español

Ramírez-Barredo, B., Guerrero Gonzalez-Valerio, B. (2024). El presente artículo tiene como objetivo analizar la relación que existe entre la comunicación de las empresas en materia de sostenibilidad y su impacto en el imaginario de los consumidores, con el fin de evaluar en qué medida estas variables están alineadas. El estudio se centra en tres empresas españolas del sector textil: Inditex, Mango y Adolfo Domínguez. Metodología: Con el fin de dar respuesta a los objetivos y suscribir o rechazar las hipótesis de partida, se utiliza una metodología mixta, de corte cualitativo y cuantitativo. Resultados: Las tres empresas analizadas representan ejemplos destacados de cómo las grandes empresas de moda españolas pueden integrar criterios ESG en sus operaciones y cómo estas prácticas son percibidas por los clientes.

Gráfico N.º 1

Descargas

Fuente: Elaboración propia

Discusión:

Su estudio proporciona una base sólida para entender las mejores prácticas y los desafíos en la implementación y comunicación de estrategias sostenibles en la industria textil.

Conclusiones:

Existe una brecha significativa entre las acciones de sostenibilidad de las empresas y la percepción de los consumidores, quienes reciben información muy sesgada, principalmente a través de redes sociales y puntos de venta, en lugar de informes anuales.

Caso 8: Caracterización de los residuos textiles posindustria en Bogotá

Robles-Camargo, J., Hincapié-Corredor, P., Ariza-Murillo, L. (2024). El artículo muestra que de acuerdo con la base de datos RUES de Confecámaras Colombia al 01 de julio de 2021, de las 12.712 empresas activas asociadas a actividades del sector textil como preparación, hilatura, tejeduría y acabados, las microempresas representan el 89,6% del entorno económico, seguido por pequeñas (7,5%), medianas (2,3%) hasta las grandes empresas (0,6%) que cuentan con una fuerza laboral de 1,8 millones de trabajadores. Para el 2021 hubo un incremento del 20,9% en el número de empresas activas respecto al 2020, en el que se registraron 10.512 de estas. En su desagregación por ciudad al 2021 se tiene que en Bogotá se concentra gran parte del tejido productivo con 4.120 empresas, seguido de Antioquía con 2.478 y el Valle del Cauca con 939 empresas.

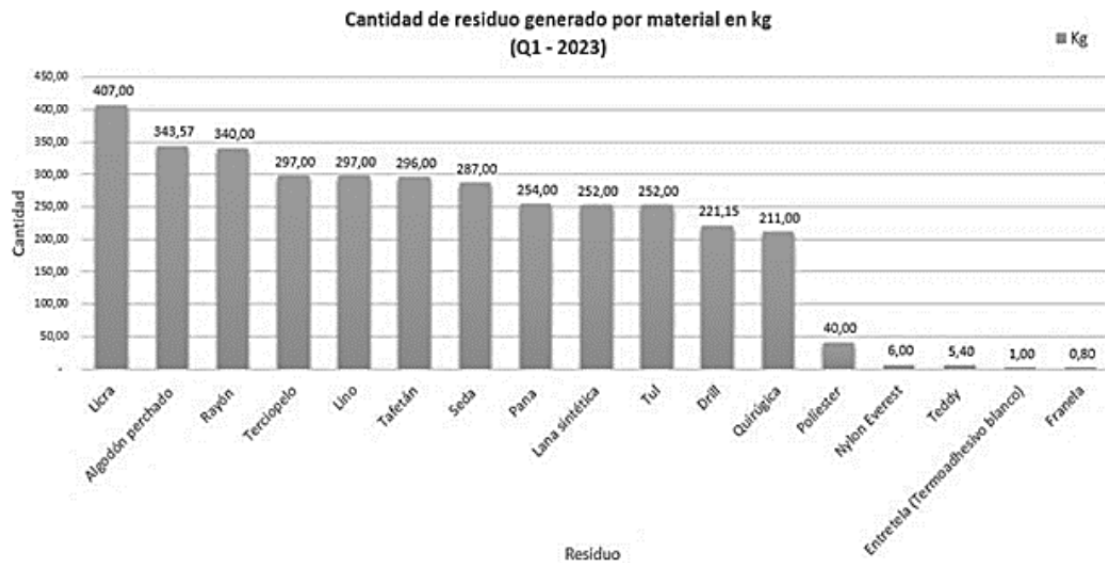
Bogotá habría sido al 2020 la segunda ciudad de Latinoamérica con mayor inversión en moda, ascendiendo a US\$260 millones según el estudio “Sector de la moda” de la EAE Business School, antecedida por Ciudad de México con US\$426 millones.

El consumo en moda al interior del país alcanzó \$27,7 billones en 2021, 21% más que en 2020 y 5% más que en 2019 a partir de datos de Inexmoda. Esto convierte al sector en protagonista de la economía local y en referente de su resistencia a la crisis en época de pandemia. Sobre las exportaciones de textiles y confecciones se presentó un crecimiento acumulado de enero a diciembre de 2021-US\$2.534 millones un 27% más que el mismo período de 2020, razón por la que el presidente de Inexmoda, Carlos Botero se declara entusiasta con las proyecciones de crecimiento económico del sector; la canasta de la moda representó al 2022 un 3,3% del gasto de los hogares, acercándose al 3,6% de la participación prepandemia de enero de 2020, siendo de gran importancia para las exportaciones del país. Por otro lado, la tendencia de consumo de las ventas online señala que el calzado representa el 25% del total de ventas en internet, seguido del textil hogar con 19,3%. Finalmente, el mercado de ropa de segunda mano representa para Bogotá el 40% de las compras de ropa usada, seguido de Medellín con un 23%, Barranquilla con 22%, Cali y Bucaramanga 15% cada una.

Sin embargo, este tan mencionado crecimiento aumenta el impacto ambiental que genera dicha actividad económica, llegándose a disponer más de 147.000 toneladas de textiles en el relleno Sanitario Doña Juana. Por otro lado, las estadísticas de la Fundación Ellen MacArthur publicadas por el Banco Mundial señalan que se necesitan 10.000 litros de agua para la producción de 1 kilo de algodón y 387.000 millones de litros anuales en la producción textil.

De ahí que en la investigación se haya buscado obtener información sobre la generación del residuo textil pre consumo en Bogotá de manera aplicada, entiéndose residuo como el material que se desecha a lo largo del proceso productivo. Se consultaron 45 empresas, de las cuales facilitaron el levantamiento de la data 7, el proceso consistió en visitarlas o agendar reuniones virtuales según disponibilidad, generalmente era el líder del proceso quien tomaba la vocería para guiar el recorrido y describir sus actividades. El 82% de las empresas que se abstuvo de participar en la investigación manifestaba no poder compartir dichos datos por confidencialidad a pesar de ofrecer la firma de un acuerdo para trabajar de manera anónima, no tener tiempo o directamente no tener interés en participar, la colaboración del 18% restante permitió obtener los siguientes resultados.

Gráfico N.º 2



Fuente: elaboración propia

Discusión

Casos de estudio en economía circular

La integración de principios de economía circular en proyectos concretos de valorización de residuos en sectores industrializados revela múltiples dimensiones de impacto y desafíos que deben abordarse para lograr una implementación exitosa y sustentable.

Factibilidad técnica y procesos de valorización

- Transformación y compatibilidad de residuos: El éxito en la incorporación de residuos automotrices y agroindustriales en materiales de construcción depende mucho de procesos de tratamiento y compatibilización. Por ejemplo, en el caso automotriz, residuos plásticos y metales deben pasar por procesos de triturado, tamizado y compatibilización para integrarlos en matrices cementicias o como aditivos en bloques de construcción. La compatibilidad de estos residuos con los materiales tradicionales debe garantizar propiedades estructurales y durabilidad que cumplan con normativas nacionales e internacionales.
- Innovación en procesos de fabricación: Se requiere innovación tecnológica para adaptar procesos industriales tradicionales hacia procesos de economía circular, como reutilización de residuos en producción de bloques con diferentes propiedades térmicas o mecánicas. La utilización de métodos ecológicos, como adhesivos orgánicos o materiales compuestos, favorece la sostenibilidad y aceptación del mercado.

- **Control de calidad y certificación:** Es crucial contar con estándares y sistemas de control de calidad que aseguren la fiabilidad del material producido. La certificación de productos con contenido reciclado, basada en normativas como las que desarrolla ISO/TC 323 49, permite su aceptación en el mercado de la construcción y garantiza resistencia y durabilidad.

Impacto económico y modelos de negocio

- **Costos y beneficios económicos:** La recuperación y valorización de residuos generan costos asociados a la recolección, transporte, tratamiento y procesamiento. Sin embargo, estos costos pueden ser compensados por los beneficios de reducción en uso de materias primas tradicionales, disminución en gastos de disposición final y la creación de nuevos mercados.
- **Oportunidades de negocio y cadenas de valor:** Transformar residuos en insumos para construcción abre oportunidades comerciales en industrias especializadas en reciclaje y fabricación de productos sustentables. Formar alianzas entre sectores automotriz, agrícola y construcción potencializa la creación de cadenas de suministro que fomenten la economía circular.
- **Incentivos y políticas públicas:** El apoyo de políticas nacionales, como la Estrategia Nacional de Economía Circular en Colombia 50, y normativas específicas, son fundamentales para crear un ambiente favorable, ofrecer incentivos fiscales y promover la innovación tecnológica.

Dimensiones sociales y ambientales

- **Reducción de residuos y gestión ambiental:** Los casos demuestran que el tratamiento de residuos automotrices y agroindustriales reduce la carga en vertederos, disminuye emisiones de gases y evita contaminación de suelos y aguas, alineándose con objetivos de protección ambiental y cumplimiento de normativas.
- **Inclusión social y generación de empleo:** Estas estrategias fomentan la creación de empleos verdes y promueven la participación de comunidades locales en actividades de recolección, procesamiento y comercialización de residuos valorizados, fortaleciendo el desarrollo social.
- **Aceptación comunitaria y percepción social:** Es esencial promover campañas de sensibilización para aceptar materiales con contenido reciclado en construcción, garantizando que la percepción social sea favorable, y reducir posibles rechazos por parte de usuarios finales.

Desafíos y riesgos

- Limitaciones regulatorias y estándares: La ausencia de normativas específicas que regulen los materiales reciclados en construcción puede retrasar su adopción. La actualización y creación de estándares es clave para garantizar la calidad y seguridad del producto final.
- Vulnerabilidad a fluctuaciones del mercado: Los precios de las materias primas tradicionales fluctúan y afectan la rentabilidad de productos reciclados. La dependencia de subsidios o incentivos también puede generar vulnerabilidad en los modelos de negocio.
- Resistencia al cambio en la industria tradicional: La adopción de residuos reciclados implica cambios en procesos y paradigmas industriales, enfrentando resistencias internas y culturales.

Perspectivas futuras y tendencias

- Innovación tecnológica y biotecnología: Avances en técnicas de tratamiento y biotecnología permitirán mejorar la calidad y eficiencia de la valorización de residuos. Ejemplo, el uso de bacterias para bioconcreto o para tratar fibras vegetales.
- Normas internacionales y certificaciones: El desarrollo de directrices a nivel global, como las normas ISO/TC 323 49, facilitará la homologación y el reconocimiento internacional de materiales reciclados, promoviendo su integración en proyectos transnacionales.
- Integración en políticas de desarrollo sostenible: Las experiencias de estos casos aportan información valiosa para que políticas públicas integren acciones concretas de valorización de residuos, promoviendo objetivos de la Agenda 2030 y los compromisos internacionales en cambio climático y sostenibilidad.

La economía circular ha sido ampliamente promovida como una solución clave para enfrentar los desafíos ambientales, sociales y económicos del siglo XXI. En el caso de la industria textil, su aplicación representa tanto una necesidad ineludible como una oportunidad estratégica. Sin embargo, la transición del modelo lineal al circular en este sector no está exenta de contradicciones, tensiones y barreras estructurales que deben ser abordadas con realismo y visión integral.

De la teoría a la práctica: tensiones y brechas

A pesar de la riqueza conceptual de la economía circular —basada en principios como el ecodiseño, la valorización de residuos, la prolongación del ciclo de vida útil de los productos, y la regeneración de sistemas naturales—, su aplicación práctica en el sector textil enfrenta múltiples desafíos:

- **Persistencia del modelo fast fashion:** El modelo de negocio dominante en la industria textil promueve el consumo rápido, la obsolescencia estilística acelerada y ciclos de vida cortos, lo que es antagónico al principio de circularidad. Las marcas que se autodenominan “circulares” muchas veces mantienen prácticas extractivistas y contaminantes, lo cual genera un fenómeno de “greenwashing”.
- **Falta de capacidades técnicas e infraestructura:** En América Latina y otras regiones en desarrollo, no existen aún cadenas logísticas circulares maduras, centros de clasificación adecuados ni plantas de reciclaje textil a escala industrial. Esto limita la efectividad de muchas iniciativas y las deja en una escala artesanal o experimental.
- **Desigualdad de acceso a tecnologías y conocimiento:** Las empresas pequeñas y medianas (pymes), que representan gran parte del ecosistema textil regional, carecen de financiamiento, asistencia técnica y capacitación para rediseñar procesos, incorporar materiales sostenibles o innovar en modelos de negocio circulares.

Contradicciones estructurales y barreras culturales

Uno de los principales obstáculos identificados en los casos estudiados es de tipo cultural y organizacional. A pesar de que existen consumidores más conscientes, el hábito dominante sigue siendo el consumo masivo, barato y desechable, alentado por campañas de marketing agresivas.

- Muchos consumidores aún valoran el precio por encima de la durabilidad.
- El mercado laboral informal impide procesos de trazabilidad y cumplimiento ambiental.
- En varios países, el reciclaje textil no está normado o se encuentra fuera del radar de políticas públicas.

Estas realidades evidencian que la economía circular no puede implementarse únicamente desde las empresas, sino que requiere un cambio cultural y sistémico que incluya al Estado, los consumidores, la academia y los medios de comunicación.

Emergencia de nuevas oportunidades y sinergias

A pesar de estas barreras, los casos analizados también demuestran que la economía circular abre nuevas oportunidades para repensar el modelo económico textil, entre ellas:

- Innovación en diseño: El ecodiseño de prendas facilita la reparación, el desmontaje y el reciclaje. Marcas emergentes están demostrando que es posible crear valor desde los residuos, y que la estética no está reñida con la sostenibilidad.
- Modelos de negocio circulares: Alquiler de ropa, plataformas de segunda mano, personalización de prendas y economía colaborativa son nuevas formas de generar ingresos sin necesidad de aumentar la producción. Estas estrategias reducen la presión ambiental y generan mayor fidelización del cliente.
- Economía inclusiva y empleo verde: La reutilización de textiles, la reparación de prendas y la revalorización de residuos abren oportunidades de empleo para sectores tradicionalmente excluidos, como mujeres en situación de vulnerabilidad o comunidades rurales.
- Articulación de actores: Alianzas entre academia, gobiernos locales, ONGs y empresas permiten escalar proyectos de economía circular que nacen como iniciativas locales o barriales. El trabajo en red y la transferencia de conocimiento son claves.

Sistematización de aprendizajes

La comparación entre iniciativas europeas y latinoamericanas permite identificar factores habilitantes comunes en los casos exitosos:

- Apoyo institucional o normativo claro.
- Acceso a información técnica y mercados sostenibles.
- Participación activa de los consumidores.
- Procesos de formación continua.
- Diseño de indicadores de circularidad y medición de impacto.

Al mismo tiempo, se evidencia que no hay una única forma de aplicar la economía circular, sino que esta debe adaptarse al contexto socioterritorial, los materiales disponibles, los saberes locales y las capacidades productivas del entorno.

Rol de la política pública

Un elemento transversal en la discusión es el rol estratégico del Estado como regulador, financiador y educador. En la mayoría de los casos analizados, la ausencia de marcos legales específicos o de incentivos económicos limita el crecimiento de iniciativas circulares.

- Se requiere avanzar hacia normas técnicas específicas para reciclaje textil, estándares de ecodiseño y exigencias de etiquetado sostenible.
- Es fundamental promover la responsabilidad extendida del productor (REP) en el sector textil, tal como ocurre en sectores como baterías o electrodomésticos.
- Se deben establecer programas públicos de compra sostenible, donde el Estado consuma productos circulares para dar el ejemplo y abrir mercados.

Conclusión de la discusión

La economía circular en la industria textil no es una utopía ni una imposición externa, sino una vía de transformación urgente y estratégica. Aunque los desafíos son reales y profundos, los casos analizados muestran que es posible avanzar de manera progresiva, creativa y adaptativa. Pero este camino exige decisión, colaboración y visión de largo plazo.

Conclusiones

Se sintetizan los hallazgos más importantes del libro, destacando la viabilidad y los beneficios de integrar la economía circular en la industria textil. También se plantean las principales reflexiones sobre cómo los diferentes actores pueden colaborar para acelerar estos procesos, y se subraya el papel crucial de la innovación, la formación y la normativa en el avance hacia modelos sostenibles.

La discusión revela que los casos de estudio en economía circular en residuos automotrices y agroindustriales en el sector de construcción son ejemplos integradores que conjugan innovación tecnológica, sustentabilidad ambiental, desarrollo económico y bienestar social. Sin embargo, su éxito depende de una gestión coordinada entre actores públicos, privados y comunidad, así como de un marco normativo robusto y adaptable, que afiance la confianza y aceptación del mercado.

Este análisis también resalta que la transición hacia una economía circular en la construcción requiere que estos procesos sean escalables, replicables y sustentables en el tiempo, contribuyendo así a la mitigación del impacto ambiental y a la generación de valor en la economía regional y nacional.

Las conclusiones del documento reflejan la importancia y la aplicación de la ingeniería y economía circular en diferentes ámbitos, especialmente en sectores como la construcción,

la automotriz y la agroindustrial, considerando que estos sectores son altamente consumidores de recursos y generadores de residuos. A continuación, se presenta un análisis detallado de las principales conclusiones extraídas del texto:

- La economía circular surge como una respuesta efectiva a los problemas de sostenibilidad ambiental, promoviendo ciclos cerrados de materiales y recursos, con el fin de reducir el impacto ecológico de los procesos productivos 116 116.
- La implementación de estrategias de economía circular en diversos sectores ha demostrado ser exitosa para optimizar el uso de recursos, reducir residuos y promover modelos de negocio sostenibles, lo cual contribuye a la conservación del medio ambiente y a la inclusión social 116 55.
- La integración de conceptos de economía circular en la formación académica de ingeniería es fundamental para preparar profesionales capaces de diseñar y gestionar procesos productivos sostenibles, alineados con las tendencias globales y las normativas nacionales e internacionales 116 112.
- En el contexto colombiano, el país ha avanzado en la formulación y adopción de políticas, estrategias y marcos normativos que promueven la economía circular como parte del desarrollo sostenible, incluyendo la gestión integral de residuos sólidos y la incorporación de las 9 R (rethink, reduce, reuse, repair, restore, remanufacture, redesign, recycle, recover) 50.
- La normalización y certificación, a través de normas como la BS 8001 y otras guías internacionales, facilitan la medición, control y mejora continua de las prácticas de economía circular en las empresas, proporcionando un marco de referencia para alinear sus procesos con los objetivos de sostenibilidad 48 47.
- La evaluación de casos de estudio en materiales de construcción, así como en residuos provenientes de sectores automotriz y agroindustrial, muestra que la valorización de residuos y la responsabilidad extendida son estrategias viables para cerrar ciclos de materiales y promover la recuperación de valor en los procesos productivos 55.
- La tendencia actual, incluyendo las recientes crisis globales como la pandemia de COVID-19, ha evidenciado la necesidad de sistemas económicos más resilientes y sostenibles, en los cuales la economía circular puede jugar un papel crucial en la diversificación de materias primas y en la gestión eficiente de los recursos 116.
- La medición de impacto y la aplicación de indicadores precisos son esenciales para evaluar los logros en sostenibilidad y para orientar las decisiones empresariales hacia prácticas más responsables y circulares. La adopción de normativas y estándares adecuados facilita este proceso 112 107.
- En síntesis, las conclusiones del documento enfatizan que la transición hacia modelos económicos circulares representa una oportunidad concreta para

mejorar la sostenibilidad de los procesos productivos, reducir la huella ecológica, potenciar la innovación y fortalecer la inclusión social. La formación, la regulación, el uso de normas internacionales y la valoración de casos reales son elementos clave para avanzar en esta dirección, especialmente en países como Colombia, donde el marco normativo está en desarrollo y existen fundamentos sólidos para su promoción 116 50.

Recomendaciones:

Se ofrecen sugerencias prácticas para actores del sector: empresas, gobiernos, instituciones académicas y consumidores. Entre ellas, la importancia de adoptar tecnologías limpias, fortalecer las políticas públicas de apoyo, promover la investigación y el desarrollo, impulsar la sensibilización de los consumidores y facilitar alianzas estratégicas que aseguren una transición efectiva hacia una economía circular en la industria textil.

- Fomentar la inclusión de la economía circular en los currículos académicos y en la formación de ingenieros y profesionales relacionados. Es fundamental que las universidades y centros de educación superior integren en sus programas académicos conceptos, principios y estrategias de economía circular. Esto permitirá formar profesionales con competencias orientadas a diseñar procesos sostenibles, promover la innovación en el uso de recursos y gestionar residuos de manera eficiente, adaptándose a las tendencias globales de sostenibilidad 116 112.
- Desarrollar e implementar políticas nacionales e internacionales que respalden la economía circular. Los gobiernos deben promover marcos regulatorios y normativos que incentiven prácticas circulares, estableciendo lineamientos claros y metas concretas. La actualización y fortalecimiento de leyes, como el ejemplo de Colombia con su Estrategia Nacional de Economía Circular y la gestión de residuos sólidos, son pasos cruciales. Además, es recomendable promover alianzas público-privadas que favorezcan la inversión en tecnologías sostenibles y la innovación 51 50.
- Adoptar estándares y normas internacionales para la medición, control y certificación de prácticas circulares. El uso de normativas como la BS 8001 u otras guías internacionales proporciona un marco de referencia para cuantificar y verificar avances en economía circular. La normalización ayuda a garantizar la calidad y sostenibilidad en los procesos, además de facilitar el reconocimiento y la comparación de buenas prácticas a nivel global 48.
- Fomentar la investigación y los estudios de casos aplicados en materiales de construcción y otros sectores. Es importante continuar generando conocimiento a través de estudios de casos exitosos donde se haya valorizado residuos, como los provenientes de la industria automotriz y agroindustrial.

La investigación contribuye a identificar nuevas oportunidades, optimizar procesos y validar la viabilidad técnica y económica de soluciones circulares específicas 55.

- Impulsar la innovación tecnológica y la recuperación de recursos en los procesos productivos. Es necesario desarrollar tecnologías de punta que permitan cerrar los ciclos de materiales, incrementar la recuperación de nutrientes y facilitar la reutilización de residuos. La innovación en materiales de construcción, por ejemplo, puede incluir el empleo de residuos reciclados o sustitutos sostenibles, reduciendo el uso de recursos vírgenes 116 107.
- Promover campañas de sensibilización y educación dirigidas a todos los actores de la cadena de valor Concientizar a consumidores, empresas y ciudadanos sobre los beneficios y las responsabilidades vinculadas a la economía circular generando un cambio cultural que favorece prácticas sostenibles. La información y la sensibilización son clave para crear una demanda de productos y servicios ecológicos y facilitar la adopción de modelos circulares 116.
- Implementar sistemas de medición de impacto y evaluación continua para gestionar eficientemente las acciones y verificar los avances, es recomendable diseñar e implementar indicadores que midan aspectos económicos, sociales y ambientales relacionados con la economía circular. La evaluación constante permite ajustar las estrategias y garantizar el cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad 112 111.
- Fomentar la colaboración entre sector público, privado y academia. Dado que la transición hacia la economía circular requiere esfuerzos conjuntos, se recomienda promover espacios de diálogo, alianzas estratégicas y proyectos colaborativos que integren diferentes actores. Esto facilita la transferencia de conocimientos, recursos y tecnologías, acelerando la implementación de soluciones sostenibles 50.
- Priorizar la valorización de residuos y la gestión eficiente de recursos en procesos industriales Es esencial impulsar procesos que permitan transformar residuos en materias primas secundarias, reducir la generación de residuos y promover modelos de producción y consumo responsables. La valorización, tanto en la gestión de residuos como en la recuperación de nutrientes, ayuda a reducir la extracción de recursos naturales y mitiga el impacto ambiental 107.
- Incentivar el financiamiento y apoyo técnico a proyectos innovadores en economía circular. La disponibilidad de financiamiento, subsidios o incentivos fiscales facilita el desarrollo de proyectos piloto y experimentales en diferentes sectores. La inversión en soluciones circulares contribuye a la sostenibilidad empresarial y a la rentabilidad a largo plazo, creando un ecosistema favorable para la innovación 116.

- En resumen, las recomendaciones apuntan a una estrategia integral que involucre educación, regulación, tecnología, investigación, sensibilización y colaboración. La adopción efectiva de estas acciones permitirá avanzar hacia procesos productivos sostenibles, resilientes y responsables con el medio ambiente, alineados con las metas internacionales y las realidades locales, especialmente en países como Colombia, que aún trabajan en la consolidación de su marco normativo y políticas específicas para la economía circular 116 51.

La transición hacia una economía circular en el sector textil requiere acciones estratégicas, articuladas y progresivas por parte de todos los actores de la sociedad. A partir de los hallazgos teóricos, los casos de estudio y la discusión desarrollada en este libro, se presentan a continuación recomendaciones estructuradas según los principales agentes involucrados.

Para las empresas del sector textil

Adoptar el ecodiseño como estándar de innovación

Incorporar criterios de circularidad desde la etapa de diseño del producto: uso de materiales monocomponentes, facilidad de desmontaje, larga durabilidad, biodegradabilidad o reciclabilidad. Esto debe formar parte de la cultura de innovación.

Implementar modelos de negocio circulares

Fomentar nuevas formas de generar valor como:

- Alquiler de prendas.
- Venta de ropa usada certificada.
- Reacondicionamiento o upcycling de productos devueltos.
- Plataformas de intercambio o reventa entre usuarios.

Integrar la trazabilidad y transparencia en la cadena de valor

Desde la producción de fibras hasta el punto de venta, es necesario contar con sistemas que permitan rastrear el origen, proceso y destino de cada prenda. El uso de tecnologías como blockchain o QR ecológico puede ayudar a este propósito.

Capacitar al personal en economía circular

Formar a los trabajadores, supervisores y diseñadores en prácticas circulares, sostenibilidad, seguridad y tecnologías limpias.

Implementar logística inversa y recuperación postconsumo

Establecer puntos de acopio, campañas de devolución de prendas usadas y alianzas con recicladores o talleres de reparación.

Para el Estado y los gobiernos locales

Promulgar marcos normativos específicos para el sector textil circular

Legislar sobre:

- Ecodiseño obligatorio.
- Normas técnicas de reciclaje textil.
- Regulación del comercio de ropa usada.
- Certificación y etiquetado ambiental.

Implementar esquemas de responsabilidad extendida del productor (REP)

Obligar a las empresas a asumir la gestión postconsumo de sus productos textiles y financiar su recolección, clasificación y tratamiento.

Crear incentivos financieros y fiscales

Subvenciones, créditos verdes, compras públicas sostenibles y exoneraciones tributarias a empresas circulares pueden dinamizar la transformación del sector.

Invertir en infraestructura de economía circular

Construcción y gestión de centros de acopio, plantas de reciclaje textil, centros de reparación y hubs de innovación sostenible.

Sensibilizar a la ciudadanía mediante campañas nacionales

Desarrollar campañas masivas de educación ambiental textil, fomentando el consumo responsable y la reducción de residuos.

Para los consumidores

Adoptar hábitos de consumo responsables

Elegir prendas duraderas, producidas éticamente, con bajo impacto ambiental. Preferir reparar o modificar antes que desechar.

Rechazar el fast fashion y el uso innecesario de prendas

Reducir la frecuencia de compra impulsiva. Evaluar la necesidad real de cada adquisición.

Participar en redes de intercambio o reciclaje

Sumarse a plataformas comunitarias o iniciativas locales que promuevan la reutilización o el trueque de ropa.

Informarse y exigir transparencia

Solicitar a las marcas información sobre el origen de los materiales, condiciones laborales y estrategias de circularidad.

Para la academia e instituciones educativas

Incluir la economía circular en los planes de estudio

Incorporar contenidos de ecodiseño, sostenibilidad, innovación y modelos de negocio circulares en carreras como ingeniería textil, diseño de modas, administración, marketing y educación ambiental.

Promover la investigación aplicada

Financiar proyectos de investigación sobre reciclaje textil, nuevos materiales sostenibles, tecnologías limpias, residuos valorizables y percepción del consumidor.

Establecer alianzas con la industria y el Estado

Desarrollar proyectos conjuntos, programas de pasantías, innovación abierta y laboratorios vivos (*living labs*).

Para la cooperación internacional y organismos multilaterales

Financiar la transición hacia la circularidad en países emergentes

A través de fondos verdes, asistencia técnica, cooperación sur-sur y programas de fortalecimiento de capacidades.

Facilitar transferencia tecnológica y buenas prácticas

Impulsar plataformas de intercambio de experiencias prósperas y casos de éxito a nivel mundial, con énfasis en escalabilidad y replicabilidad en territorios del sur global.

Apoyar marcos regulatorios armonizados

Promover acuerdos regionales y normas técnicas comunes para facilitar el comercio justo, la certificación ambiental y la gestión transfronteriza de residuos textiles.

Recomendaciones transversales

- Fomentar una cultura de sostenibilidad desde la infancia.
- Promover indicadores de circularidad e inclusión en los sistemas de evaluación del desempeño empresarial.
- Garantizar que las soluciones circulares también sean **socialmente justas**, evitando la exclusión de sectores vulnerables.
- Aplicar un enfoque territorial: la circularidad debe adaptarse a las realidades locales, aprovechando recursos, capacidades y saberes propios de cada comunidad.

Referencias

- Cortés García, F. J. (2020). *La Economía Circular: Ideas claves para la comprensión de un nuevo modelo de gestión de los recursos económicos*. Universidad Autónoma de Chile. ISBN digital: 978-956-8454-70-8.
- Fundación Ellen MacArthur. (2012). *Towards the Circular Economy*.
- McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*.
- Stahel, W. (2010). *The Performance Economy*.
- Benyus, J. (2002). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*.
- Ramírez Barredo, B., & Guerrero González-Valerio, B. (2024). Responsabilidad social corporativa, criterios ESG y su comunicación en el sector textil español. *European Public & Social Innovation Review*, 9, 1–20. <https://doi.org/10.31637/epsir-2024-897>.
- Robles-Camargo, J., Hincapié-Corredor, P., Ariza-Murillo, L. (2024). Caracterización de los residuos textiles posindustria en Bogotá. *Revista DYNA*, 91(232), pp. 166-171, April - June, 2024, ISSN 0012-7353 DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v91n232.112205>
- Sánchez Molina, J., Díaz García, J. I., & Sánchez Zúga, J. V. (2022). *Ingeniería y economía circular: combinación exitosa para la sostenibilidad (1ª ed.)*. Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones

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.

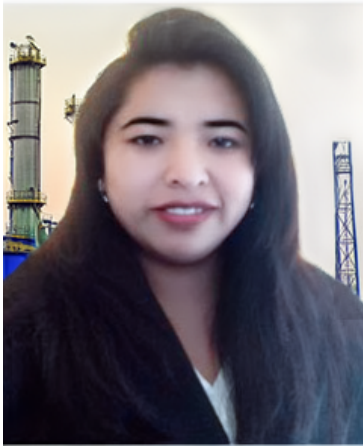
Mg. Ing. Nancy Elizabeth Barreda de Miranda



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

