Economía circular desde la ingeniería:
Un modelo para el fortalecimiento de pymes recicladoras

Óscar Gildardo Hernández Alomia
Grupo de investigación: Fénix



Escuela de Ciencias Administrativas, Contables, Económicas y de Negocios (ECACEN)

Sello Editorial
Universidad Nacional
Abierta y a Distancia

Economía circular desde la ingeniería:
un modelo para el fortalecimiento de pymes recicladoras

Autor
Óscar Gildardo Hernández Alomia

Grupo de investigación
Fénix

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD)

Jaime Alberto Leal Afanador
Rector

Constanza Abadía García
Vicerrectora académica y de investigación

Leonardo Yunda Perlaza
Vicerrector de medios y mediaciones pedagógicas

Édgar Guillermo Rodríguez Díaz
Vicerrector de servicios a aspirantes, estudiantes y egresados

Leonardo Evemeleth Sánchez Torres
Vicerrector de relaciones intersistémicas e internacionales

Martha Viviana Vargas Galindo
Vicerrectora de inclusión social para el desarrollo regional y la proyección comunitaria

Sandra Rocío Mondragón Arévalo
Decana Escuela de Ciencias Administrativas, Contables, Económicas y de Negocios (ECACEN)

Juan Sebastián Chiriví Salomón
Líder Nacional del Sistema de Gestión de la Investigación (SIGI)

Martín Gómez Orduz
Líder Sello Editorial UNAD

338.6048
H557

Hernández Alomia, Óscar Gildardo
Economía circular desde la ingeniería: un modelo para el fortalecimiento de pymes recicladoras / Óscar Gildardo Hernández Alomia. -- [1.a ed.]. -- Bogotá: Sello Editorial UNAD/2026. (Grupo de investigación: Fénix)
ISBN: 978-958-7857-55-1
e-ISBN: 978-628-7857-56-8
1. Economía circular 2. Ingeniería de procesos 3. Empresas recicladoras 4. Pequeñas y medianas empresas 5. Gestión de residuos 6. Sostenibilidad 7. Innovación I. Hernández Alomia, Óscar Gildardo.

Catalogación en la publicación – Biblioteca Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Economía circular desde la ingeniería: un modelo para el fortalecimiento de pymes recicladoras

Autor:
Óscar Gildardo Hernández Alomia,
Grupo de investigación: Fénix

ISBN: 978-958-7857-55-1
e-ISBN: 978-628-7857-56-8

Escuela de Ciencias Administrativas y Contables (ECACEN)

©Editorial
Sello Editorial UNAD
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Calle 14 sur No. 14-23
Bogotá, D.C.

Mayo de 2026

Corrección de textos: Lina González–Hipertexto
Diagramación: Nancy Barreto B.
Edición integral: Hipertexto–Netizen

Cómo citar este libro: Hernández Alomia, Ó. G. (2026). *Economía circular desde la ingeniería: un modelo para el fortalecimiento de pymes recicladoras*. Sello Editorial UNAD. https://doi.org/10.22490/UNAD.9786287857568

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons – Atribución – No comercial – Sin Derivar 4.0 internacional.
https://co.creativecommons.org/?page_id=13.



Reseña del libro

El libro Economía circular desde la ingeniería: un modelo para el fortalecimiento de pymes recicladoras presenta una propuesta estructurada e innovadora que orienta a micro, pequeñas y medianas empresas del sector reciclador a garantizar su sostenibilidad y a ser agentes de cambio mediante la ingeniería de procesos. El crecimiento descontrolado de los residuos plásticos exige repensar modelos productivos e integrales de economía circular, adaptados al contexto nacional, en el que persisten altos índices de informalidad y baja innovación, a pesar del aporte del sector al desarrollo económico local y a la sostenibilidad ambiental.

El libro es el resultado de un proceso de investigación doctoral, desarrollado bajo un enfoque que integra herramientas cualitativas y cuantitativas para diagnosticar, diseñar y validar un modelo integral de economía circular aplicado al contexto, lo que visibiliza una propuesta operativa, replicable y adaptativa a diversos entornos.

Constituye una obra de siete capítulos que aborda desde los fundamentos teóricos de la economía circular, la sostenibilidad y la ingeniería de procesos hasta la aplicación práctica del modelo diseñado y las recomendaciones pertinentes para su replicabilidad.

Esta obra no es solo una publicación académica e investigativa; es una herramienta de carácter estratégico que, por su claridad conceptual y solidez metodológica, logra transformar los entornos a partir de modelos productivos más sostenibles mediante la aplicabilidad de la ingeniería de procesos. Altamente recomendable para investigadores, académicos, tomadores de decisiones, formuladores de políticas públicas, empresarios, profesionales y estudiantes.

Un libro que transforma residuos en oportunidades y procesos en soluciones para un sector más circular.

Reseña del autor

Soy doctor en Ingeniería de Procesos, docente universitario e investigador comprometido con la generación de conocimiento aplicado al desarrollo sostenible, la productividad organizacional y la transformación empresarial. Mi trayectoria académica se ha orientado al estudio de soluciones integrales que articulan ingeniería, innovación y responsabilidad social frente a los desafíos contemporáneos.

He desarrollado experiencia en docencia superior, formulación y evaluación de proyectos, investigación científica y acompañamiento a procesos de mejoramiento académico e institucional. Asimismo, he trabajado en iniciativas relacionadas con fortalecimiento curricular, gestión organizacional y análisis estratégico en diferentes contextos.

Este libro surge como resultado de mi proceso doctoral y representa años de estudio, reflexión y trabajo de campo alrededor del papel de las pequeñas y medianas empresas recicladoras en la transición hacia modelos productivos más sostenibles. A través de esta obra propongo un modelo de economía circular fundamentado en principios de ingeniería de procesos, con enfoque práctico, contextualizado y replicable.

Mi propósito como autor es contribuir con herramientas útiles para investigadores, empresarios, estudiantes y tomadores de decisiones interesados en construir organizaciones más eficientes, responsables e innovadoras.

Declaración sobre el uso de la IA

Durante el proceso de elaboración del presente documento, no se ha utilizado inteligencia artificial generativa para la creación de contenido académico, ideas, argumentos, ni para la redacción de secciones completas. El desarrollo conceptual, analítico y metodológico del trabajo ha sido producto exclusivo de mi autoría.

No obstante, se hizo uso de herramientas de asistencia lingüística automatizada, como correctores gramaticales y revisores de estilo, con el único propósito de optimizar aspectos de puntuación, ortografía y redacción formal, sin alterar el contenido ni comprometer la originalidad o la propiedad intelectual del texto.

Esta práctica se enmarca en los lineamientos éticos institucionales y responde al compromiso con la calidad académica, la transparencia y la integridad en el desarrollo de procesos investigativos.



Contenido

Reseña del libro 5

Reseña del autor 6

Declaración sobre el uso de la IA 7

Prefacio 15

Prólogo 17

Introducción 19

Capítulo 1. Economía circular, sostenibilidad e ingeniería de procesos: bases para un modelo aplicable 23

Economía circular 24
Desarrollo sostenible 32
- Acceso a la financiación 33
- Infraestructura tecnológica 34
- Capacitación y recursos humanos 34
- Políticas y regulaciones 34
- Conciencia y cultura empresarial 35
- Mercado y demanda 35

Ingeniería de procesos 36

Capítulo 2. Tendencias investigativas y brechas en economía circular para pymes 39

Investigaciones previas en economía circular aplicadas a pyme 41
Modelos similares en América Latina y Europa 46
Brechas de economía circular aplicadas a pymes 49

Capítulo 3. Diagnóstico estratégico de las pymes recicladoras de plástico en Colombia 51

Caracterización de la producción de plásticos 52
Caracterización de pymes en Colombia y en el mundo 56
Problemáticas comunes de las pymes 59
Claves del valor compartido en pymes 62
- Conectar capacidades con sostenibilidad: claves del valor compartido 63
- Valor social del reciclaje en territorios periféricos: el caso Bogotá 63

Capítulo 4. Análisis de resultados y evidencias para el modelo circular 65

Fundamentación metodológica 66
Análisis cualitativo general 68
Gerentes de operaciones: capacidad, tecnología, recolección, colaboración 68
Empleados: beneficios sociales, desafíos y sostenibilidad futura 71
Resultados por dimensión 74
Dimensión ecológica 75
Resultados cuantitativos 75
Evidencia cualitativa vinculada 76
Dimensión económica 76
Resultados cuantitativos 77
Evidencia cualitativa vinculada 77
Dimensión social 78
Resultados cuantitativos 79
Evidencia cualitativa vinculada 79
Dimensión tecnológica 80
Resultados cuantitativos 80
Evidencia cualitativa vinculada 81
Dimensión transversal 81
Resultados cuantitativos 82
Evidencia cualitativa vinculada 82
Validación empírica del modelo 83
Análisis bivariado de relaciones entre variables 83
Relaciones intradimensionales. 83
Dimensión económica 83
Dimensión ecológica 83
Dimensión social 84
Relaciones interdimensionales 84
Tecnológica↔transversal 84
Colaboración↔satisfacción global 84
Análisis de correlación de Spearman entre dimensiones 87
Árbol de decisión y clústeres 88
Análisis de clústeres 89
Alfa de Cronbach, varianza y asimetría 91
Marco integrador final 92
Validación cruzada de hipótesis 93
Hipótesis H1: prácticas ecológicas y sostenibilidad operativa 94
Hipótesis H2: circularidad y gestión estructurada 94
Validación parcial 94
Hipótesis H3: impacto social y satisfacción 94
Hipótesis H4: innovación tecnológica y eficiencia 94
Hipótesis H5: articulación interempresarial y percepción del modelo 95
Hipótesis general: el modelo circular mejora el desempeño integral 95
Relación con objetivos y preguntas 96

Capítulo 5. Modelo de economía circular 99

Justificación del modelo 101
Objetivo del modelo 102
Componentes del modelo de economía circular 102
Dimensión ecológica: regenerar desde los residuos 102
Dimensión económica: Circular con rentabilidad 103
Dimensión social: circularidad con dignidad 104
Dimensión tecnológica: eficiencia con innovación 104
Dimensión transversal: gobernanza, normatividad y redes 105
Modelo ajustado 105
Implementación operativa y seguimiento de indicadores 106
Evaluación y retroalimentación para el siguiente ciclo 107
Representación visual del modelo 108
Aplicación del modelo en contextos reales 112
Resultados del árbol de decisión *Random Forest* 114
Procesos estratégicos del modelo 116
Planificación y análisis inicial 117
Identificación de oportunidades 118
Mejora de procesos 119
Desarrollo del plan de implementación 120
Asignación de responsabilidades 120
Cronograma 121
Presupuesto 122
Capacitación y formación 123
Monitoreo y evaluación 123
Validación del modelo propuesto 124
Conclusiones del capítulo 125
Valor agregado: de la ingeniería a la sostenibilidad territorial 126
Valor social, económico y ambiental del modelo 126
Contribuciones del modelo de economía circular 127
Contribución estratégica del modelo circular 128
Fortalecimiento del modelo: aplicación, indicadores y mejora continua 128

Conclusiones y recomendaciones 129
Conclusiones 129
Líneas de investigación futuras 133
Recomendaciones 134

Referencias 137

Lista de tablas

Tabla 1. Normativa de gestión frente a materiales plásticos 54

Tabla 2. Escala tipo Likert 74

Tabla 3. Resultados cuantitativos dimensión ecológica 75

Tabla 4. Resultados cuantitativos dimensión económica 77

Tabla 5. Resultados cuantitativos dimensión social 79

Tabla 6. Resultados cuantitativos dimensión tecnológica 80

Tabla 7. Resultados cuantitativos dimensión transversal 82

Tabla 8. Análisis bivariado de correlaciones entre variables del modelo circular 85

Tabla 9. Relación dimensiones alfa de Cronbach e índices de alfa de Cronbach (α) 91

Tabla 10. Validación de hipótesis en relación con cada dimensión 92

Tabla 11. Triangulación de resultados para la validación cruzada de las hipótesis del modelo circular 95

Tabla 12. Relación entre hipótesis, objetivos, preguntas y dimensiones del modelo circular 97

Tabla 13. Variables e indicadores asociados al modelo circular 107

Tabla 14. Dimensiones, variables estratégicas y tipo de medición 112

Tabla 15. Asignación de responsabilidades en la implementación del modelo circular ajustado 121

Tabla 16. Cronograma de actividades para la implementación del modelo circular 121

Tabla 17. Presupuesto estimado por fase para la implementación del modelo circular 122

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de mariposa de economía circular 29

Figura 2. Mapa de calor de correlaciones Spearman entre variables del cuestionario 86

Figura 3. Correlación de Spearman entre dimensiones del cuestionario 88

Figura 4. Perfil promedio por clúster según dimensiones del modelo circular 90

Figura 5. Modelo circular sostenible para pymes recicladoras de plástico 109

Figura 6. Importancia relativa de las variables predictoras en el desempeño circular según el algoritmo *Random Forest* 115



Prefacio

El presente libro es el resultado de una investigación doctoral; por tanto, surge del trabajo académico y profesional en un proceso que articula fundamentos teóricos, un diagnóstico real del territorio y la validación empírica, orientada a responder a la necesidad de fortalecer las capacidades de las pequeñas y medianas empresas recicladoras, a partir de un modelo estratégico y operativo para transitar con éxito a modelos productivos sostenibles, con soluciones replicables y ajustadas al contexto colombiano.

A partir del diseño y la respectiva validación, se construye un modelo estructurado que integra principios de economía circular e ingeniería de procesos, adaptado al contexto colombiano y validado por actores reales del sector. Esto fortalece su aplicabilidad y pertinencia, generando una solución práctica y contextualizada que transforma los sistemas tradicionales de reciclaje mediante la articulación de diversas dimensiones de carácter técnico, organizacional y social.

Este libro se dirige a investigadores, académicos, estudiantes, empresarios y tomadores de decisiones interesados en promover transiciones sostenibles en diferentes sectores clave del desarrollo nacional. Más que una propuesta teórica, este libro constituye una herramienta útil para quienes apuestan por una economía circular con enfoque territorial, inclusivo y ambientalmente responsable.



Prólogo

En el siglo XXI, el desarrollo de los modelos productivos ve en la sostenibilidad una necesidad imperante ante los desafíos globales que determinan su permanencia y evolución, más allá de ser una opción. En este contexto, las empresas recicladoras de plásticos de pequeña y mediana escala juegan un papel esencial a la hora de abordar los retos ambientales y sociales que surgen por el consumo masivo y la gestión inadecuada de residuos. No obstante, es común que estas organizaciones trabajen en condiciones adversas, con recursos limitados, sin reconocimiento institucional y, en ocasiones, con procesos ineficientes de transición hacia modelos de economía circular.

En este contexto de desafíos y retos, el libro *Economía circular desde la ingeniería: un modelo para el fortalecimiento de pymes recicladoras* representa, quizás, una oportunidad de reflexión y, a su vez, de acción sobre el papel de las pequeñas y medianas empresas en la transición hacia un modelo económico circular, desde una mirada crítica que aborda un problema estructural: la exclusión operativa e institucional de un sector clave en la gestión de residuos plásticos.

El autor, mediante un proceso de investigación riguroso y sólido, desarrollan y validan un modelo integral de economía circular, sustentado en diferentes herramientas de la ingeniería de procesos, la gestión organizacional y la sostenibilidad. Por tanto, no es solo una propuesta conceptual; es una herramienta operativa que visibiliza la articulación del conocimiento científico con las necesidades reales del territorio colombiano y propone un camino viable de transformación de las pymes recicladoras de plástico.

El rasgo distintivo de esta obra radica en su capacidad para conjugar la teoría, el método y la práctica, logrando de este modo un equilibrio entre la rigurosidad académica y la aplicabilidad técnica. Su valor reside en que no se limita a la descripción del problema, sino que propone una ruta concreta hacia la solución, premeditada para ser replicable y adaptada a la realidad y diversidad del sector productivo de nuestro país.

Este libro debe ser leído por quienes conciben la sostenibilidad como un proceso sistémico y no como una meta aislada. Investigadores, formuladores de políticas públicas, empresarios, académicos y estudiantes encontrarán en este documento no solo una contribución al conocimiento, sino una guía de orientación para la acción transformadora.

Este libro, más que un documento académico, insta a reconsiderar las prácticas industriales y a avanzar hacia modelos productivos más equitativos, regenerativos y resilientes, desde una perspectiva de la ingeniería con sentido social y ambiental.



Introducción

La gestión inadecuada de los residuos plásticos de un solo uso y de corta duración constituye uno de los desafíos ambientales más urgentes del siglo XXI, debido a su creciente producción, baja degradabilidad y alto impacto de amenaza en la salud humana, los ecosistemas y su biodiversidad. En consecuencia, estos materiales liberan compuestos tóxicos que causan daño ambiental al desecharse en vertederos, mares y suelos (Lau et al., 2020; Torres-Guevara et al., 2021).

Algunas estadísticas establecen que, desde 1980, el volumen de recursos materiales extraídos y consumidos ha aumentado un 60 % a nivel mundial, por lo que se estima que hacia 2060 el consumo de plásticos podría triplicarse (Organization for Economic Cooperation and Development, 2022), representando un problema de alto riesgo de afectación al medioambiente y al bienestar de las futuras generaciones, por lo cual requiere medidas de carácter correctivo.

Por tanto, la economía circular surge como una alternativa de carácter estratégico que facilitará la transición de las pequeñas y medianas empresas hacia modelos más sostenibles, a partir de la incorporación de principios como la reducción, reutilización, reciclaje y regeneración de materiales (Geissdoerfer et al., 2017; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022b)

De esta manera, en el contexto de los países latinoamericanos como Colombia, las pequeñas y medianas empresas (pymes) del sector del reciclaje de plásticos cumplen un rol fundamental en la atenuación del impacto ambiental al mitigar su efecto y lograr la recuperación de materiales. Sin embargo, al mismo tiempo, deben hacer frente a las limitaciones estructurales que condicionan su capacidad de transformación, entre las que se encuentran diversas variables como el alto grado de informalidad, la baja tecnificación, el acceso limitado a financiación y la carencia de articulación con las políticas públicas y los marcos normativos vigentes (De Miguel et al., 2021; Padilla-Rivera et al., 2020). Estas limitaciones afectan su sostenibilidad en el territorio, ya que entorpecen su contribución efectiva para el cumplimiento de los diversos compromisos establecidos en relación con el medioambiente.

Es así como se establecen acciones que pueden ser respuesta a los diferentes desafíos, a partir de la identificación de modelos integrales de economía circular que sean

robustos en términos conceptuales y que cuenten con viabilidad técnica y operativa. Es así como la ingeniería de procesos brinda un marco metodológico riguroso en la optimización de operaciones, la sistematización de flujos de materiales y la mejora de la eficiencia organizacional, elementos clave para el fortalecimiento de las pymes recicladoras de plástico en el país (Flórez Rendón y Cogollo Flórez, 2017; Loayza y Silva Meza, 2013).

Este libro exterioriza el diseño, desarrollo y validación de un modelo de economía circular encaminado al fortalecimiento de pymes recicladoras de plásticos en Bogotá, a través de instrumentos de ingeniería de procesos y un enfoque metodológico secuencial, con integración de herramientas cualitativas y cuantitativas. La investigación doctoral se basó en una revisión crítica del estado del arte, un diagnóstico territorial detallado y el análisis de datos obtenidos mediante entrevistas, instrumentos semiestructurados y validación empírica, triangulados a través del juicio de expertos.

El objetivo principal de esta investigación es diseñar un modelo de economía circular, fundamentado en los principios de la ingeniería de procesos (sistematización, optimización, control de procesos y mejora continua), como alternativa para promover el desarrollo sostenible en las pymes recicladoras de plásticos ubicadas en Bogotá, teniendo en cuenta dimensiones como la ecológica, económica, social, tecnológica y transversal.

Entre sus objetivos específicos se destacan: analizar las percepciones, barreras y oportunidades del sector; identificar factores clave que fundamenten el diseño de un modelo de economía circular; evaluar la eficiencia operativa a partir de la gestión de procesos, infraestructura y el uso de tecnologías limpias; construir un modelo adaptado de economía circular que articule las dimensiones y alinee los principios de ingeniería de procesos; y validar el modelo circular ajustado mediante la triangulación de datos empíricos, referentes teóricos y juicio de expertos, con el fin de garantizar su pertinencia, coherencia interna y aplicabilidad contextual en pymes recicladoras de plásticos en Bogotá.

La hipótesis general postula que la implementación de un modelo de economía circular, basado en principios de ingeniería de procesos, mejora el desempeño integral de las pymes recicladoras de plásticos y promueve su contribución al desarrollo sostenible. Esta postulación se somete a validación mediante la integración de técnicas como el modelado temático cualitativo, el análisis de árboles de decisión y el uso de algoritmos como Random Forest, permitiendo una visión robusta, contextual y replicable centrada en las dimensiones estratégicas.

La estructura del libro se compone de cinco capítulos que exploran antecedentes, barreras, estrategias y modelos de economía circular aplicables al sector; e integran los hallazgos cuantitativos y cualitativos con análisis estadístico y narrativo, así como la presentación del modelo propuesto, validado empíricamente y argumentado desde

una perspectiva estratégica. Finalmente, expone las conclusiones, limitaciones, recomendaciones y líneas de investigación futura.

Este libro es un instrumento de alto valor para investigadores, académicos, profesionales, empresarios y responsables de políticas públicas, así como para estudiantes; contribuiría al fortalecimiento institucional y a su transformación en prácticas productivas, en el marco del desarrollo e implementación de acciones alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, desde una perspectiva técnica, crítica y aplicada.

El modelo planteado tiene el objetivo de intentar cerrar vacíos en la literatura existente, tanto en el componente teórico referente a teorías como en las realidades; es decir, en el componente operativo, aportar soluciones prácticas para fortalecer el rol de las pymes recicladoras como agentes de cambio clave en la transición hacia un modelo de economía circular, inclusivo y resiliente.

La economía circular surge como una alternativa de carácter estratégico que facilitará la transición de las pequeñas y medianas empresas hacia modelos más sostenibles, a partir de la incorporación de principios como la reducción, reutilización, reciclaje y regeneración de materiales.





Capítulo 1

Economía circular, sostenibilidad e ingeniería de procesos: bases para un modelo aplicable



Este capítulo establece los fundamentos conceptuales que sustentan el diseño de un modelo de economía circular aplicable a las pymes. En esta sección se examinan los pilares teóricos relacionados con la economía circular, la sostenibilidad empresarial y la ingeniería de procesos, a fin de comprender el potencial que tienen como agentes estratégicos en la transición hacia modelos productivos más sostenibles.

La relevancia de este análisis radica en el agravamiento del impacto ambiental generado por residuos plásticos de corta vida útil y la necesidad urgente de rediseñar los sistemas productivos bajo un enfoque sistémico, eficiente e inclusivo, a través de una ruta de carácter metodológico que articule lo teórico con lo práctico e integre los principios de la economía circular y la ingeniería de procesos, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, y que tiene como fin optimizar las operaciones y la competitividad de las pymes, brindando de esta forma una solución innovadora para un sector que, por tradición histórica, ha sido excluido del desarrollo industrial sostenible.

Economía circular

La economía circular surge como una alternativa paradigmática al modelo lineal de producción y consumo predominante. Este último, históricamente, se ha caracterizado por la lógica de extraer, transformar, usar y desechar todo tipo de materiales, siendo responsable de la intensificación del impacto ambiental global, enmarcado en problemáticas de sobreexplotación de recursos, producción excesiva de residuos y emisión de gases de efecto invernadero (Millar et al., 2019).

En contraposición, la economía circular promueve una visión sistémica, en la que se busca desvincular el crecimiento del consumo desmedido de recursos finitos, así como optimizar su uso, extendiendo la vida útil de los productos, lo que minimiza la generación de residuos y promueve el cierre del ciclo del material, en función de los principios de regeneración de los ecosistemas naturales, el diseño libre de residuos y el mantenimiento del valor de los materiales en uso (Ellen MacArthur Foundation, 2015; Kirchherr et al., 2017).

Esta concepción remonta sus orígenes a diversas corrientes de pensamiento sobre la década de 1970, como el diseño regenerativo, la economía de servicio funcional, el concepto *Cradle to Cradle* (de cuna a cuna), la ecología industrial, el biomimetismo,

la economía azul y la permacultura, así como en diversos planteamientos teóricos de autores como Pearce y Turner (1989), pioneros al considerar que el sistema económico tradicional opera bajo un esquema lineal, ignorando las restricciones físicas del planeta, en particular las relacionadas con la entropía y la capacidad de los ecosistemas para absorber residuos. Por tanto, en su obra *Economics of Natural Resources and the Environment* proponen un cambio en el paradigma económico convencional y se marcaría en la historia como los primeros ajustes integrativos hacia un modelo circular que integraría principios de la termodinámica como criterio regulador del uso y aprovechamiento de los recursos naturales.

El modelo de economía circular es conocido por su estructura, apoyada en tres principios básicos: eliminar residuos y contaminación desde el diseño, mantener productos y materiales en uso mediante la reutilización, reparación y reciclaje, y regenerar sistemas naturales (Circular Economy Coalition, 2022).

La implementación de estos principios establece estrategias para el abordaje de los retos y desafíos contemporáneos concernientes al cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la escasez de recursos, consolidando a la economía circular como un modelo de desarrollo sostenible integral.

Actualmente, la economía circular orienta la noción de eliminar el concepto de "fin de vida útil" de los productos, planteando dentro del sistema económico diversas estrategias enfocadas en procesos de reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de materiales, e incluye los procesos de producción, distribución y consumo (Espinoza, 2023). Este enfoque, como se ve, no se limita a un solo nivel de intervención, sino que permite operar de manera integrada en los diferentes niveles: micro, en los que se incluyen productos, empresas y consumidores; meso, que incluye parques ecoindustriales; y macro, que corresponde a ciudades, regiones y naciones.

Es importante destacar que este carácter multiescalar requiere marcos de análisis complejos que permitan comprender las dinámicas interdependientes entre dichos niveles. Como lo plantean los autores Hernández Alomia y Cortés Barreto (2025), un enfoque debe basarse en una dinámica de sistemas que permita examinar las transiciones circulares desde una perspectiva sistémica y prospectiva.

De esta manera, la economía circular se convierte, por una parte, en un modelo estratégico que transforma las bases tradicionales de producción y consumo y, por otra parte, resulta proporcionar soluciones innovadoras para enfrentar los retos de sostenibilidad del siglo XXI.

Algunos informes, como el *Circularity Gap Report* de Circle Economy (Circle Economy, 2019), visibilizan que, de los 100 000 millones de toneladas de recursos utilizados anualmente, solo el 8,6 % se reintegra en la economía, mientras que más del 90 % se desperdicia, evidenciando la necesidad de acelerar la transición hacia sistemas productivos verdaderamente circulares en los territorios.

En consecuencia, algunas de las implicancias de la economía circular en diversos sectores constituyeron las bases para distintos planes de acción y legislaciones más concretas en el mundo, como eje estructurante de sus estrategias de desarrollo. La UE, a través del Pacto Verde Europeo (European Commission, s. f.) y el Plan de Acción de Economía Circular (International Energy Agency, 2023), ha fijado metas ambiciosas para la transición ecológica en sectores como el plástico, el textil, la construcción y la electrónica.

En el continente africano, la Conferencia Ministerial Africana sobre Medio Ambiente de 2019 subrayó la relevancia de las iniciativas de economía circular para el progreso del continente, lo que ha llevado a crear e implementar estrategias, como la Alianza Africana de Economía Circular.

Igualmente, en los continentes de Asia y Oceanía, diferentes grupos de países se encuentran desarrollando investigaciones que les permitan encontrar formas para integrar este enfoque. De manera paralela, en América del Norte se están ejecutando estudios para establecer e implementar hojas de ruta nacionales en economía circular.

En cada región, "empresas de diversas dimensiones están comenzando a implementar acciones, cada vez más respaldadas y motivadas por los inversores, mientras que comunidades y ciudades locales se esfuerzan por llevar a cabo pruebas piloto de transformación sistémica" (Circular Economy Coalition, 2022, p. 11).

En América Latina ya se está trabajando desde el pensamiento colectivo de los *stakeholders* de la región, quienes, reunidos, declararon la importancia de la transición a la economía circular para ofrecer soluciones mediante la transformación sistémica, con base en tres acciones primordiales: una economía próspera que funcione con y para las personas; una economía próspera que sea buena para el clima; y una economía sana que trabaje a favor de la biodiversidad" (Circular Economy Coalition, 2022).

En países como Colombia se ha integrado esta perspectiva de la economía circular en la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC), que promueve acciones de producción sostenible, consumo responsable y articulación de cadenas de valor circulares (MinAmbiente, 2022).

Asimismo, organizaciones internacionales han generado propuestas y acciones complementarias al enfoque adoptado. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y su modelo Whole System Mapping surgen a través de una comprensión holística de los sistemas de producción y de consumo, en la que se integran, a lo largo del ciclo de vida de los productos, diversos flujos de materiales, energía, información y relaciones entre actores.

Lo anterior ofrece una visión global de los desarrollos y esfuerzos coordinados en todos los continentes, entramando lo conceptual y operativo en planes de acción que incluyen lo normativo.

Estos principios integran una serie de estrategias de estrecho contacto con diversos marcos conceptuales desarrollados en paralelo por diferentes disciplinas, como la ecoeficiencia, la ecología industrial y la economía ecológica, configurando así una fundamentación de carácter interdisciplinar y que, a su vez, genera modelos que integran lo técnico, lo ambiental y lo social en el desarrollo de diversos procesos productivos más sostenibles (Geissdoerfer et al., 2017), lo que comporta acciones prácticas operativas y una transformación estructural de la cultura empresarial vinculada a los modelos de negocio.

A través de autores como Murray et al. (2017), se fueron integrando nuevos elementos de carácter multidisciplinario, como la ecología industrial, el ecodiseño, el pensamiento sistémico y la resiliencia ambiental, lo cual fue fundamental para establecer la economía circular como una estrategia de alto potencial en la transición hacia modelos de desarrollo sostenible.

Desde este ámbito han ido surgiendo diferentes estrategias de implementación, como el enfoque 3R (reducir, reutilizar y reciclar), 6R (repensar, reparar y remanufacturar) o 7R, que añaden el término *renovar* (de la Cuesta González y Pardo, 2020). Estas no solo son estrategias de gestión y tratamiento de residuos, sino que promueven el rediseño de productos y servicios desde su concepción, maximizando su valor, extendiendo su ciclo de vida, con un mínimo de huella ambienta

La ecoeficiencia actualmente es ampliamente promovida por diversos sectores o empresas que transitan hacia la sostenibilidad, por su gran capacidad de producir más bienes y servicios con la menor cantidad de recursos, lo que la convierte en un principio clave, pues genera menor impacto ambiental, potencializa la innovación a través de la optimización de procesos y genera un cambio en el concepto, donde se visibiliza que el desempeño económico y ambiental no son mutuamente excluyentes (Flórez Rendón y Cogollo Flórez, 2017).

La ecología industrial, por su parte, plantea un enfoque sistémico que, imitando los flujos de materia y energía en los ecosistemas naturales en los diversos procesos industriales, reivindica la simbiosis entre las empresas de diferentes sectores, el aprovechamiento de los subproductos mediante la reutilización, el cierre de ciclos de los materiales, lo que ha permitido abordar y repensar la operación de las pymes mediante las cadenas de valor como sistemas metabólicos que se encuentran interconectados entre empresas en contextos urbanos e industriales (Murray et al., 2017).

Por otro lado, la economía ecológica incorpora principios como la equidad intergeneracional, los límites biofísicos del crecimiento económico y el bienestar colectivo, asentando el desarrollo económico dentro de los límites de la biósfera. En esta línea, los modelos circulares deben superar ideologías en las que se considere que la tecnología y la economía son soluciones de priorización a los problemas y desafíos ambientales, y avanzar hacia modelos regenerativos en los que toma alta relevancia el valor social y ambiental (Murray et al., 2017).

Esta perspectiva de integración fortalece la necesidad de trascender hacia enfoques de implementación. Los autores subrayan que la economía circular no debe limitarse a su dimensión técnica, sino que debe contemplar su aplicación en políticas públicas y modelos empresariales responsables, para alcanzar una transformación estructural efectiva y sostenible en el tiempo.

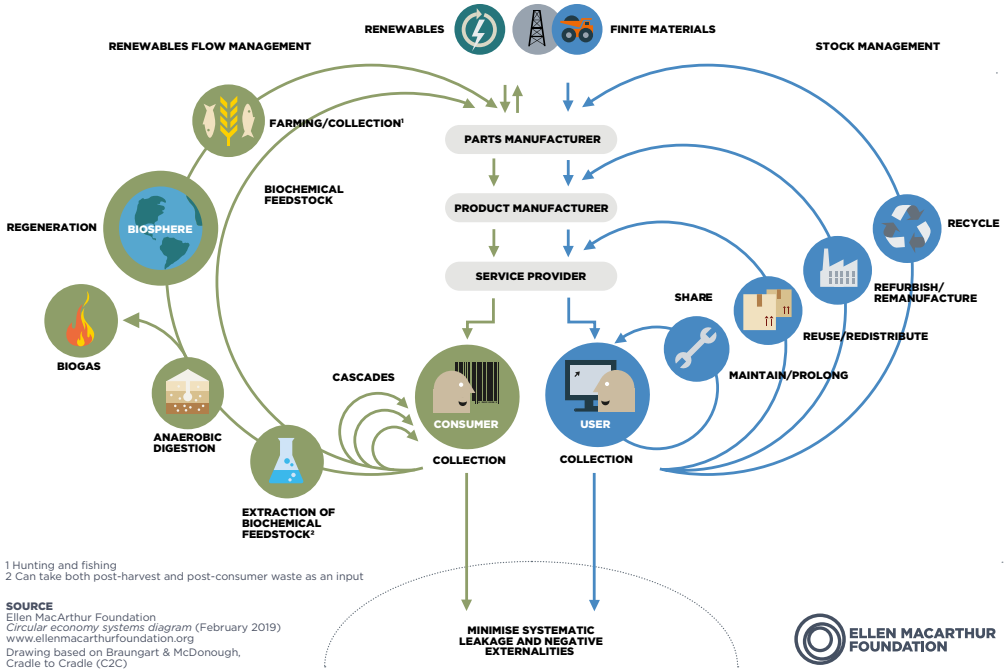
Por tanto, el propósito de este modelo es contribuir simultáneamente al mejoramiento de la calidad ambiental, al fomento de la prosperidad económica y a la promoción de la equidad social, generando beneficios tanto para las generaciones actuales como para las futuras. Según Kirchherr et al. (2017), la economía circular no solo se refiere a los modelos de negocio en cuanto a su innovación, sino que impulsa un cambio sistémico para alcanzar un desarrollo sostenible integral que favorezca la armonización de las dimensiones económica, social y ambiental.

No obstante, la transición hacia una economía circular se encuentra con importantes obstáculos. Algunos de ellos pueden ser las barreras culturales, organizativas y normativas, la resistencia al cambio, la baja o nula existencia de incentivos económicos y la escasa disponibilidad de tecnologías (Padilla-Rivera et al., 2024). Particularmente en el caso de las pymes, esto puede llegar a ser más complejo debido a su reducida capacidad instalada, acceso limitado a financiación y escasa articulación institucional.

Los principios de la economía circular en estas organizaciones podrían representar un gran avance en la reducción del impacto ambiental, en la generación de empleo verde y la mejora de la calidad de vida de los recicladores de base. Sin embargo, los modelos que se piensen y se propongan deberán adaptarse a su realidad operativa y de soluciones técnicas que resulten viables, así como al acompañamiento institucional y fortalecimiento de capacidades humanas y tecnológicas.

El "diagrama de mariposa" (Ellen MacArthur Foundation, 2019; World Economic Forum et al., 2016) se ha consolidado como una herramienta pedagógica y reconocida estratégicamente para representar los principios de la economía circular. Este modelo gráficamente ilustra los flujos de materiales a través de una serie de ciclos: el más relevante y amplio es, en términos generales, el ciclo técnico, mediante el cual se asumen los procesos de reutilización, reparación y remanufactura, y el ciclo biológico, el cual hace hincapié en los procesos de regeneración y compostabilidad de los recursos materiales. La estructura de este modelo proporciona una buena representación de la transición desde el esquema de los modelos lineales hacia sistemas de modelos circulares, permitiendo visualizar cómo es posible mantener el valor de los recursos el mayor tiempo posible dentro del sistema económico.

Figura 1. Diagrama de mariposa de economía circular



Nota. El diagrama del sistema de economía circular, conocido como *diagrama de mariposa*, ilustra el flujo continuo de materiales a través de dos ciclos principales: el técnico y el biológico.

Fuente: Ellen MacArthur Foundation (2019).

En la economía circular surge la necesidad de identificar modelos aplicados a la industria que planteen mecanismos para cerrar los ciclos de producción, minimizar la generación de residuos y fomentar el uso eficiente de los recursos. Estos modelos permiten transformar la lógica del enfoque tradicional, pasando de una venta de productos o recursos hacia una lógica basada en la prestación de servicios, lo cual permite maximizar el valor de uso de los recursos, prolongando así la vida útil de los mismos y reduciendo el consumo innecesario de materiales (Geissdoerfer et al., 2017; Johnstone, 2024). A continuación, se relacionan algunos de los modelos con mayor reconocimiento en estas nuevas lógicas de dinamismo e implementación:

- *Ecodiseño:* este modelo promueve el diseño y creación de productos de forma fusionada, teniendo en cuenta todos aquellos impactos identificados y considerando el impacto ambiental de los productos generados a lo largo de todo su ciclo de vida.
- *3R (Reducir, Reutilizar, Reciclar):* el modelo se caracteriza por centrar sus procesos en minimizar los residuos generados mediante el planteamiento de estrategias de reducción, reutilización y reciclaje.

- *Servitización:* este modelo añade servicios a la oferta de productos para generar mayor valor al cliente y favorecer la relación de uso sobre la propiedad.
- *Economía de la funcionalidad:* durante su proceso, el modelo prioriza el valor de uso de los diferentes productos mediante la prestación de servicios en lugar de la venta directa, enfocándose en la durabilidad y eficiencia.
- *Economía del desempeño:* garantiza el rendimiento del servicio durante su ciclo de vida, con mayor énfasis en la eficiencia y la sostenibilidad.
- *La economía del acceso* surge como una alternativa viable de alto potencial innovador frente al consumo tradicional, priorizando el uso compartido de bienes y activos por encima de la propiedad. Por este motivo, este modelo responde a la necesidad del consumo, pues se enfoca en reducir la sobreproducción, actuar en la optimización y utilización de recursos existentes, abriendo espacio a modelos de negocio inclusivos, con un alto sentido de responsabilidad ambiental (Atif et al., 2021).

De esta manera, la implementación y ejecución integrativa de estos enfoques representa un motor esencial en la transición desde el modelo económico lineal hacia un sistema que garantice la aplicación del modelo circular, esencialmente en aquellos sectores que se caracterizan por una alta demanda de recursos. Recientes y diversas investigaciones recalcan los beneficios de los modelos circulares por su asertividad en la disminución de impactos ambientales, el impulso hacia nuevas oportunidades de innovación y de un exponencial crecimiento económico.

De este modo, la integración entre los modelos representa mejoras incrementales desde un enfoque técnico o comercial y una transformación profunda en el campo cultural, donde el valor, la eficiencia y la regeneración adquieren prioridad frente al consumo desmedido y excesivo. Se considera, así, una transformación estratégicamente clave para



Los principios de la economía circular en estas organizaciones podrían representar un gran avance en la reducción del impacto ambiental, en la generación de empleo verde y la mejora de la calidad de vida de los recicladores de base.

las empresas que oscilan entre continuar alentando la competitividad en un entorno con mercados globales enfocados cada vez más en la sostenibilidad ambiental y social.

Por tanto, la identificación de modelos aplicables a la industria del plástico, tal como lo señalan Lee et al. (2020), debe contar con análisis que garanticen la compatibilidad con las prácticas de sostenibilidad y la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Asimismo, Johnstone (2024) sugiere que debe reforzar su estructuración metodológica a través de seis fases: iniciar, evaluar, idear, desarrollar, concretar y valorar. El autor ofrece una guía práctica, como el ecodiseño, que permite avanzar en la implementación progresiva de modelos circulares en empresas del sector plástico.

Es así como los autores Almeida-Guzmán y Díaz-Guevara (2020) destacan el posicionamiento garantizado de la economía circular y resaltan la importancia de reconocerla como una estrategia clave para alcanzar el desarrollo sostenible, subrayando a su vez la necesidad de ajustar los modelos productivos de tal forma que se maximice la eficiencia de la empresa en el uso de los recursos.

Igualmente, los autores Atif et al. (2021) destacan la importancia que tiene la adaptación efectiva de estrategias de economía circular de carácter global, ajustadas a brindar respuestas a la realidad local, teniendo en cuenta las necesidades del contexto y la diversidad de factores culturales, tecnológicos y económicos específicos, que establecen condicionantes sobre la gestión de residuos plásticos en cada país. Para el contexto colombiano, este planteamiento respalda la necesidad de personalizar estrategias de economía circular con el ánimo de facilitar la transición efectiva hacia modelos sostenibles de producción y de consumo.

En la actualidad, a nivel mundial, se observa una actividad económica orientada al aprovechamiento del uso regenerativo de los desechos, especialmente en los materiales plásticos, lo cual es una actividad innovadora (Muñoz-Vélez et al., 2018). Diversos ejemplos ilustran esta tendencia, destacando modelos circulares económicos para el futuro de las regiones, donde se acentúa la creación de un entorno en el que los recursos naturales se aprovechan y se regeneran en lugar de consumirse de manera insostenible, y donde las tradiciones culturales y contemporáneas se integran en favor de beneficios económicos, ambientales y sociales (Circular Economy Coalition, 2022).

Cabe señalar que los modelos circulares, desde esta perspectiva, permiten reconsiderar el funcionamiento de la economía y las sociedades, presentando un enfoque con relevancia global al desarrollar nuevas formas de producción y consumo, abarcando la cadena de producción y convirtiéndolos en sistemas integrados. En todos los continentes, diferentes actores, emprendedores, responsables de políticas, inversores, investigadores, educadores, ciudadanos y la sociedad en general impulsan iniciativas para materializar la economía circular. Por ejemplo, Ma et al. (2023) proponen un marco de clasificación para las políticas de residuos urbanos, luego de analizar ciudades en China que aplican la estrategia de “cero residuos”.

Para los stakeholders, la cooperación y la comunicación son fundamentales para facilitar el diseño y la evolución de una transición inclusiva hacia los modelos circulares en las pymes. Incluso consideran esencial la inversión de los diferentes sectores público y privado para el fortalecimiento de habilidades que promuevan el desarrollo del conocimiento y fomenten la capacidad de implementación de modelos circulares, ya sea en sectores nuevos o emergentes, o inclusive en la transformación de los existentes (Observatorio Empresarial para el Crecimiento Inclusivo, 2022).

Desarrollo sostenible

Los fundamentos conceptuales del desarrollo sostenible datan, quizá, del "informe Brundtland", conocido como *Nuestro futuro común* (World Commission on Environment and Development, 1987), en el que se abordaron temas como la sostenibilidad y el desarrollo sostenible. En él se propone un modelo de desarrollo sostenible que imponga límites al abuso en el manejo y uso de los recursos naturales, entendiendo la afectación negativa de la capacidad de la biósfera para asimilar las actividades humanas.

En este documento se define el desarrollo sostenible como aquel que busca garantizar que la humanidad "satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias" (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, 1987, p. 23). En otras palabras, el desarrollo sostenible es aquel que se manifiesta en un ecosistema específico, capaz de mantener su progreso de manera continua, preservando la vitalidad de sus componentes y su funcionamiento (Campuzano Fernández et al., 2011).

Por otra parte, la historia indica que el concepto de desarrollo sostenible habría sido planteado incluso antes que el informe de Brundtland, de manera retórica por el autor Thomas R. Malthus en su obra *Economics and Theory of Limits*, al resaltar que la percepción de sostenibilidad estará sujeta a la escasez de recursos que limita el crecimiento, por lo que podría, desde su percepción de sostenibilidad, ser considerado un pionero del tema (Del Saz, 2008).

En este contexto, autores como Espinoza (2023) sostienen que el éxito del término "desarrollo sostenible" no radica en su novedad, sino en su ambigüedad, señalando, en parte, que existen múltiples formas de interpretar el concepto de desarrollo sostenible y, al mismo tiempo, podría expresar un deseo bastante general sin ofrecer precisiones sobre su contenido o la manera de implementarlo.

Desde la perspectiva de la Organización de las Naciones Unidas (Noticias ONU, 2023), si se quiere un futuro mejor, el desarrollo sostenible implica cómo se debe vivir hoy, ocupándose de las necesidades presentes sin comprometer las oportunidades de las generaciones futuras de cumplir con sus propias necesidades. En consecuencia, un mundo más sostenible es necesario para la supervivencia social y del planeta común.

El concepto de desarrollo sostenible, como lo entiende la ONU (2023), se ha asumido en todo el mundo como una brújula orientadora. Este se refiere a los principios que permiten organizar el logro de los objetivos de desarrollo humano, preservando al mismo tiempo la capacidad de los sistemas naturales de proporcionar los recursos naturales y los servicios ecosistémicos de los que dependen las economías y las sociedades.

De igual modo, prestando especial atención a la protección de los bienes históricos y sitios culturales, el resultado deseado es una situación social que utilice las condiciones de vida y los recursos para seguir satisfaciendo las necesidades humanas, sin destruir la integridad y la estabilidad de los sistemas naturales.

En efecto, el desarrollo sostenible también puede definirse como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

Por tanto, su rol se articula en los tres pilares fundamentales: económico, social y ambiental. Este enfoque tiene una importancia significativa en los países en vías de desarrollo, donde las pymes cumplen una función estratégica.

Desde lo económico, se busca fomentar un crecimiento inclusivo y sostenible, generando empleos y promoviendo la innovación sin destruir los recursos naturales; desde lo social, garantizar el bienestar y la equidad social mediante el acceso universal a la educación, la atención médica y las oportunidades económicas; y, desde lo ambiental, proteger y restaurar el medioambiente, promover el uso sostenible de los recursos naturales y reducir la contaminación y el cambio climático (Noticias ONU, 2023).

Según la ONU y el Banco Mundial (Noticias ONU, 2021), las pymes recicladoras de plásticos enfrentan diversas variables que determinan su capacidad para adoptar prácticas sostenibles y avanzar hacia modelos circulares efectivos. Algunas variables clave para la sostenibilidad en pymes recicladoras son

Acceso a la financiación

Se reconoce como la disponibilidad de recursos financieros mediante fondos para realizar inversiones en tecnologías y procesos sostenibles. Sin embargo, ser capaz de medir las necesidades e inversiones financieras resulta complicado, dado que depende de las variables macroeconómicas, sectoriales y regulatorias (De Miguel et al., 2021).

A nivel global se han creado fondos y programas destinados a fomentar iniciativas para la implementación de modelos circulares. Un ejemplo es la iniciativa del Banco Europeo de Inversiones (BEI), cuyo objetivo es financiar proyectos en diversos sectores, como agricultura, industria, movilidad y gestión de residuos, promoviendo la implementación

de estrategias de economía circular mediante diversos préstamos, inversiones de capital y asistencia técnica.

Infraestructura tecnológica

De ser adecuada, hace posible la implementación y adopción de modelos circulares debido a la mejora y eficiencia de los procesos productivos (Kalmykova et al., 2018).

En Colombia, Iguarán Manjarrés y Campo Rivadeneira (2017) encuentran en las tecnologías modernas el mecanismo para optimizar las operaciones de las empresas recicladoras de plásticos, aumentar la calidad de los productos reciclados y automatizar procesos.

Las innovaciones recientes son tecnologías de separación avanzada que se desarrollan mediante inteligencia artificial e incluyen sistemas de visión mediante computador, procesos de digitalización de la cadena de suministro mediante IoT (Internet of Things) y *blockchain*, que permiten mejorar la trazabilidad y la transparencia en la gestión de materiales (The Food Tech, 2024).

Capacitación y recursos humanos

La formación continua de los colaboradores o del talento humano es determinante para gestionar adecuadamente los procesos circulares. Obando Changuán (2020) indica que formar competencias en sostenibilidad fortalece el compromiso de los trabajadores más allá de brindar un apoyo y mejora el desempeño organizacional a través de la potencialización del rendimiento empresarial.

Para algunas entidades, como Circle Economy (2019), la sostenibilidad en el siglo XXI se ha convertido en un estándar laboral que requiere recursos para fortalecer las habilidades específicas necesarias en términos de la administración y gestión responsable de los diferentes recursos en un entorno de economía circular.

Políticas y regulaciones

A nivel internacional se instauran una serie de directrices para transformar los patrones de producción y consumo hacia modalidades de producción más sostenibles. Esto se observa mediante acciones que promueven la articulación de la Agenda 2030 y los ODS, en las cuales se considera fundamental la adherencia a políticas públicas para el desempeño crucial en la promoción de la economía circular.

En Colombia, podemos encontrar iniciativas como el Plan Nacional para la Gestión Sostenible de Plásticos de un Solo Uso, que fomenta la reducción y gestión eficiente de plásticos, y la Ley 2232 de 2022, que establece la eliminación progresiva de 21 tipos de plásticos de un solo uso para el año 2030, impulsando estrategias de economía circular, fomentando estrategias de economía circular con objetivos específicos establecidos en la resolución 803 de 2024 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024).

Como resultado, algunas iniciativas, dentro de las más reconocidas, el Pacto por los Plásticos en Colombia (Compromiso Empresarial Economía Circular [CEMPRE], 2024), coordinado por CEMPRE con apoyo internacional, promueven acciones de economía circular mediante líneas estratégicas como el cumplimiento normativo, la transición hacia nuevos modelos y la preparación para el financiamiento sostenible.

De igual manera, la ENEC, bajo la premisa "producir conservando y conservar produciendo", plantea acciones enmarcadas en seis flujos materiales prioritarios (envases, biomasa, energía, agua, construcción, productos de consumo masivo) y el desarrollo de cinco estrategias clave, entre las que se destacan la responsabilidad extendida del productor y la promoción de cadenas de valor sostenibles (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022a).

Conciencia y cultura empresarial

La transición hacia modelos de economía circular implica una transformación cultural profunda dentro de cualquier organización o sector. Autores como Esposito et al. (2016) consideran que las empresas deben incluir en su forma de pensar, en sus sistemas de planeación y en su estructura en sí, estrategias de negocio circular tales como la reducción de materiales, la extensión de la vida útil, la reutilización y la regeneración de los recursos.

Sin embargo, Hernández Alomia et al. (2025) advierte en sus procesos investigativos, como sugerencia a los determinantes de decisiones, que las empresas deben reconocer a qué se enfrentan en términos de sus retos administrativos y de factibilidad técnica; así mismo, deben tener claridad para optimizar su transición hacia modelos circulares, lo que demanda actividades y estrategias de colaboración entre socios estratégicos y un compromiso real con la sostenibilidad.

Mercado y demanda

La existencia de un mercado que valore productos sostenibles es fundamental para el éxito de los modelos circulares. Autores como Albats et al. (2023), Geissdoerfer et al. (2017) y Esposito et al. (2018) hacen hincapié en que los consumidores, en especial los que denominan consumidores conscientes, ejercen presión positiva sobre las empresas

en los diferentes sectores; esto conlleva incentivar prácticas responsables e impulsar la innovación. Esta interacción con el consumidor fortalece la sostenibilidad económica del reciclaje y la reutilización, consolidando así modelos circulares más sólidos y adaptados a las demandas del mercado.

En conclusión, el desarrollo sostenible constituye, para el sector, la base ética y operativa de los modelos circulares propuestos en esta investigación. La integración de políticas públicas, innovación tecnológica, cultura empresarial y herramientas de ingeniería de procesos ha demostrado ser efectiva para avanzar hacia una sostenibilidad tangible y contextualizada.

Ingeniería de procesos

La ingeniería de procesos se convierte en un eje fundamental para el sector a la hora de tomar decisiones de transición hacia modelos de economía circular, ya que permite a cualquier empresa el rediseño de sus sistemas productivos bajo los principios de ecoeficiencia, minimización de residuos y recuperación de recursos, lo que permite contribuir al desarrollo de industrias más limpias y sostenibles (Reh, 2013).

Desde una perspectiva integral, no solo optimiza los flujos dispersos de materiales, reduce la entropía del sistema y aumenta el rendimiento energético de los procesos industriales; al mismo tiempo, incorpora una visión integral del ciclo de vida de los productos, favoreciendo a las empresas decisiones sustentadas en la termodinámica, la eficiencia operativa y el uso racional de materias primas (Reh, 2013).

Por tanto, la economía circular en la ingeniería de procesos toma un significado quizá más real, ya que entiende cómo los sistemas de producción deben rediseñarse a partir



La transición hacia modelos de economía circular implica una transformación cultural profunda dentro de cualquier organización o sector.

de principios de eficiencia, control y mejora continua. Esto implica, en las empresas, considerar la sistematización de actividades, la optimización de flujos de materiales, la integración de tecnologías limpias e inclusión de indicadores de sostenibilidad con capacidad de evaluar el desempeño circular de las organizaciones (Flórez Rendón y Cogollo Flórez, 2017).

Desde esta perspectiva, se pone en evidencia que diversos enfoques teóricos contemporáneos han integrado la ingeniería de procesos a los modelos de economía circular, destacando su capacidad para generar transformaciones estructurales a nivel industrial. Para complementar esta visión, los autores Rajić et al. (2024) proponen en su investigación la integración, por una parte, de la reingeniería de procesos empresariales con el modelo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*); este último orientado a efectuar cambios estructurales para mejorar el desempeño ambiental y beneficiar la eficiencia organizacional en sectores manufactureros.

Por su parte, Marchi et al. (2017) demuestran el potencial de la simbiosis industrial a la hora de optimizar recursos compartidos entre diferentes sistemas productivos, que pueden incluir servicios públicos y utilidades urbanas, configurando de esta manera redes colaborativas que mejoran la eficiencia global y reducen significativamente el impacto ambiental. Esta articulación entre la ingeniería de procesos y los principios de circularidad es lo que permite impulsar una renovación en la gestión de residuos, promover el uso de tecnologías limpias y favorecer la creación de cadenas de valor sostenibles.

Particularmente, en el contexto de las pymes recicladoras de plásticos, la ingeniería de procesos adquiere una relevancia estratégica, toda vez que logra facilitar la implementación de modelos técnicos de aprovechamiento de residuos posconsumo, elevar la calidad de los productos reciclados e incrementar la competitividad del sector. Por consecuencia, la articulación entre reingeniería, simbiosis industrial y economía circular se presenta como una ruta viable y necesaria para garantizar el desarrollo sostenible en contextos industriales de nivel local.

Para las pymes recicladoras, aplicar ingeniería de procesos sostenibles implica generar una serie de acciones y estrategias enfocadas en rediseñar flujos de materiales, adoptar tecnologías limpias, optimizar recursos energéticos e incorporar indicadores de sostenibilidad. Todo esto requiere d e la invaluable capacidad humana que, sin lugar a duda, debe estar fortalecida; el acceso a infraestructura adecuada y la formación de los diferentes sectores en gestión ambiental (Flórez Rendón y Cogollo Flórez, 2017).

El vínculo entre ingeniería de procesos, innovación organizacional y políticas públicas constituye el camino para reforzar la sostenibilidad empresarial desde un punto de vista holístico y adaptado a las realidades del territorio y a los ODS (Organización de las Naciones Unidas, 2024).





Capítulo 2

Tendencias investigativas y brechas en economía circular para pymes



En los últimos años, la economía circular ha despertado un creciente interés en la adopción de prácticas circulares en diversos sectores productivos, especialmente en las pequeñas y medianas empresas (pymes), a través de diversos marcos conceptuales, modelos de implementación y estudios de caso que enriquecen su comprensión e impulsan su sostenibilidad (Geissdoerfer et al., 2017; Kalmykova et al., 2018).

Aunque el enfoque avanza tanto en lo teórico como en lo normativo de manera considerable, aún se reconocen retos importantes a la hora de su aplicación práctica, sobre todo en contextos empresariales frágiles, tales como las pymes recicladoras de plásticos en América Latina. Estas organizaciones requieren soluciones más integrales y adaptadas a su realidad, entendiendo que, en su mayoría, se encuentran marcadas por la alta informalidad, la baja tecnificación y una débil articulación inter e institucional (Padilla-Rivera et al., 2024; Vera-Acevedo y Raufllet, 2022).

Este capítulo propone revisar las principales líneas de investigación en torno a la economía circular en pymes, con énfasis en las dedicadas al reciclaje de residuos plásticos. De esta manera, se presenta una síntesis de la producción académica más relevante; se visibilizan algunos autores, enfoques y hallazgos que resultan ser clave, por una parte, para analizar diferentes modelos desarrollados, extraer aprendizajes, experiencias significativas y condiciones de éxito en Europa y América Latina (Garcés-Ayerbe et al., 2019; Plataforma Urbana y de Ciudades, 2024).

Posteriormente, se reconocen algunas brechas de conocimiento detectadas en la literatura, tanto en aspectos técnicos, organizacionales y territoriales, como lo sugieren algunos autores (Kalmykova et al., 2018; Rodríguez Nivicela et al., 2022), lo que permite orientar futuras líneas de investigación y la sustentación de la pertinencia del modelo propuesto en esta obra, el cual responde a vacíos concretos en materia de ingeniería de procesos, indicadores de economía circular, potencialización de capacidades empresariales y articulación intersectorial (Flórez Rendón y Cogollo Flórez, 2017; Torres-Guevara et al.., 2021; Hernández Alomia, 2025).

En conclusión, a través de esta revisión se pone en evidencia que, si bien la economía circular ha sido ampliamente discutida desde lo conceptual y normativo, su operativización en pymes recicladoras requiere abordajes más integrales, contextualizados y participativos que reconozcan su papel estratégico en la sostenibilidad territorial y en la consolidación de economías más inclusivas.

Investigaciones previas en economía circular aplicadas a pymes

La investigación en economía circular es una tendencia global que ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, consolidándose como una línea prioritaria en estudios de sostenibilidad, innovación y transformación industrial (Espinoza, 2023; Plataforma Urbana y de Ciudades, 2024).

Sin embargo, existe una distancia notoria entre el desarrollo conceptual de la economía circular y su aplicación efectiva en territorios vulnerables y sectores productivos informales o precarizados, como el reciclaje de plásticos en pequeñas y medianas empresas. Esta brecha es objeto de revisión por parte de diversos autores, que insisten en la necesidad de trasladar los marcos analíticos hacia soluciones contextualizadas, integrales y con enfoque social (Geissdoerfer et al., 2017; Kalmykova et al., 2018).

Desde la perspectiva internacional, la literatura aborda algunos avances y limitaciones del enfoque técnico para la implementación de los modelos circulares en pymes, especialmente desde la ingeniería de procesos, la gestión de residuos y la innovación tecnológica.

En Europa se han promovido investigaciones en las que se reconocen algunas iniciativas, como Horizon 2020 y el Green Deal, que adaptan modelos circulares en sectores de manufactura, construcción y agroindustria. Otros estudios centran su investigación en la identificación de barreras, que incluyen el alto costo inicial, la resistencia organizacional al cambio y la carencia de competencias técnicas para el rediseño de procesos (Kirchherr et al., 2017; Millar et al., 2019).

En Países Bajos, Alemania y Dinamarca, las investigaciones realizadas han propuesto marcos metodológicos para medir la circularidad en pymes mediante indicadores de desempeño ambiental, eficiencia energética, recuperación de materiales y análisis de ciclo de vida. Si bien estos modelos han demostrado efectividad en contextos altamente tecnificados, presentan dificultades de adaptación en entornos donde las empresas operan con limitaciones estructurales, informalidad o bajos niveles de formación (Coalición de Economía Circular de América Latina y el Caribe, 2022; Zocco y Malvezzi, 2024).

En Asia, diversas investigaciones en países como India, China y Malasia han explorado los vínculos entre la economía circular y el desarrollo regional y ambiental, donde se advierte que la implementación de procesos circulares puede conllevar la generación de externalidades no deseadas, como la exposición a residuos peligrosos o la inequidad en el acceso a tecnologías limpias. Esta situación resalta una tensión estructural en la economía circular: si bien busca reducir el impacto ambiental global, puede generar

efectos adversos localizados si no se acompaña de políticas de equidad, gobernanza territorial y protección laboral (OECD, 2022).

En América Latina, la perspectiva en términos de avances fragmentados para la producción científica en economía circular se ha intensificado, aunque con menor sistematicidad respecto al contexto europeo. Brasil, México, Argentina y Colombia concentran la mayor parte de las publicaciones, centradas en análisis normativos, casos de buenas prácticas y desarrollo de marcos conceptuales adaptados a las realidades regionales, convirtiéndose en un reto social (Padilla-Rivera et al., 2024).

Por ejemplo, en Brasil, diversas universidades han estudiado la articulación entre recicladores de base y sistemas formales de gestión de residuos, destacando el papel clave de las cooperativas y asociaciones para cerrar ciclos materiales desde lo comunitario (Ojeda y Mercante, 2021).

En el mismo sentido, en países como Perú, Ecuador y Chile, los estudios han explorado la relación entre economía circular y bioeconomía, orientando sus propuestas hacia cadenas productivas locales como el agro, la pesca y el reciclaje urbano. Sin embargo, persiste una importante deuda investigativa en relación con el impacto de la circularidad sobre las condiciones de vida y bienestar de las comunidades implicadas en el proceso. Entendiendo que muchos de los modelos propuestos siguen replicando enfoques extractivistas y tecnocráticos, sin una mirada crítica sobre las desigualdades estructurales que afectan a las pymes recicladoras (Greenpeace, 2024; Plataforma Urbana y de Ciudades, 2024).

Un desafío recurrente señalado por los investigadores latinoamericanos es la escasa integración de la economía circular con las políticas públicas locales. Si bien existen estrategias nacionales, como las de Chile y Colombia, su implementación en territorios rurales o periferias urbanas ha sido parcial y desarticulada, sin una adaptación real a las capacidades institucionales ni a las dinámicas sociales y productivas de las pymes. Asimismo, la falta de financiamiento y de incentivos fiscales limita la posibilidad de innovación tecnológica y transición ecológica en estos sectores (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024; Padilla-Rivera et al., 2024).

A la perspectiva nacional, se denota que la investigación en economía circular ha estado en gran medida impulsada por organismos multilaterales, universidades públicas y centros de investigación adscritos a ministerios o agencias de cooperación. La ENEC ha servido como marco para fomentar estudios sobre cadenas de valor sostenibles, producción más limpia y valorización de residuos. Sin embargo, el enfoque dominante ha sido técnico-normativo, centrado en grandes empresas o proyectos piloto en ciudades capitales, con escasa atención a las dinámicas informales o de microempresas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022b; Vera-Acevedo y Raufllet, 2022).

En algunos contextos urbanos nacionales, como Bogotá, Medellín y Cali, existen investigaciones relevantes sobre reciclaje inclusivo y la valorización de residuos plásticos, que han documentado las condiciones precarias de trabajo de los recicladores, la exposición a contaminantes y la baja tecnificación de los procesos (Torres-Guevara et al., 2021; Flórez Rendón y Cogollo Flórez, 2017). No obstante, poco se ha abordado en procesos de investigación de la ingeniería de procesos como eje articulador de modelos circulares adaptados a pymes, por lo que siguen siendo subestimados en la literatura científica los impactos no visibilizados sobre las comunidades vulnerables, como las afectaciones por residuos mal tratados o la exclusión territorial.

La revisión de la literatura revela una constante: la economía circular no es neutra. Su implementación puede contribuir a la reducción de impactos globales, pero, si no se diseñan mecanismos de inclusión y equidad territorial, puede reproducir formas de exclusión y vulnerabilidad. En contextos donde las pymes recicladoras son lideradas por mujeres, comunidades afrocolombianas o recicladores de base, estos impactos adquieren una dimensión étnica, de clase y de género que raramente es visibilizada por los estudios técnicos, lo que lo convierte en un desafío global con impacto local que promueve la inclusión y la justicia social (Plataforma Urbana y de Ciudades, 2024; *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, 2021).

Dentro de los procesos de investigación en economía circular y su aplicación en pymes recicladoras de plástico, algunos autores han desarrollado aportes significativos, tales como Winans et al. (2017), quienes visibilizan la necesidad de las pymes de concentrar sus esfuerzos en la implementación de instrumentos de medición de circularidad que cuenten con la adaptación pertinente para sus necesidades específicas. Esto facilitaría la trazabilidad y el seguimiento de su progreso en la aplicación de prácticas más sostenibles, competitivas y ambientalmente responsables.

Pomponi y Moncaster (2017) recomiendan la aplicabilidad de indicadores de eficiencia y sostenibilidad que identifiquen oportunidades de mejora en todas las etapas del proceso productivo. En paralelo, Nizami et al. (2017) plantean el aprovechamiento del potencial que tiene para las pymes la bioeconomía circular, destacando la valorización de residuos orgánicos en entornos urbanos como una oportunidad para diversificar los modelos circulares existentes al convertirse en un motor de innovación.

Garcés-Ayerbe et al. (2019) proponen estrategias para pequeñas y medianas empresas con un carácter de mayor precisión. Estas incluyen la difusión de información, la concienciación de clientes y directivos, la formulación de políticas de apoyo y el aprovechamiento de tecnologías para superar barreras de distancia física, fortaleciendo de esta manera las relaciones industriales sostenibles.

De igual manera, Velásquez-Barrios et al. (2019) hacen hincapié en la falta de personal capacitado y la desconexión entre la legislación y su aplicación práctica, factores que

representan retos adicionales. Estos autores proponen una inversión continua en capacitación para optimizar la gestión de residuos.

La implementación de la economía circular enfrenta diversas barreras que dificultan su adopción plena en los sectores productivos. Autores como Vera-Acevedo y Raufllet (2022) identificaron que, en Colombia, una de las principales barreras para la implementación efectiva de estrategias de economía circular entre sectores productivos es su baja articulación, sin desconocer los esfuerzos sectoriales aislados. Estos autores advierten sobre la necesidad de enfoques más integrados y alineados con las políticas ambientales, energéticas e industriales.

En el estudio de Armijos et al. (2024), se propone la aplicación de una herramienta de diagnóstico para evaluar el desarrollo de la economía circular. Esta herramienta, basada en un modelo 5D (*Design, Performance, Deployment, Dynamics, Diffusion*), ofrece una visión integral en términos del diseño, desempeño, implementación, cultura organizacional e influencia externa, que promueve la dinámica organizacional a partir de la identificación de las barreras culturales, la falta de indicadores y el desconocimiento del enfoque circular.

Bajo una mirada estratégica, Ahmadov et al. (2025) e Iacovidou et al. (2017) hacen hincapié en la importancia del Sistema de Información Estadística sobre la Economía Circular (SIEC) como una herramienta de implementación en el desarrollo de estrategias a niveles macro, meso y micro. Este sistema favorece el acceso a la información y fortalece la autenticidad y seguridad de los datos estadísticos.

Por otro lado, autores como Torres-Guevara, Prieto-Sandoval y Mejía-Villa (2021) documentan la relevancia de las políticas públicas y los marcos normativos como estrategia de avance en América Latina en la formalización del reciclaje. Esto ha generado impactos positivos en el reconocimiento de ingresos económicos para los recicladores y en la aceptación social de esta actividad dentro de las comunidades.

Asimismo, Angulo et al. (2024) reconocen barreras en la falta de claridad de las estrategias y la baja concientización ambiental. Por ello, reconocen que la economía circular requiere de acciones orientadas a un cambio cultural y educativo, sustentadas en políticas públicas e iniciativas privadas.

De igual modo, autores como Padilla-Rivera, Morales Brizard, Merveille y Güereca-Hernández (2024) identifican, en el contexto latinoamericano, barreras relacionadas con la adopción de innovaciones de nuevos productos, brechas tecnológicas y la ausencia de incentivos adecuados. Su propuesta cobra fuerza al plantear mecanismos para superar estas limitaciones a través de la inversión en investigación aplicada y la cooperación interinstitucional.

Por otra parte, autores como Padilla-Rivera et al. (2020) identifican barreras culturales, organizacionales, institucionales y tecnológicas que involucran el compromiso

interinstitucional de gobiernos y empresas, así como la inclusión de la comunidad para fomentar la sostenibilidad mediante la innovación y la cooperación.

Autores como Hahladakis y Iacovidou (2018), Geyer et al. (2017) y R. A. Mendoza et al. (2020) identificaron estrategias favorables a nivel global para el sector del plástico. Estas brindan mayor compatibilidad con las características de los materiales y la necesidad de maximizar las cadenas de valor sostenible, encontrando en el ecodiseño y el modelo de las 3R (reducir, reutilizar, reciclar) una alternativa viable de implementación.

Según lo planteado por J. M. F. Mendoza et al. (2017), existen múltiples beneficios a la hora de implementar estrategias circulares, entre los cuales se destacan la reducción de costos mediante la reutilización de residuos, el uso eficiente de recursos naturales, la generación de empleo y las mejoras laborales impulsadas por la innovación tecnológica.

La transformación de diversos sectores productivos hacia esquemas más sostenibles requiere la adopción de modelos de economía circular a partir de propuestas de innovación social. Estas permiten dar respuestas efectivas a necesidades sociales, fortaleciendo la sostenibilidad y la eficiencia en los procesos productivos, en coherencia con los ODS (Morseletto, 2020). Finalmente, de acuerdo con lo señalado por Martins et al. (2022), se reconoce y sugiere trabajar en el fortalecimiento de la confianza para con el consumidor, así como buscar estrategias que permitan a las empresas posicionarse como líderes en calidad y sostenibilidad. Para ello, sugieren la certificación de procesos circulares en los mercados de productos reciclados.

Por otra parte, autores como Marchi et al. (2017) hacen hincapié en promover modelos de simbiosis industrial, fomentando la cooperación tanto vertical como horizontal entre productores y recicladores mediante redes de intercambio de materiales. Esta cooperación favorece el desarrollo de sistemas de producción más eficientes y sostenibles.

Desde esta perspectiva, los autores coinciden en la relevancia de incorporar estándares internacionales de calidad, como la ISO 9001:2015 (International Organization for Standardization, 2015), al interior de las organizaciones con el fin de asegurar procesos productivos eficientes y sostenibles. A la par, destacan la integración de materiales reciclados en las cadenas de producción como una práctica clave para impulsar la responsabilidad social corporativa y fortalecer la sostenibilidad empresarial (Cervera-Muñoz, 2023).

No obstante, existen matices en el enfoque de los autores. Mientras Enking et al. (2025) resaltan los beneficios de la responsabilidad social corporativa, otros autores, como Ibujés Villacís y Benavides Pazmiño (2018), hacen mayor énfasis en la implementación de prácticas de economía circular integrativas que favorezcan la reutilización de residuos y la reducción de materias primas, destacando iniciativas sectoriales como el proyecto Circulator en el sector textil colombiano.

Asimismo, Padilla-Rivera et al. (2020) acentúan la importancia que tiene para las instituciones desglosar los últimos avances al llevar a la práctica el conocimiento técnico

y los estudios de caso. Esta práctica favorece la creación de alianzas estratégicas entre instituciones educativas y los diversos sectores económicos, como una forma de generar y transferir el conocimiento, así como de fortalecer las capacidades de los colaboradores.

En sintonía con lo anterior, Kirchherr et al. (2017) y Geissdoerfer et al. (2017) sostienen que en Europa la economía circular es vista como un elemento fundamental para el cierre de ciclos productivos y la corrección de errores del pasado, mediante políticas activas que benefician la reducción de plásticos y la protección ambiental. La responsabilidad social y la colaboración en el entorno empresarial son pilares fundamentales para consolidar diversas prácticas de economía circular en las pymes. Algunos autores, como Enking et al. (2025), vinculan la responsabilidad social corporativa en los procesos de producción a la hora de utilizar materiales reciclados, destacando los beneficios derivados de estas prácticas en términos económicos, sociales y ambientales.

En este marco, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (De Miguel et al., 2021) sustenta la necesidad de un cambio de paradigma con acciones que promuevan la gestión eficiente de recursos y la colaboración empresarial. De esta manera, las instituciones pueden contribuir en la implementación de los ODS y a la recuperación económica postpandemia.

En conclusión, las investigaciones previas en economía circular y pymes recicladoras han aportado marcos útiles, pero siguen enfrentando límites en su capacidad de responder a las realidades concretas de los territorios. La transición hacia una circularidad justa requiere investigaciones situadas, metodologías participativas y modelos de innovación que reconozcan la dignidad, el conocimiento y los derechos de quienes históricamente han sostenido los ciclos de recuperación material.

Modelos similares en América Latina y Europa

La transición hacia una economía circular se ha manifestado de forma heterogénea en distintas regiones del mundo, dando lugar a modelos diversos según el contexto institucional, tecnológico y sociocultural, que reflejan diversidad de lecciones y contrastes aprendidos.

En Europa y América Latina se han impulsado experiencias significativas en torno a la economía circular aplicada a pequeñas y medianas empresas (pymes), algunas con enfoques altamente tecnificados y otras con una marcada orientación social y territorial. Estos modelos se convierten en fuentes de aprendizaje de alto valor, en tanto permiten identificar factores críticos de éxito, límites estructurales y posibilidades de adaptación contextualizada a países como Colombia (European Commission, s. f., 2026; Hernández Alomia, 2025).

Para el caso de Europa, la economía circular se ha consolidado como política de Estado y eje de innovación sostenible, especialmente a través del Green Deal y el Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020). Este último promueve un ecosistema circular basado en el rediseño de productos, el acceso a materias primas secundarias, el uso de energías limpias y la descarbonización industrial, con especial énfasis en sectores clave como plásticos, electrónica, construcción y textiles (European Commission, 2020).

En tanto, América Latina ya se encuentra trabajando a partir de un pensamiento colectivo de reconocimiento de actores a nivel regional, declarando así la importancia de la transición a la economía circular para ofrecer soluciones mediante la transformación sistémica, con base en tres acciones primordiales: una economía próspera que funcione con y para las personas; una economía próspera que sea buena para el clima; y una economía sana que trabaje a favor de la biodiversidad (Hernández Alomia, 2025).

Las pymes latinoamericanas se enfocan en conceptos que transforman los productos y materiales dentro de procesos circulares en la región, reconociendo en la durabilidad, la reutilización, la reparabilidad, la remanufactura, la reciclabilidad, la compostabilidad y la regeneración de diversos materiales procesos que pueden convertirse en fuentes de innovación, considerados para ser implementados a gran escala, acelerando las soluciones y favoreciendo la accesibilidad a la población (Geissdoerfer et al., 2017; Hernández Alomia, 2025).

En el contexto latinoamericano, las experiencias de economía circular han emergido más recientemente, con una narrativa distinta: aquí, la circularidad ha sido impulsada no solo por la eficiencia y la innovación, sino también por la urgencia social de dignificar el trabajo informal, reducir la contaminación y generar ingresos para poblaciones vulnerables (Plataforma Urbana y de Ciudades, 2024). En países como Brasil, Argentina, Perú, México y Colombia han surgido modelos híbridos que combinan la ingeniería de procesos con el trabajo comunitario, el reciclaje inclusivo y la economía popular.

Uno de los referentes más documentados es el modelo de cooperativas de recicladores en Brasil. A través de alianzas con universidades, ONG y gobiernos locales, estas organizaciones han implementado procesos de separación, clasificación y valorización de residuos sólidos urbanos, incorporando prácticas circulares como la reutilización de materiales plásticos, la capacitación técnica y el diseño de productos reciclados.

Se reconocen casos de éxito para las pymes en la región, como la empresa Replas (Argentina), que se dedica al reciclaje de plásticos industriales y posconsumo para producir nuevos productos mediante un sistema de clasificación y procesamiento que permite la reutilización de materiales en su fabricación.

Otro caso es GreenO2, ubicada en Colombia, que se especializa en la recolección y reciclaje de plásticos posconsumo. En esta empresa se extraen polímeros que se transforman en nuevos productos, tales como mobiliario urbano y accesorios. Se considera un agente de cambio ambiental, ofreciendo soluciones para el reciclaje y la transformación de residuos plásticos de un solo uso en productos de larga duración a través de un modelo de economía circular (Hernández Alomia, 2025).

Para los actores regionales, la cooperación y la comunicación son fundamentales para facilitar el diseño y la evolución de una transición inclusiva hacia modelos circulares en las pymes. Asimismo, es esencial la inversión de los sectores público y privado para promover habilidades, el desarrollo del conocimiento y la capacidad de implementación de modelos circulares ya sea en sectores nuevos o emergentes, o en la transformación de los existentes (Circular Economy Coalition, 2022).

Tanto en Europa como en América Latina, algunos autores como Zapata y Rueda (2023) identificaron elementos replicables que pueden orientar la construcción de modelos circulares para pymes recicladoras en Colombia. Entre ellos destacan los siguientes:

- **El enfoque territorial.** Los modelos exitosos han sido aquellos adaptados a las capacidades institucionales, culturales y tecnológicas del territorio. La economía circular no puede imponerse desde esquemas universales, sino diseñarse desde el diálogo con actores locales.
- **La inclusión socioeconómica.** Integrar a los recicladores de base, mujeres jefas de hogar, jóvenes y comunidades étnicas no solo es una decisión ética, sino estratégica para generar modelos resilientes y sostenibles en el tiempo.
- **La articulación intersectorial.** Los modelos más sólidos son aquellos que combinan universidades, gobiernos locales, cooperativas, sector privado y ciudadanía, superando la fragmentación y los intereses individuales.
- **La visión sistémica.** Más allá de las prácticas individuales, los modelos circulares requieren rediseñar estructuras productivas completas, reconociendo la interdependencia entre procesos, mercados, regulaciones y culturas.
- **La justicia ambiental.** Los casos más inspiradores no se centran solo en la eficiencia o la reducción de costos, sino en restaurar ecosistemas, proteger la salud pública y garantizar condiciones laborales dignas.

Estos aprendizajes permiten proyectar la economía circular como una vía real hacia la transformación productiva sostenible, pero solo si se integra con principios de equidad, participación y respeto por la diversidad territorial. Es así como quizá Colombia puede aprender de lo que el mundo está haciendo, pero también tiene la oportunidad de innovar desde sus propias realidades, desarrollando modelos que combinen tecnología, saber local y justicia social (Zapata y Rueda, 2023; Hernández Alomia, 2025).

Brechas de economía circular aplicadas a pymes

Aunque la economía circular se ha reconocido como una estrategia clave para la sostenibilidad global, aún persisten brechas significativas para el caso de las pymes en diversos términos, que incluyen la implementación efectiva, la inclusión social y la adaptabilidad territorial.

La literatura reciente señala que, si bien se ha avanzado en marcos conceptuales y normativos, existen vacíos sustantivos en modelos que integren tecnología, justicia ambiental y equidad económica desde una lógica operativa y participativa.

Uno de los vacíos más críticos es la ausencia de estudios integrales sobre los impactos en salud ambiental de los trabajadores de reciclaje y las comunidades aledañas a las plantas de transformación, pese a que muchas de estas operan en zonas altamente vulnerables o sin sistemas adecuados de gestión de emisiones y residuos secundarios.

De igual modo, persiste una desconexión entre los enfoques de ingeniería de procesos y la dimensión comunitaria del reciclaje, lo cual impide generar modelos adaptados a realidades organizacionales con bajo acceso a tecnología o financiamiento.

Este desfase es especialmente problemático si se contrasta con los principios de la Agenda 2030, cuyo eje transversal es “no dejar a nadie atrás”. Tal como lo advierte el informe de progreso global, la exclusión de poblaciones vulnerables, tales como recicladores informales, mujeres cabeza de hogar y comunidades rurales, impide alcanzar los avances necesarios en metas como el ODS 3 (Salud y bienestar), el ODS 8 (Trabajo decente) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables) (Naciones Unidas, 2015; Hernández Alomia, 2025).

El análisis de la tesis doctoral de Hernández Alomia (2025) muestra que las pymes recicladoras enfrentan barreras estructurales, como informalidad, baja articulación institucional y escaso acceso a tecnología e infraestructura eficiente, lo que limita directamente su contribución al logro de los ODS; por tanto:

- **ODS 3 (Salud y bienestar).** No se dispone de datos consolidados sobre enfermedades laborales asociadas a la manipulación de residuos plásticos, ni protocolos técnicos ajustados al riesgo ambiental en zonas recicladoras.
- **ODS 8 (trabajo decente).** La baja formalización del trabajo en las pymes recicladoras impide avanzar en condiciones laborales dignas, seguridad ocupacional y remuneración justa.
- **ODS 12 (producción y consumo responsables).** La mayoría de las prácticas circulares implementadas son de tipo mecánico, sin trazabilidad ni evaluación

del ciclo de vida del producto, lo que dificulta una economía verdaderamente regenerativa.

- **ODS 10 (reducción de desigualdades).** La falta de enfoque interseccional impide visibilizar y atender los impactos diferenciados que enfrentan mujeres, jóvenes y personas racializadas en este sector.
- **ODS 13 (acción por el clima).** Las emisiones asociadas a procesos mal diseñados o al uso de tecnologías obsoletas no son cuantificadas ni gestionadas de forma sistemática, limitando su contribución a la acción climática.

Asimismo, desde la perspectiva territorial y comunitaria, existen al menos cinco necesidades críticas que siguen sin abordarse:

- **Indicadores de circularidad inclusiva.** No se cuenta con métricas validadas que permitan monitorear el avance de las pymes recicladoras en función de dimensiones sociales, ambientales y tecnológicas adaptadas a su escala.
- **Infraestructura tecnológica apropiada.** Las tecnologías modernas (como la separación avanzada o el reciclaje químico) están fuera del alcance de estas empresas debido a su alto costo y a la falta de financiamiento estructurado.
- **Articulación institucional efectiva.** A pesar de políticas como la ENEC o la Ley 2232 de 2022, no se han consolidado mecanismos de gobernanza multinivel que permitan implementar modelos circulares con apoyo técnico y financiero sostenido.
- **Capacitación comunitaria y acceso al conocimiento.** La economía circular sigue siendo percibida como un discurso lejano, técnico o empresarial, sin apropiación desde los territorios y actores sociales involucrados en el reciclaje.
- **Medición de impactos en salud pública y ecosistemas.** No existen estudios longitudinales que midan los efectos acumulativos del manejo de residuos plásticos en salud respiratoria, calidad del agua o suelo en zonas recicladoras, lo cual limita la acción preventiva y correctiva.

Así, al integrar estas perspectivas y principios, el modelo que aquí se propone para las pymes recicladoras de plástico se convierte en un instrumento alineado a los ODS y la Agenda 2030 (Organización de las Naciones Unidas, 2024), de carácter operativo, donde la eficiencia técnica conecta con la justicia ambiental, el componente económico conecta con la inclusión social y la innovación tecnológica conecta con el fortalecimiento social y comunitario.

A pesar de ello, las pymes recicladoras de plásticos cumplen con un papel muy importante en este proceso, puesto que ellas son las encargadas de recolectar y procesar buena parte de los residuos plásticos en países como Colombia (Torres-Guevara, Prieto-Sandoval y Mejía-Villa, 2021). Por ejemplo, en la ciudad de Bogotá se estima que hay más de 400 pymes cuya actividad principal es el reciclaje, muchas con capacidad operativa muy limitada y niveles de informalidad muy altos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024).



Capítulo 3

Diagnóstico estratégico de las pymes recicladoras de plástico en Colombia



Las pymes recicladoras de plásticos desempeñan un papel clave en el funcionamiento de la economía circular, aun cuando su actividad cotidiana se ve afectada por profundas tensiones estructurales, limitaciones técnicas y vacíos institucionales que condicionan su sostenibilidad.

En este contexto, el presente capítulo visibiliza de forma integral a estas organizaciones, abordándolas desde sus dimensiones operativa, social y territorial. Se parte de la identificación de capacidades instaladas, limitaciones y riesgos compartidos, y del propósito de establecer una base sólida para la formulación de un modelo circular ajustado a sus realidades.

El diagnóstico acoge un enfoque estratégico que trasciende el análisis de variables exclusivamente económicas o productivas e integra factores culturales, normativos, ambientales y sanitarios que inciden en el desempeño y proyección de dichas organizaciones.

Buscando visibilizar las fortalezas de su experiencia constructiva, resiliente y, en algunos casos, partiendo de la autogestión, así como los factores estructurales que perpetúan la informalidad, la precariedad y la inequidad en el acceso a oportunidades.

Así como las condiciones del bienestar colectivo, la precariedad laboral, la falta de protocolos de seguridad, la exposición a residuos peligrosos y la debilidad de los sistemas de salud ocupacional, que interfieren o afectan a los trabajadores, a las comunidades circundantes y al entorno territorial. Por tanto, el análisis trasciende lo técnico para situarse en un plano ético y de justicia ambiental: entender la circularidad no solo como un modelo económico, sino como un compromiso con la salud, la dignidad y la sostenibilidad del territorio.

Caracterización de la producción de plásticos

Desde el inicio de la producción industrial de plásticos en 1950, se han producido cerca de 8,3 mil millones de toneladas de plástico, de las cuales alrededor de 500 mil millones corresponden a plásticos de un solo uso, según cifras anuales (Greenpeace, 2024).

La producción de plásticos en la actualidad, a nivel global, se centraliza en los países asiáticos, que lideran la producción y acogen más de la mitad de esta, con un 51 % del total

global. La República Popular de China lidera esta producción, siendo responsable del 30 % de la producción mundial, lo que equivale a un consumo per cápita de 77 kilogramos. Por su parte, Japón representa el 4 %, con un consumo per cápita de 114 kilogramos (Plastics Europe, 2021).

En otras regiones, Europa y el TLCAN (Tratado de Libre Comercio de América del Norte), conformado por Canadá, Estados Unidos y México, contribuyen con aproximadamente entre el 17 % y el 18 % de la producción mundial, mientras que América Latina aporta el 4 % y Oriente Medio y África, en conjunto, el 7 % (Plastics Europe, 2018).

Gran parte de estas cifras alude al desarrollo económico de Asia, pilar determinante en este crecimiento, impulsado por el desarrollo de nuevas capacidades de producción, el aprovisionamiento de materias primas y los avances en innovación tecnológica (ONU, 2020).

No obstante, estos datos también reflejan un verdadero desafío ambiental relacionado con la vida útil y el destino final de los productos plásticos. Según el informe *The New Plastics Economy: Rethinking the Future of Plastics* (World Economic Forum et al., 2016), el 32 % de los envases plásticos no son recuperados por los sistemas de gestión de residuos, terminando en ecosistemas naturales.

Europa se consolida como la tercera región con mayor crecimiento en la producción de plásticos, registrando una tasa compuesta anual (CAGR) del 3,4 % en los últimos 18 años y del 2,4 % en los últimos 5 años. Este crecimiento está determinado por el desempeño de países como Alemania, Reino Unido, Italia y Francia, donde los materiales como el plástico encuentran otras aplicaciones y usos en sectores como la construcción, la industria automotriz y los dispositivos médicos (Organization for Economic Cooperation and Development, 2022).

Por su parte, la región de Norteamérica ha registrado un crecimiento del 1,8 % en el mismo periodo. Esta dinámica se ha visto influenciada por factores económicos en el transcurso del tiempo, como la recesión del año 2009, la apreciación del dólar entre los años 2014 y 2016, y la adopción de políticas proteccionistas que afectaron el comercio exterior, con mayor preeminencia en países como China y México. No obstante, la región sostiene su competitividad gracias a los avances tecnológicos en el sector de la manufactura y en la diversificación de aplicaciones del plástico en sectores de la automoción, el embalaje y la construcción (Organization for Economic Cooperation and Development, 2022).

El crecimiento en la producción de plásticos en Europa y Asia ha motivado la creación e implementación de marcos regulatorios cuyo objetivo principal es fomentar el cambio y la transición hacia una economía circular y proteger la salud humana y el medioambiente (Noticias ONU, 2023).

Durante las últimas dos décadas, diversos países han promulgado leyes para enfrentar los desafíos derivados del uso y descarte de plásticos (véase la tabla 1). Estas regulaciones son esenciales para fomentar una gestión más responsable de los plásticos y promover prácticas sostenibles en la industria (Organization for Economic Cooperation and Development, 2022).

Tabla 1. Normativa de gestión frente a materiales plásticos

Normativa	País	Año	Objetivo normativo
Ley de Promoción de la Economía Circular	China	2008	Reducir de manera sostenible el uso de recursos
Acuerdo de París	Francia	2015	Reducir el impacto ambiental de los plásticos
Estrategia Española de Economía Circular	España	2018	Incentivar el crecimiento sostenible y la innovación ambiental
Ley VerpackG	Alemania	2019	Enfocar la responsabilidad extendida del productor en toda la cadena de suministro de envases plásticos
Pacto Verde Europeo	Unión Europea	2019	Lograr la neutralidad climática para 2050, transformando la economía en una sostenible y circular
Ley Integral Anti-Residuos	Francia	2020	Eliminar los plásticos de un solo uso para 2040
Marcos normativos	Japón, Corea del Sur y Filipinas		Fortalecer la circularidad en sus procesos industriales

Nota. Tabla elaborada por el autor con base en la revisión sistemática.

Fuente: elaboración propia.

Desde inicios del siglo XXI, el uso masivo de plásticos a nivel mundial se ha asociado a la necesidad de generar estrategias que garanticen la protección del medioambiente y el fortalecimiento de las cadenas de suministro justas y, por supuesto, responsables (Plastics Europe, 2021). La adopción de normativas regulatorias ha dado lugar, al mismo tiempo, a identificar desafíos en el ajuste y adaptación del sector industrial al cumplimiento de la normatividad y los nuevos estándares, así como a la creación de nuevas oportunidades para cerrar de manera más eficiente los ciclos de residuos plásticos.

El crecimiento exponencial de la producción global de plásticos se ha visto impulsado por varios factores en diferentes países. En China, el incremento de la demanda de producción responde a diversos factores, como el crecimiento poblacional, la urbanización y las ventajas ofertadas en los costos de producción competitivos. Por su parte, en países como India e Indonesia se destaca la expansión de las capacidades productivas

determinantes, especialmente en sectores industriales como la automoción y la construcción, que generan volúmenes significativos de residuos plásticos.

Asimismo, en países como Japón y Corea del Sur se ha mostrado un crecimiento sostenido, promovido por avances tecnológicos y procesos industriales innovadores (Muñoz-Vélez et al., 2018).

En el contexto latinoamericano, la producción de plásticos ha mostrado un notable crecimiento, alcanzando una tasa compuesta anual (CAGR) del 5,6 %, a pesar de las dificultades que presentan las industrias en países como Brasil y Argentina, y del declive observado en los últimos años en Venezuela (Bianco et al., 2021). Este incremento está estrechamente relacionado con el aumento de la demanda y el consumo creciente de productos ultraprocesados, especialmente de envases para alimentos y bebidas, encontrando un alto consumo en el agua embotellada.

Al respecto, países como México lideran el posicionamiento de consumo regional de agua embotellada, seguido por Brasil, Argentina y Guatemala. Entre las empresas demandantes de materiales como el plástico se encuentran aquellas dedicadas a la producción de bienes de alta rotación, caracterizadas por el uso de materiales con una vida útil corta y una alta demanda. Así, los productos de consumo alimenticio y las bebidas constituyen la categoría predominante de alta rotación. Este mercado está dominado por empresas transnacionales que operan en un entorno oligopólico, entre las que se destacan seis compañías que concentran una gran parte de sus ventas en productos como los alimentos ultraprocesados y agua embotellada: PepsiCo, Mondelez, Arcor, Nestlé, Coca-Cola, Danone y McDonald's en el sector de comida rápida.

A pesar de la creciente preocupación global por la contaminación ocasionada por los materiales plásticos, las respuestas empresariales en la región han tendido a centrarse en optar por estrategias superficiales, optando por soluciones poco convincentes, sin abordar y explorar las causas estructurales que subyacen al problema. Durante los últimos años, un concepto que ha ido apareciendo de forma recurrente en los debates de los distintos sectores empresariales ha sido el de la economía circular y su implementación, particularmente en la elección del reciclaje como estrategia principal para enfrentar los desafíos y dar respuesta a los retos derivados del uso de plásticos (Noticias ONU, 2023).

No obstante, es necesario ir más allá y avanzar hacia propuestas más holísticas que garanticen la integralidad del enfoque. Esto implica no limitarse al reciclaje, sino que se promueva la reducción desde el origen, el rediseño de productos y la transformación de los modelos de negocio, en consonancia con los principios de sostenibilidad y responsabilidad ambiental.

Cara cterización de pymes en Colombia y en el mundo

A nivel internacional, diversos estudios han resaltado la importancia de fortalecer las redes territoriales de reciclaje como base para una economía circular inclusiva y efectiva. Algunos autores, como Padilla-Rivera et al. (2024) y Espinoza (2023), proponen una visión sistémica de la circularidad urbana con énfasis en redes territoriales, mientras que Torres-Guevara, Prieto-Sandoval y Mejía-Villa (2021) plantean la necesidad de políticas regionales vinculadas con la economía popular y los recicladores de base.

Es así como estas perspectivas refuerzan la importancia de adaptar los modelos circulares a las condiciones reales de las pymes, como se propone en esta investigación, y marcan un punto de actualización frente a estudios más tradicionales, de tipo normativo o diagnóstico. En esta línea, Padilla-Rivera et al. (2024) argumenta que el abordaje sistémico de las redes de reciclaje exige incorporar dinámicas de economía popular urbana, lo cual resulta clave para interpretar los procesos organizativos de las pymes en contextos informales.

Las pymes latinoamericanas se caracterizan por brindar mayor énfasis a sus procesos en acciones de durabilidad, reutilización, reparabilidad, remanufactura, reciclabilidad, compostabilidad y regeneración de materiales. Estos conceptos han transformado los productos y materiales en el marco de la implementación de modelos de economía circular en la región, en todo tipo de productos, desde alimentos hasta bienes duraderos, abarcando plásticos, edificios y biomateriales con producción local, lo que podría convertirlos en procesos fuente de innovación con posibilidad de ser implementados a gran escala, acelerando las soluciones y favoreciendo la accesibilidad a la población (Torres-Guevara et al., 2021; Circular Economy Coalition, 2022).

En Colombia, la clasificación de las pequeñas y medianas empresas (pymes) se realiza conforme a la Ley 905 de 2004, que instituye los criterios de conformación, entre los cuales se describe el número de empleados y el valor de los activos totales. Según la norma, una microempresa cuenta con hasta 10 empleados y activos inferiores a 501 salarios mínimos mensuales legales vigentes (SMMLV); una pequeña empresa emplea de 11 a 50 personas, con activos entre 501 y 5000 SMMLV; y una mediana empresa, entre 51 y 200 empleados, con activos de hasta 30 000 SMMLV (Congreso de Colombia, 2004).

Las pymes en Colombia representan aproximadamente el 99,5 % del tejido empresarial colombiano y generan cerca del 80 % del empleo formal, por lo que se consideran un motor fundamental en el desarrollo económico, los procesos de innovación y el aporte a la reducción de la pobreza (Organización de las Naciones Unidas, 2024). Por ello, su flexibilidad y adaptabilidad las posicionan como actores estratégicos para la adopción de prácticas de sostenibilidad, particularmente en sectores como el reciclaje de plásticos.

Asimismo, desempeñan un rol importante, ya que facilitan la revalorización de residuos y permiten disminuir la presión sobre los recursos naturales. En Colombia, de acuerdo con cifras del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022b), se generan en promedio 1,2 millones de toneladas de residuos plásticos al año, pero tan solo de manera efectiva el 14 % es reciclado, siendo las pymes responsables de una parte significativa de esta recuperación de material.

De acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2024), en Bogotá, cerca de 450 pymes que operan en el reciclaje de plástico se encuentran formalmente registradas, lo que representa la mayor concentración a nivel nacional, con un aproximado del 22 % del total nacional en este sector. Dichas empresas se encuentran distribuidas en la ciudad en diferentes zonas industriales, reflejando la colaboración activa del sector con asociaciones de recicladores y centros de acopio, lo que ha permitido, con el tiempo, continuar promoviendo procesos de recolección, clasificación y transformación de residuos plásticos posconsumo (Torres-Guevara, Prieto-Sandoval y Mejía-Villa, 2021).

Desde una perspectiva social, muchas de estas organizaciones tienen origen en asociaciones de recicladores de oficio, mujeres cabeza de familia y comunidades vulnerables. Esta dimensión les confiere un valor social significativo, pero también implica desafíos en términos de gobernanza, profesionalización y acceso a mercados formales (Flórez Rendón y Cogollo Flórez, 2017; Torres-Guevara et al., 2021).

Aunque algunas pymes han avanzado en certificaciones ambientales, alianzas con recicladores de base o participación en programas de responsabilidad extendida del productor, estas experiencias siguen siendo excepcionales. La mayoría continúa operando en condiciones de informalidad, baja tecnificación, escasa capacidad de gestión ambiental y sin protocolos de trazabilidad (Hernández Alomia, 2025).

Esta situación refleja una contradicción entre los discursos institucionales de economía circular y la realidad operativa de los actores que más contribuyen a la recuperación de materiales, sobre todo en zonas excluidas del aparato productivo formal (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022a).

Sin embargo, enfrentan múltiples desafíos: informalidad, escaso acceso a financiamiento, debilidad en la infraestructura tecnológica y escasa capacidad de gestión ambiental, lo que limita su incorporación efectiva en los modelos de economía circular promovidos desde el nivel institucional (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020; Flórez Rendón y Cogollo Flórez, 2017).

Este modelo orienta sus acciones en la identificación de puntos críticos de intervención para la sostenibilidad, mediante la visualización de interdependencias sistémicas. Aunque no se aplicó de forma explícita en esta investigación, su enfoque se encuentra reflejado en la reestructuración del modelo circular al incorporar dimensiones interconectadas,

tales como la eficiencia de procesos, la colaboración interempresarial y la sostenibilidad operativa. Estas variables permiten un abordaje desde la perspectiva sistémica, alineada con los principios del *Whole System Mapping* y con la necesidad de una transición integral hacia la economía circular en las pymes recicladoras (PNUMA, 2020).

Para superar estos retos se requiere una acción conjunta entre Estado, academia, sector productivo y sociedad civil, orientada a dignificar, innovar y fortalecer este eslabón clave de la economía circular en el país.

Algunas iniciativas, como la adopción de tecnologías de bajo impacto ambiental y la participación en programas de responsabilidad, dirigidas estas últimas al productor, fortalecen el cierre de ciclos productivos y fomentan la minimización de residuos. Sumando de esta manera, otras iniciativas impulsadas por empresas del sector generan importantes beneficios socioeconómicos, como la creación de empleos verdes y el fortalecimiento de las economías locales, contribuyendo a una transformación de carácter estructural en las regiones donde operan (R. A. Mendoza et al., 2020).

No obstante, el sector enfrenta diversos desafíos que limitan su transformación y consolidación. Algunos de ellos están enmarcados en la falta de acceso a financiamiento, las limitaciones tecnológicas y la necesidad de una mayor articulación con las políticas públicas de economía circular, así como la carencia de recursos financieros y de infraestructura tecnológica moderna, lo cual obstaculiza la implementación de soluciones más eficientes, restringiendo el crecimiento y la competitividad de las pymes recicladoras (Merli et al., 2018).

Del mismo modo, y en concordancia con los hallazgos previamente presentados, se encuentran barreras entre las empresas y los entes gubernamentales ante la débil integración de las políticas públicas. Esto representa un reto persistente, ya que las regulaciones vigentes no siempre logran conectar de manera efectiva con las dinámicas del sector privado, los objetivos sociales y los desafíos medioambientales.

A partir de ello, se genera un llamado a brindar mecanismos de promoción de la colaboración entre gobiernos, empresas y sociedad civil, fundamentales para construir un entorno favorable de camino a la innovación y la sostenibilidad en el sector reciclador (Pérez Fabián, 2025). A medida que más pymes adoptan prácticas de economía circular, se abren nuevas oportunidades para fortalecer los sistemas productivos, mejorar la competitividad y contribuir a la protección del medioambiente.

A pesar de los avances logrados por las pymes recicladoras en Colombia, el sector continúa operando bajo un esquema marcado por un *status quo* caracterizado por tecnologías convencionales, escasa trazabilidad y limitada valorización de materiales. Las estrategias de reciclaje actuales, en su mayoría de tipo mecánico, presentan limitaciones operativas y ambientales (Schade et al., 2024).

Aunque el reciclaje químico surge como una alternativa de alto potencial, su adopción se ve limitada por los altos costos y las exigencias técnicas que impiden su implementación en pequeñas empresas. Asimismo, Bongers y Casas (2022) muestran que las tasas de reciclaje óptimas solo pueden alcanzarse cuando se superan barreras estructurales relacionadas con externalidades ambientales y la falta de incentivos claros. Esta situación genera una brecha entre el potencial real de las pymes y su capacidad efectiva para contribuir a una economía circular robusta.

Diversos estudios recientes han propuesto modelos más eficientes y sostenibles, adaptados a las realidades del sector. Yu et al., (2025) sugieren esquemas de subsidios y planes de reciclaje diseñados para residuos de construcción, que podrían aplicarse al plástico con criterios de costo-eficiencia y logística inversa. Asimismo, la implementación de tecnologías emergentes de la Industria 4.0, como el Internet de las cosas (IoT), el análisis de *big data* y los sistemas ciberfísicos, ha mostrado su efectividad en la automatización, la trazabilidad de materiales y la optimización de la cadena de valor del reciclaje (Quiroz-Flores et al., 2024).

En línea con ello, Bejarano et al., (2022) proponen indicadores como el RRSFM (Reincorporación de Residuos y Subproductos por Flujo de Materiales), que mide qué proporción de residuos se reincorpora al proceso productivo, y el HCRRS (Huella de Carbono de la Reincorporación de Residuos y Subproductos), que permiten medir la reincorporación de residuos y su huella de carbono, respectivamente, contribuyendo no solo a la optimización técnica, sino también a una visión más humana del reciclaje, en la cual las pymes son agentes clave de regeneración ambiental y social.

Problemáticas comunes de las pymes

La mayoría de las pymes recicladoras de plásticos en Colombia operan con altos niveles de informalidad, baja tecnificación y escasa capacidad de gestión ambiental, lo que limita su incorporación efectiva en los modelos de economía circular promovidos desde el nivel institucional. Estas empresas carecen, en muchos casos, de tecnologías limpias, protocolos estandarizados de manejo de residuos y esquemas de evaluación del desempeño ambiental o social, lo que acentúa su vulnerabilidad frente a los procesos de transición hacia la sostenibilidad (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020; Flórez Rendón y Cogollo Flórez, 2017).

Las pymes recicladoras de plástico en Bogotá enfrentan un conjunto de problemáticas estructurales que limitan su sostenibilidad técnica, económica y social, aun cuando constituyen un eslabón fundamental dentro del ecosistema de economía circular urbana.

Si bien estas organizaciones cumplen funciones clave en la revalorización de materiales y la mitigación de impactos ambientales, su consolidación como unidades productivas

sostenibles continúa obstaculizada por factores que trascienden el ámbito operativo. Las principales problemáticas identificadas en el diagnóstico son:

- Falta de acceso a financiación debido a bajos niveles de formalización o escaso historial crediticio.
- Infraestructura obsoleta o no certificada, con maquinaria artesanal y espacios inadecuados.
- Débil articulación institucional, con limitada vinculación a programas públicos o universidades.
- Restricciones técnicas por ausencia de procesos estandarizados y desconocimiento de normativas.
- Competencia desleal de actores informales, sin exigencias tributarias o ambientales.

Una primera problemática es la fragmentación de la cadena de valor del reciclaje, que en Bogotá se manifiesta a través de relaciones inestables entre recicladores de base, centros de acopio, pymes recicladoras y comercializadores. Esta desarticulación genera redundancias en la clasificación de materiales, pérdida de valor en los residuos recolectados y disputas informales por zonas de influencia y rutas de recuperación. La ausencia de una gobernanza territorial que coordine estos actores perpetúa condiciones de informalidad y competencia desleal (Hernández Alomia, 2025).

En segundo lugar, se identifica una débil capacidad de gestión empresarial. A pesar del crecimiento en volumen de residuos recuperados en Bogotá, muchas pymes operan sin herramientas básicas de planeación, análisis financiero o trazabilidad de materiales. Esta falencia impide su acceso a líneas de financiamiento verde, procesos de certificación o inclusión en cadenas de valor formalizadas, lo que reduce su competitividad frente a grandes transformadores industriales. Según Torres-Guevara, Prieto-Sandoval y Mejía-Villa (2021), la sostenibilidad empresarial exige no solo eficiencia operativa, sino también capacidad organizacional, visión de mercado y gobernanza interna.

Otra problemática transversal es la ausencia de incentivos fiscales y financieros diferenciados para el sector. Aunque existen instrumentos como el Plan Distrital de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) o los lineamientos de economía circular del Ministerio de Ambiente, la mayoría de las pymes recicladoras de Bogotá no acceden a ellos, ya sea por desconocimiento, dificultades técnicas para postulación o falta de requisitos formales (Hernández Alomia, 2025). Esta desconexión normativa se agrava en localidades periféricas, donde la institucionalidad ambiental o el acompañamiento empresarial son casi inexistentes.

Desde el punto de vista ambiental y sanitario, persiste una problemática crítica relacionada con el manejo inadecuado de subproductos contaminantes, especialmente en procesos de lavado, molienda y peletización de plásticos. Muchos establecimientos

carecen de sistemas de tratamiento de aguas residuales, ventilación forzada o aislamiento térmico, lo que genera riesgos de exposición tanto para los trabajadores como para las comunidades cercanas. Estos riesgos son agravados por el uso de equipos improvisados o fuera de norma, una práctica aún común en pequeños talleres ubicados en zonas residenciales o comerciales de alta densidad (Flórez Rendón y Cogollo Flórez, 2017; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022a).

En la misma línea y en complementariedad, las condiciones laborales siguen siendo precarias: muchos trabajadores carecen de seguridad social, contrato formal o equipos de protección, situación que afecta especialmente a mujeres y migrantes (Flórez Rendón y Cogollo Flórez, 2017).

Por último, se pone en evidencia una escasa innovación tecnológica y digital que restringe la mejora de procesos, la trazabilidad de materiales y la agregación de valor. Las pymes recicladoras en Bogotá trabajan con información fragmentada, sin sistemas digitales de inventario, monitoreo o proyección de producción. Esta condición limita su capacidad para responder a las exigencias del mercado posconsumo, en el que los compradores demandan trazabilidad, composición del material y certificaciones de circularidad o responsabilidad social (Schade et al., 2024).

Estas problemáticas no solo afectan la parte económica de las pymes recicladoras, sino que también comprometen su función estratégica como agentes de sostenibilidad urbana. Superarlas requiere intervenciones integrales que combinen asistencia técnica, políticas públicas inclusivas, inversión estructural y mecanismos efectivos de gobernanza colaborativa.

En Bogotá, estas dificultades se intensifican por la desarticulación de la cadena de valor. Existen relaciones inestables entre recicladores de base, acopiadores, pymes y comercializadores, lo que genera duplicación de esfuerzos, pérdida de valor en los residuos recolectados y conflictos informales por zonas de influencia (Hernández Alomia, 2025).

A esto se suma la limitada innovación tecnológica, que también es crítica. La mayoría de las pymes operan sin herramientas digitales para trazabilidad, control de inventarios o proyecciones de producción. Esto restringe su acceso a mercados posconsumo que exigen transparencia y certificaciones.

En términos sociales, la precariedad laboral sigue siendo una constante: contratos verbales, ausencia de afiliación al sistema de riesgos laborales, bajos salarios y escasas oportunidades de formación técnica. Esta situación afecta principalmente a mujeres y migrantes, quienes suelen ocupar los roles más expuestos dentro del proceso productivo.

Claves del valor compartido en pymes

El reciclaje de plásticos en Colombia, liderado en gran parte por pymes, configura un sector estratégico donde el potencial productivo y ambiental coexiste con desafíos estructurales que limitan su consolidación. Este análisis parte de reconocer que el sector no es homogéneo ni estático: es dinámico, multifactorial y profundamente territorial. Por ello, el enfoque de valor compartido es una herramienta para leer las tensiones activas que atraviesan al sector y sus posibilidades de transformación (Merli et al., 2018).

Las capacidades técnicas de las pymes pueden potenciarse mediante esquemas de innovación abierta, formación dual, alianzas público-comunitarias y digitalización gradual. Su rol debe verse no solo como operador logístico de residuos, sino como articulador de redes locales de sostenibilidad.

Las fortalezas del sector radican en su capacidad instalada distribuida, su experiencia acumulada en clasificación manual, la resiliencia de sus actores y su papel histórico como solucionadores informales del problema de residuos. Muchas de estas pymes se han sostenido por décadas a través de diferentes sistemas de recuperación y valorización sin apoyo estatal, articulando saberes técnicos con conocimiento comunitario (Bongers y Casas, 2022).

Sin embargo, estas fortalezas conviven con debilidades persistentes: baja tecnificación, informalidad, escaso acceso a crédito y débil planeación estratégica. Estas limitaciones, más que fallas individuales, reflejan las condiciones estructurales de exclusión en las que se insertan estas empresas: periferias urbanas, baja conectividad, educación técnica limitada y vacíos normativos para microindustrias recicladoras (Ramos Aranda y Duque Cuesta, 2020).

En el plano de las oportunidades se destacan el marco normativo favorable a la economía circular, el crecimiento del mercado de plásticos reciclados posconsumo y las exigencias de trazabilidad y sostenib ilidad en las cadenas de valor de grandes marcas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024). Estos factores abren un campo fértil para la articulación de las pymes recicladoras con programas de responsabilidad extendida del productor, compras públicas sostenibles y clústeres de economía verde.

No obstante, estas oportunidades se ven enfrentadas a amenazas reales: entrada agresiva de grandes actores industriales, concentración de mercados, subvaloración del precio del plástico reciclado y falta de reconocimiento del valor social del reciclaje. A esto se añaden los cambios normativos acelerados que, sin acompañamiento técnico, pueden convertirse en una barrera en lugar de una palanca de inclusión (Padilla-Rivera et al., 2024; Torres-Guevara et al., 2021).

Conectar capacidades con sostenibilidad: claves del valor compartido

Una de las apuestas centrales de este análisis es superar la lectura fragmentada de la cadena de valor del reciclaje. Esta no debe reducirse a flujos de materiales o ingresos, sino ampliarse hacia una lógica de valor compartido, en la que la eficiencia operativa se combine con la sostenibilidad social, ambiental y territorial (Torres-Guevara, Prieto-Sandoval y Mejía-Villa, 2021).

En esta perspectiva, las pymes recicladoras pueden posicionarse como nodos estratégicos de transformación si logran conectar sus capacidades técnicas, organizativas y territoriales con ecosistemas de innovación local, políticas de inclusión productiva y esquemas de creación entre las comunidades y la academia (Quiroz-Flores, Andrade y Jiménez, 2022). La integración de ingeniería de procesos sostenibles, trazabilidad digital, cultura de mejora continua y protocolos de salud ocupacional son condiciones necesarias para dar ese salto cualitativo.

Asimismo, la cadena de valor debe incluir a actores históricamente invisibilizados: recicladores de base, proveedores comunitarios, operarios no formalizados y consumidores responsables. Su inclusión no solo fortalece el sistema, sino que lo hace más resiliente, justo y legítimo (Bongers y Casas, 2022; Torres-Guevara, Prieto-Sandoval y Mejía-Villa, 2021).

Valor social del reciclaje en territorios periféricos: el caso Bogotá

Bogotá sintetiza muchas de las tensiones estructurales del reciclaje en el país; la ciudad concentra una parte importante del volumen de residuos plásticos recuperables, pero su cadena de valor opera de forma segmentada, con escasa articulación entre los actores productivos, sociales e institucionales.

La mayoría de las pymes recicladoras se ubican en localidades periféricas como Bosa, Ciudad Bolívar, Usme y San Cristóbal, donde las condiciones de infraestructura, movilidad y salud pública limitan el desarrollo empresarial (Hernández Alomia, 2025).

Estas empresas cumplen una función crucial que no abarca solo la transformación de los residuos, sino que generan ingresos, ocupación y cohesión social en entornos marcados por el desempleo, la violencia o la marginalidad. El reciclaje, en estos contextos, es mucho más que una práctica ambiental: es una estrategia de supervivencia digna, una forma de economía popular con sentido de territorio (Bongers y Casas, 2022; Hernández Alomia, 2025).

El análisis de Bogotá confirma que los problemas del sector no se deben a la falta de capacidad, sino a la ausencia de mecanismos que permitan escalar esas capacidades bajo principios de equidad, sostenibilidad y justicia ambiental (Pérez Fabián, 2025; Torres-Guevara et al., 2021).

Esta situación evidencia una disparidad entre el discurso de circularidad impulsado por políticas públicas y la realidad operativa de los actores que más contribuyen a la recuperación de materiales, especialmente en contextos periféricos y excluidos del aparato productivo formal. En este escenario, se hace necesario fortalecer la investigación aplicada que articule los saberes técnicos, la gestión intersectorial y el desarrollo de capacidades locales como base para una economía circular incluyente y contextualizada (Torres-Guevara et al., 2021; Circular Economy Coalition, 2022).

Por lo que Colombia puede representar un campo fértil para la investigación aplicada que conecte los saberes técnicos con la justicia ambiental y el desarrollo de capacidades locales.

El reciclaje de plásticos en Colombia, liderado en gran parte por pymes, configura un sector estratégico donde el potencial productivo y ambiental coexiste con desafíos estructurales que limitan su consolidación.



Capítulo 4

Análisis de resultados y evidencias para el modelo circular



El presente capítulo presenta los hallazgos derivados del ejercicio de investigación doctoral desarrollado, en el cual se efectuaron análisis de tipo cuantitativo y cualitativo y, con el propósito de evaluar sus avances en la implementación del modelo circular, se aplicaron una serie de instrumentos que permitieron abordar cinco dimensiones clave: ecológica, económica, social, tecnológica y transversal, a 16 pymes recicladoras de plásticos en Bogotá.

Este conjunto de evidencias empíricas constituye la base para la construcción del modelo ajustado, que será presentado en el siguiente capítulo, toda vez que los resultados fueron sistematizados por medio de análisis estadísticos (frecuencias, correlaciones, árboles de decisión, clústeres) y análisis interpretativos de testimonios.

Fundamentación metodológica

En concordancia con los objetivos planteados, se desarrolló una investigación doctoral bajo una metodología de tipo exploratorio, descriptivo y proyectivo, con adopción de un diseño de enfoque secuencial cualitativo-cuantitativo de tipo exploratorio. El proceso comenzó con la recolección de datos cualitativos mediante entrevistas semiestructuradas, seguidas por la recolección y análisis de datos cuantitativos mediante cuestionarios estructurados. Este diseño permitió la integración sistemática de la información, fortaleciendo la comprensión profunda del fenómeno investigado (Creswell y Plano Clark, 2018; Hernández-Sampieri et al., 2022).

Desde la perspectiva exploratoria, la investigación se aplica a fenómenos de interés cuyos rasgos aún no han sido completamente examinados. Se emplean procesos básicos de análisis de datos, lo que permite identificar la frecuencia de ocurrencia del fenómeno y sus características generales (Ramos Aranda y Duque Cuesta, 2020).

En este contexto, el estudio se centra en identificar y comprender las oportunidades y desafíos asociados con la implementación de un modelo de economía circular en pymes recicladoras de plásticos. Dada la naturaleza emergente de este campo en Colombia, donde se enfrentan retos como la eficiencia en la recolección, clasificación y procesamiento de residuos, resulta pertinente un enfoque exploratorio.

La economía circular se presenta como una estrategia para optimizar recursos, reducir impactos ambientales y mejorar la competitividad de las pymes. Sin embargo, su adopción continúa enfrentando incertidumbres, barreras normativas, tecnológicas y culturales. Es así como los resultados de la investigación buscaron identificar buenas prácticas internacionales, evaluar su adaptabilidad al contexto colombiano y proponer estrategias realistas y acordes a sus procesos, circunscribiendo alianzas estratégicas con diferentes sectores, como el gobierno, universidades y empresas privadas, para fortalecer la cadena de valor y garantizar de esta manera la sostenibilidad del modelo propuesto.

Desde el enfoque descriptivo, al reconocer las características del fenómeno de estudio, se pretende exponer su presencia en un grupo determinado, aplicando análisis de datos de tendencia central (Ramos Aranda y Duque Cuesta, 2020). Para este caso, el interés no radica en modificar las operaciones de las plantas de reciclaje en Bogotá, sino en describir sistemáticamente cómo funcionan actualmente. Así, se recopilaron datos concretos sobre capacidades, eficiencias y tecnologías empleadas, contribuyendo a un diagnóstico preciso del sector.

Es importante destacar que en Colombia existe una escasez de estudios descriptivos sobre reciclaje de plásticos, lo que limita, quizá, el conocimiento previo disponible para la formulación de políticas públicas y mejoras en la gestión de residuos. Por ende, el estudio aportó información de interés estratégico para el diseño de programas de sostenibilidad.

En el contexto actual, resulta pertinente la aplicación metodológica, ya que el enfoque secuencial permite comprender los desafíos ambientales en los que se encuentran las pymes recicladoras de plástico y que exigen alternativas al cambio climático, el agotamiento de recursos y la contaminación por plásticos. De manera significativa, el enfoque refuerza la comprensión del papel estratégico de las pymes en la transición hacia modelos de economía circular.

En la fase cualitativa, para el análisis de textos provenientes de las entrevistas abiertas, se utilizó la técnica del modelado de temas (*topic modeling*) con el algoritmo *Latent Dirichlet Allocation* (LDA) (Blei et al., 2003; Palomo Llinares y Sánchez-Tormo, 2023), descubriendo de esta manera patrones temáticos y enriqueciendo la interpretación de los datos, conectando con la metodología aplicada.

El alcance de esta investigación, acorde con Hurtado (2012), es proyectivo, al buscar la propuesta de un modelo circular basado en los principios de ingeniería de procesos como alternativa para impulsar el desarrollo sostenible de las pymes recicladoras de plásticos en Bogotá.

De acuerdo con Hernández-Sampieri et al., (2022), el enfoque aplicado a esta investigación fortalece la validez interna y externa de los resultados. Cada fase incorporó herramientas metodológicas específicas, como entrevistas abiertas, cuestionarios

estructurados, análisis de contenido mediante *LDA* —como se especificó anteriormente— y una evaluación cuantitativa, siguiendo los criterios de rigor propuestos por Creswell y Plano Clark (2018), con *Random Forest*.

La estructuración del modelo circular se ha sustentado en los principios fundamentales de la ingeniería de procesos, mediante la lógica de optimización y sistematización de actividades clave, lo que permitió construir procesos estratégicos orientados al aprovechamiento eficiente de recursos, la reducción de residuos y la integración operativa de las dimensiones económica, social y ambiental (Vera-Acevedo y Raufllet, 2022).

Análisis cualitativo general

En esta investigación, desde el enfoque cualitativo, se utilizó la técnica de entrevista semiestructurada aplicada a empleados de empresas recicladoras de plásticos considerados informantes clave porque han incorporado prácticas de economía circular. A partir de las respuestas brindadas, se generó un análisis interpretativo de carácter dialógico, orientado a captar tanto los contenidos manifiestos como los significados implícitos en las narrativas de los participantes (Flick et al., 2015; Taylor y Bogdan, 2020).

El resultado de este proceso sistematizó de forma estructurada las percepciones de los empleados frente a tres ejes temáticos:

- beneficios sociales y laborales;
- desafíos y oportunidades;
- estrategias proyectadas para el fortalecimiento de la economía circular.

Lo anterior ayudó a establecer un procedimiento de codificación abierta y axial (Corbin y Strauss, 2015); así, se pudieron agrupar categorías emergentes y el establecimiento de relaciones conceptuales entre los discursos.

Gerentes de operaciones: capacidad, tecnología, recolección, colaboración

Con el propósito de profundizar en la comprensión del funcionamiento operativo, se incluyó en esta investigación un análisis interpretativo de la dialógica sostenida con los informantes clave gerenciales (IcGO) de las pymes recicladoras de plásticos en el contexto de la economía circular. En ella se sistematizan las respuestas de los gerentes de operaciones frente a aspectos estratégicos, como la capacidad de procesamiento diario, el tipo de tecnologías implementadas, los métodos de recolección y separación, así como las medidas de colaboración, proyecciones de mejora y necesidades de política pública.

Esta información se organizó mediante un enfoque cualitativo interpretativo, basado en categorías emergentes construidas a partir de codificación abierta y axial (Corbin y Strauss, 2015), permitiendo identificar patrones comunes, contrastes relevantes y elementos clave para el diseño de un modelo de economía circular adaptado al contexto local.

En cuanto a la capacidad operativa, el análisis de la discursiva de los informantes y, basados en la infraestructura y tecnología de las pymes, muestra que las empresas tienen diferentes capacidades y rendimientos. Si bien algunas plantas están operando cerca de su capacidad máxima, otras han realizado mejoras significativas para aumentar su productividad. Por otra parte, la disponibilidad de materiales reciclables también juega un papel importante en el rendimiento diario.

En conjunto, estas plantas están bien posicionadas para contribuir significativamente al reciclaje de plásticos, aunque se reconoce que hay margen para optimizar la capacidad y eficiencia mediante inversiones adicionales y mejoras tecnológicas.

Respecto a este punto, los gerentes de operaciones difieren en sus respuestas cuando se les preguntó sobre la capacidad diaria de procesamiento de plásticos de la planta de reciclaje. El (IcGO1) expresó que "en la empresa se recicla entre 20 a 30 kilos de plásticos diariamente". De igual forma, en la empresa del (IcGO4) señaló que, por la tecnología que actualmente tienen, "la planta procesadora de plásticos genera 35 kilos diarios". A lo descrito se suma lo expuesto por el (IcGO7), quien sostuvo que diariamente producen "28 kilos de plásticos".

De igual modo, la discursiva de los informantes revela que las instalaciones de reciclaje poseen distintos grados de equipo y habilidades de procesamiento. Algunas instalaciones se encuentran adecuadamente equipadas con diversas máquinas que facilitan un ciclo integral de reciclaje en la misma infraestructura, mientras que otras se enfocan en fases del proceso de manera muy concreta y requieren de la cooperación con otras compañías del sector.

Es importante tener en cuenta que la presencia de equipos de vanguardia, como la peletización, incrementa la eficacia y la capacidad productiva de las instalaciones de reciclaje; asunto que se comprueba desde lo manifestado por el (IcGO3): "Contábamos solamente con la máquina de lavado y la de triturar plásticos hasta que adquirimos la de peletización".

Por su parte, el (IcGO5) dijo que en la empresa solo cuentan "con la máquina trituradora; de ahí se la entregamos a otra empresa para que continúe con el proceso de lavado y triturado".

También está el caso de quienes poseen únicamente la máquina que tritura el material y, por otro lado, el (IcG16) manifiesta que en su pyme "nada más tenemos la máquina de lavado que le hacemos al plástico cuando otra empresa nos lo trae para eso solamente".

En relación con la recolección, al analizar las respuestas sobre la eficiencia de los sistemas de recolección implementados, se evidenció que los informantes suministraron detalles referidos a una variedad de estrategias y procedimientos aplicados para la recolección de materiales reciclables.

Se destacó especial atención en la sensibilización y la implicación de la comunidad. En ese sentido, se mencionó el abordaje de una estrategia integral que comprende la instalación de recipientes identificados, charlas de sensibilización, diferentes métodos de recolección, programas de estímulo y la divulgación a los vecinos.

Estas acciones conjuntas resultan eficaces para incrementar la eficacia de la recolección y fomentar una cultura de reciclaje sustentable. Así lo refiere el IcGO2: "Recolectamos material en las escuelas, negocios grandes, en los sectores; ahí colocamos depósitos y previamente ya hemos informado a las comunidades sobre el destino del material, dando charlas para crear conciencia sobre el reciclaje y cuidado del ambiente".

El (IcGO6): "Un día a la semana se reciben los vendedores que recolectan por las casas material reusable, sobre todo el plástico; otro día se sale a recoger los envases de depósitos que se han colocado, ya sea en las escuelas, en comercios, restaurantes y comunidades cercanas".

Finalmente, el (IcG15) señala: "Con varias escuelas, restaurantes, tiendas y comunidades, se les ubica los envases para depositar material reusable; ese material se recoge y aquí los empleados lo clasifican, lo limpian y lo trituran".

Con respecto a la colaboración y redes, la información suministrada por los actores sociales detalla prácticas de cooperación entre compañías en el procedimiento de reciclaje de plásticos. En este orden, la ayuda entre las compañías comprende la colaboración en la trituración y limpieza de materiales, así como la transferencia de procesos a otras compañías.

La presencia de maquinaria potente y una cultura de apoyo recíproco favorecen la eficacia y eficiencia de estas prácticas de colaboración. Así lo revela el (IcGO6): "Sí, colaboramos porque aquí llega el material para hacerle el lavado y de ahí la pasamos a otra empresa para que continúen con el proceso de transformación del material". Igualmente, el (IcGO2) indicó: "Sí, colaboramos porque nosotros contamos con máquinas potentes que hacen rápidamente el trabajo", mientras que el (IcG11) añadió: "Sí, pues, entre las pymes se promueve la colaboración con el fin de mantenernos activos en la cadena de valor del reciclaje".

Finalmente, el análisis de la discursiva revela una serie de planes y objetivos futuros para mejorar y optimizar las operaciones de reciclaje de plásticos. Por lo cual, se presenta así una estrategia completa y audaz para perfeccionar las operaciones de reciclaje de plásticos. Estos planes contemplan la mejora de infraestructura, la compra de maquinaria y tecnología de vanguardia, la edificación y actualización de instalaciones,

el fortalecimiento de alianzas entre el sector público y privado, el refuerzo de campañas de sensibilización, la exploración de materiales alternativos y la creación de productos reciclables.

Estas acciones conjuntas tienen como objetivo no solo incrementar la capacidad y eficiencia productiva, sino también promover la cooperación entre sectores y crear soluciones innovadoras y sostenibles. Los entrevistados así lo expresan: "Mejorar la infraestructura, adquirir maquinarias más avanzadas para aumentar la productividad" (IcGO1).

El (IcGO3) agrega "consolidar alianzas entre el sector público y privado con el propósito de desarrollar proyectos conjuntos".

Por su parte, el (IcGO5) va más allá de la conformidad del reciclaje de plásticos al mencionar la búsqueda de "material alternativo al plástico de mayor facilidad para transformarse".

Finalmente, el (IcG13) sostiene que, a futuro, han considerado incorporar "tácticas de disminución, reutilización, reciclaje y recuperación para reducir al mínimo el efecto en el medioambiente".

Empleados: beneficios sociales, desafíos y sostenibilidad futura

Se observaron coincidencias en la información proporcionada por los informantes clave empleados (ICE), quienes expresaron de forma consistente que la implementación de modelos de economía circular en las empresas pymes recicladoras de plásticos ha generado un impacto social significativo, destacando beneficios fundamentales derivados de dichas prácticas, sobresaliendo la generación de empleo.

El (IcE2) señaló que "la implementación de prácticas de economía circular ha creado nuevas oportunidades de trabajo", a lo cual el (IcE3) agregó que los puestos generados han sido en sectores como "la recolección, clasificación y tratamiento de materiales reciclables".

Por su parte, el (IcE4) destacó que, aparte del beneficio económico, se han mejorado las condiciones laborales, la capacitación y el desarrollo de habilidades, y la reducción del impacto ambiental.

Igualmente, el (IcE9) resaltó que "al fomentar acciones ecológicas, la empresa no solo reduce su huella ecológica, sino que también instruye a la comunidad sobre la importancia del reciclaje y la adecuada gestión de residuos".

En línea con esto, el (IcE10) manifestó que “la implementación de tecnologías avanzadas y métodos eficientes ha permitido a la empresa incrementar su competitividad en el mercado, generando beneficios económicos tanto para la empresa como para la comunidad”, mientras que el (IcE15) indicó que “en los empleados se han mejorado sus habilidades y conocimientos, aumentando su oportunidad de un mejor desempeño en su trabajo”.

Asimismo, el (IcE6) expresó que los trabajadores han sido “capacitados en áreas como el ecodiseño, la administración eficaz de recursos y la puesta en práctica de principios de economía circular”.

A su vez, el (IcE16) destacó que, al reducir la cantidad de residuos que terminan en los vertederos y minimizar la contaminación del medioambiente, la empresa promueve un entorno más saludable para la comunidad.

Cabe señalar que estas acciones han favorecido tanto a los empleados, dotándolos de competencias técnicas y saberes en prácticas sustentables, como a la comunidad local, al reducir el volumen de desechos en los vertederos y minimizar la polución ambiental, promoviendo un ambiente más sano para los habitantes de la zona.

En consecuencia, las empresas no solo disminuyen su impacto ecológico, sino que también instruyen a la comunidad sobre la relevancia del reciclaje y la correcta administración de desechos, promoviendo el crecimiento sostenible.

Dicho de otro modo, las iniciativas de economía circular aplicadas por las recicladoras de plásticos han producido ventajas considerables; entre ellas, la generación de puestos de trabajo, la mejora de las condiciones laborales, la formación de los empleados y la disminución del efecto en el medioambiente. Estas acciones benefician tanto a la empresa en términos de eficacia y competitividad como al bienestar y desarrollo comunitario.

Desde las voces de los (ICE), también se pudieron conocer los desafíos y oportunidades que enfrentan las empresas recicladoras de plásticos como resultado de la implementación de prácticas de economía circular. En ese sentido, se mencionaron como desafíos los costos y esfuerzos técnicos, ya que consideran que la adopción de tecnologías de vanguardia para una administración eficaz de recursos resulta costosa y técnicamente exigente.

Así lo expresa el (IcE1), quien afirma que la empresa “ha tenido que poner en práctica tecnologías y técnicas innovadoras”, coincidiendo con el (IcE12), quien destaca que “uno de los retos más significativos radica en la necesidad de implementar tecnologías y métodos innovadores para gestionar el agua de manera eficiente”.

Para el (IcE15), una de las principales barreras ha sido “las normativas y políticas medioambientales que se transforman en barreras burocráticas para la puesta en marcha de prácticas circulares”.

También se mencionó la falta de infraestructura adecuada, ya que "la necesaria para recoger, categorizar y tratar los materiales reciclables puede ser deficiente o insuficiente" (IcE3), y la "ausencia de políticas públicas definidas y acordes puede obstaculizar la puesta en marcha de prácticas circulares" (IcE2).

En contraste, los informantes resaltaron que se cuentan con diversas oportunidades, tales como emplear desechos urbanos y materiales reciclados para elaborar nuevos productos, implementar tácticas que disminuyan gastos y potencien la eficiencia, promover inversiones orientadas hacia la sostenibilidad y la responsabilidad ecológica, e impulsar el desarrollo empresarial a través de la reutilización de subproductos e innovación en los modelos de negocio (IcE1).

El (IcE2) añadió que una oportunidad clave es "la creación de nuevos productos, la cooperación con organismos públicos y privados para llevar a cabo proyectos compartidos y compartir recursos".

Asimismo, destacó "el desarrollo de nuevos esquemas empresariales enfocados en el reaprovechamiento y reciclaje de materiales, como el reciclaje de plásticos, electrónicos y metales", así como "la puesta en marcha de programas de educación y concienciación para incrementar la implicación de la comunidad en las prácticas de reciclaje y economía circular".

También se mencionó como oportunidad la implementación de tecnologías innovadoras para incrementar la eficacia del reciclaje y la creación de nuevos productos, y la cooperación interinstitucional para proyectos de economía circular (IcE4, IcE15). Desde las narrativas de los informantes se precisa que el monitoreo, la transparencia, el perfeccionamiento de la logística de transferencia de residuos y la mejora de la infraestructura son factores cruciales para incrementar la eficacia de las prácticas circulares. De igual manera, la ausencia de políticas públicas claras sigue siendo un obstáculo por superar.

En cuanto a la sostenibilidad y el futuro de las empresas recicladoras, los informantes clave señalaron que estas planean mantener y mejorar sus prácticas de economía circular. El IcE1 explicó que su empresa tiene planificado "desarrollar productos diseñados para que sean reutilizables y reciclables, promover la restauración y modernización de productos, transformar materiales históricamente considerados residuos en nuevas materias primas y establecer programas destinados a la devolución y reciclaje de bienes".

Por su parte, el (IcE7) destacó "la innovación tecnológica, la capacitación y concientización, la colaboración con otras entidades y la mejora continua de sus procesos". El (IcE6) enfatizó la importancia de "la formación y sensibilización, así como la cooperación", mientras que el (IcE5) subrayó que el centro de la planeación empresarial es "el perfeccionamiento constante de sus procedimientos".

Este análisis cualitativo se vincula con el *objetivo específico 3*, la *pregunta de investigación P3* y la *hipótesis H3*, al hacer evidente que la infraestructura, la gestión de procesos y la colaboración interempresarial influyen directamente en la eficiencia operativa de las pymes recicladoras dentro del modelo de economía circular.

Resultados por dimensión

Mediante estadística descriptiva, el tratamiento de datos cuantitativos se realizó, incluyendo el cálculo de frecuencias absolutas y relativas, medidas de tendencia central (media) y medidas de dispersión (varianza y coeficiente de variación).

En cuanto a las preguntas de percepción, las respuestas se codificaron utilizando una escala tipo Likert de 1 a 5, cuyos niveles se presentan en la tabla 2, donde 1 representa el nivel más bajo y 5 el nivel más alto en términos de implementación o percepción, de acuerdo con la pregunta establecida.

Tabla 2. Escala tipo Likert

Valor	Categoría
1	Muy bajo
2	Bajo
3	Moderado
4	Alto
5	Muy alto

Nota. En la tabla se presenta la escala tipo Likert para las preguntas de percepción.

Fuente: elaboración propia.

Las categorías “moderado”, “alto” y “muy alto” fueron interpretadas de acuerdo con su posición relativa dentro de la escala; por tanto, la categoría “moderado” indica una posición intermedia, sin polaridad extrema, y se asocia a una percepción de cumplimiento o presencia parcial de la característica evaluada, sin considerarse ni deficiente ni sobresaliente.

La recolección de datos para las variables de desempeño ecológico (porcentaje de reciclaje, disminución de residuos sólidos plásticos y reducción de emisiones contaminantes) se realizó a través del uso de rangos porcentuales y se categorizó en niveles de percepción.

Los resultados de los instrumentos implementados se presentan mediante porcentajes, con su respectivo análisis de varianza, índice de consenso general y análisis de

asimetría, reflejando en las dimensiones ecológica, económica, social, tecnológica y transversal una visión integral de las tendencias observadas.

Se valoraron variables clave, como la eficacia en la utilización de materiales, la reducción de desechos y emisiones, la rentabilidad económica, los beneficios sociales y laborales, la innovación tecnológica, la colaboración interempresarial y la percepción de satisfacción general. Por lo cual, los hallazgos obtenidos permiten discutir las oportunidades y los retos vinculados con la transición de las organizaciones hacia un modelo de economía circular sostenible.

Dimensión ecológica

La dimensión ecológica refleja la apropiación de principios ambientales del modelo circular por parte de las pymes recicladoras, compuesta por tres indicadores clave:

- tasa de reciclaje y reutilización,
- reducción de residuos,
- reducción de emisiones contaminantes.

Resultados cuantitativos

Tabla 3. Resultados cuantitativos dimensión ecológica

Indicador	Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Análisis
Tasa de reciclaje y reutilización (P1)			93,8 %	6,2 %	Este resultado evidencia que las empresas han avanzado de forma consistente en la implementación de prácticas de aprovechamiento de materiales y reincorporación de residuos al proceso productivo. No obstante, aún predominan niveles intermedios, lo que indica margen para una mayor sofisticación operativa.
Reducción de residuos (P2)			81,2 %	18,8 %	Refleja una tendencia positiva hacia la gestión adecuada de residuos mediante separación, clasificación y reaprovechamiento interno. La ausencia de valoraciones bajas sugiere apropiación generalizada de prácticas básicas circulares en el sector.
Reducción de emisiones contaminantes (P3)	81,2 %	18,8 %			Presenta el desempeño más rezagado de la dimensión ecológica. La alta concentración en niveles bajos evidencia limitaciones en tecnologías limpias, eficiencia energética o sistemas específicos de mitigación ambiental.

Indicador	Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Análisis
Análisis integrador					En conjunto, los datos revelan que las pymes recicladoras han logrado avances importantes en reciclaje, reutilización y manejo de residuos, consolidando prácticas ecológicas funcionales. Sin embargo, el componente relacionado con reducción de emisiones continúa rezagado, lo que muestra una transición ambiental parcial y la necesidad de incorporar innovación tecnológica sostenible.

Fuente: elaboración propia.

Evidencia cualitativa vinculada

Los testimonios recogidos revelan que las pymes recicladoras han logrado incorporar prácticas ambientales con impacto tangible en la reducción de residuos, aunque persisten desafíos en la mitigación de emisiones.

El (IcE9) destacó que "la empresa reduce su huella ecológica al fomentar acciones sostenibles", mientras que el (IcE16) subrayó que "el entorno es más saludable gracias al manejo adecuado de residuos".

Desde el enfoque gerencial, el (IcGO2) describió estrategias integrales de recolección con participación comunitaria, como la "instalación de depósitos en escuelas y charlas de sensibilización ambiental", las cuales fortalecen la cultura de reciclaje.

No obstante, no se hacen evidentes menciones claras al uso de tecnologías limpias avanzadas, lo que coincide con las valoraciones cuantitativas bajas en emisiones.

Esta convergencia sugiere que el componente ecológico del modelo está en consolidación, con logros en la gestión de residuos, pero rezago en innovación tecnológica ambiental.

Dimensión económica

La dimensión económica del modelo circular aborda los beneficios financieros derivados de la implementación de prácticas circulares en las pymes recicladoras. Incluye tres indicadores fundamentales:

- rentabilidad económica,
- eficiencia en los costos de procesamiento,
- calidad del producto reciclado.

Resultados cuantitativos

Tabla 4. Resultados cuantitativos dimensión económica

Indicador	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Análisis
Rentabilidad económica (P4)		12,5 %	87,5 %		Aunque se perciben beneficios financieros derivados del modelo circular, estos aún no se traducen en una rentabilidad alta o sostenida. Predomina un escenario de equilibrio operativo con márgenes limitados.
Eficiencia en los costos de procesamiento (P5)		18,8 %	81,2 %		La mayoría de las empresas ha optimizado parcialmente sus costos mediante reaprovechamiento de insumos y reducción de residuos. Sin embargo, persisten ineficiencias estructurales y restricciones tecnológicas en algunos casos.
Calidad del producto reciclado (P6)		12,5 %	87,5 %		Los productos reciclados alcanzan niveles aceptables para el mercado, aunque todavía existen barreras técnicas y de materia prima que dificultan estándares superiores de calidad o certificación.
Análisis integrador					En conjunto, los resultados de esta dimensión muestran un desempeño económico estable y funcional, con predominio de valoraciones moderadas en rentabilidad, eficiencia de costos y calidad del producto. Las pymes han logrado sostenibilidad operativa básica, pero requieren mayor innovación, escalabilidad y valor agregado para consolidar ventajas competitivas sostenidas.

Fuente: elaboración propia.

Evidencia cualitativa vinculada

Los relatos de gerentes y empleados reflejan una percepción de estabilidad operativa, con oportunidades de mejora en rentabilidad y escalabilidad.

El (IcGO1) reportó una capacidad diaria de reciclaje entre 20 y 30 kilos, mientras que el (IcGO4) y (IcGO7) indicaron cifras similares, evidenciando márgenes productivos limitados.

Sin embargo, algunos actores, como él (IcE10), afirmaron que "la implementación de tecnologías avanzadas ha incrementado la competitividad", lo que sugiere que la incorporación de innovación puede traducirse en ventajas económicas cuando se acompaña de inversión estratégica.

A pesar de estos avances puntuales, persiste una brecha estructural en la generación de valor agregado, asociada a limitaciones tecnológicas, procesos poco estandarizados y ausencia de economías de escala.

En conjunto, la evidencia cualitativa respalda los hallazgos cuantitativos, mostrando una eficiencia funcional, pero una rentabilidad aún no consolidada.

Dimensión social

La dimensión social del modelo circular evalúa el impacto del enfoque sostenible sobre el capital humano y su entorno comunitario. Incluye cuatro indicadores:

- impacto social y laboral,
- satisfacción con la economía circular,
- sostenibilidad futura (prestaciones y estabilidad),
- impacto en la comunidad local.

La dimensión ecológica refleja la apropiación de principios ambientales del modelo circular por parte de las pymes recicladoras.

Resultados cuantitativos

Tabla 5. Resultados cuantitativos dimensión social

Indicador	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Análisis
Impacto social y laboral (P7)	12,5 %	31,2 %	56,2 %		La mayoría de las pymes reconoce mejoras internas en el clima laboral, el reconocimiento del rol de los trabajadores y las condiciones generales del entorno laboral, gracias a la adopción de prácticas circulares.
Satisfacción con la economía circular (P8)	12,5 %	87,5 %			Indica una percepción positiva, aunque conservadora: las empresas reconocen avances funcionales y mejoras generales, pero aún no asocian el modelo circular con un nivel de satisfacción plena o de alto impacto.
Sostenibilidad y futuro del trabajo (P9)	18,8 %	81,2 %			Sugiere que el modelo circular ha contribuido a generar confianza en la permanencia y formalización del trabajo en las empresas recicladoras.
Impacto en la comunidad local (P10)	12,5 %	31,2 %	50,0 %	6,2 %	Indica una percepción positiva mayoritaria sobre el rol de estas empresas en su entorno, ya sea mediante generación de empleo, alianzas con recicladores de base o participación en procesos comunitarios.
Análisis integrador: los resultados de esta dimensión evidencian un impacto social muy favorable, con predominancia de valoraciones altas en indicadores como el bienestar, la sostenibilidad del empleo y el relacionamiento con la comunidad.					

Fuente: elaboración propia.

Evidencia cualitativa vinculada

Los testimonios de empleados revelan, de forma consistente, que el modelo circular ha generado transformaciones positivas tanto al interior de las pymes como en su relación con la comunidad.

El IcE2 señaló que “la implementación de prácticas de economía circular ha creado nuevas oportunidades de trabajo”, mientras que el IcE4 e IcE15 destacaron mejoras en condiciones laborales, formación de competencias y estabilidad.

Estas percepciones se ven reforzadas por los relatos del IcE9, quien enfatizó el rol educativo de las empresas en la comunidad, y del IcGO6, que detalló estrategias de sensibilización ambiental y cooperación con actores locales.

Esta convergencia de voces confirma que las prácticas circulares no solo fortalecen el bienestar laboral, sino que también posicionan a las pymes como agentes activos en el desarrollo comunitario, validando así la conexión entre el impacto social y la sostenibilidad del modelo implementado.

Dimensión tecnológica

La dimensión tecnológica evalúa la capacidad de las pymes recicladoras para incorporar herramientas técnicas, procesos innovadores y competencias relacionadas con la economía circular. Está compuesta por tres indicadores:

- capacitación en prácticas circulares,
- innovación tecnológica,
- uso de tecnologías limpias.

Resultados cuantitativos

Tabla 6. Resultados cuantitativos dimensión tecnológica

Indicador	Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Análisis
Capacitación en prácticas circulares (P12)	6,2 %	25,0 %	50,0 %	18,8 %	La distribución evidencia debilidades importantes en formación técnica. Aunque la mitad de las empresas se ubica en nivel moderado, persisten brechas de conocimiento que limitan la apropiación de prácticas innovadoras y la mejora operativa sostenida.
Innovación tecnológica (P13)	18,8 %	68,8 %	12,5 %		Muestra esfuerzos reales de modernización, pero en una fase funcional básica. La mayoría de las pymes ha iniciado procesos de innovación, aunque con restricciones asociadas a recursos, asistencia técnica y articulación con centros de desarrollo.
Uso de tecnologías limpias (P11)			87,5 %	12,5 %	Refleja una adopción parcial pero positiva de soluciones más sostenibles. Las empresas incorporan tecnologías funcionales, aunque aún sin transformaciones integrales en eficiencia energética, tratamiento de residuos o mitigación ambiental avanzada.

Indicador	Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Análisis
Análisis integrador					En conjunto, la dimensión tecnológica evidencia avances graduales y significativos. La mayoría de las pymes ha superado la etapa inicial de incorporación tecnológica y se ubica en un nivel intermedio de madurez. No obstante, persisten retos en capacitación especializada, acceso a equipos de mayor sofisticación y autonomía operativa para consolidar una transformación tecnológica sostenible.

Evidencia cualitativa vinculada

La evidencia cualitativa muestra contrastes marcados en la apropiación tecnológica entre las pymes recicladoras. Mientras el (IcGO3) destacó avances significativos con la incorporación de equipos, como la peletizadora: “hasta que adquirimos la máquina de peletización”, otros gerentes, como el (IcGO5) y el (IcGO16), revelaron limitaciones operativas al depender de terceros para completar el ciclo de reciclaje, afirmando que solo cuentan “con la trituradora” o “la máquina de lavado”.

Esta fragmentación tecnológica se refleja también en las voces de los empleados: el (IcE1) y el (IcE15) mencionaron los altos costos y la complejidad técnica como principales barreras para adoptar tecnología innovadora, mientras que el (IcE12) resaltó la necesidad de “gestionar eficientemente recursos como el agua”.

Estas narrativas coinciden con los resultados cuantitativos en los niveles moderados en innovación y bajos en formación técnica. En conjunto, se pone en evidencia una implementación parcial de soluciones tecnológicas, con un nivel intermedio de madurez y grandes retos en infraestructura, capacitación y autonomía operativa.

Dimensión transversal

Esta dimensión evalúa el estado integral del modelo circular desde una mirada sistémica; es clave para entender el grado de madurez organizacional y el impacto global de la circularidad en las pymes recicladoras, considerando tres aspectos esenciales:

- eficiencia general de los procesos,
- Colaboración entre pymes,
- Satisfacción global con la implementación del modelo.

Resultados cuantitativos

Tabla 7. Resultados cuantitativos dimensión transversal

Indicador	Muy Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Análisis
Eficiencia general de los procesos (P14).		12,5 %	75,0 %	12,5 %	Este resultado sugiere que las pymes, en términos generales, han logrado estabilizar sus operaciones mediante prácticas circulares, aunque todavía no alcanzan niveles avanzados de optimización. La eficiencia percibida parece responder más a esfuerzos internos sostenidos que a una transformación estructural total.
Colaboración entre pymes (P15).	12,5 %	31,2 %	43,8 %	12,5 %	Aunque hay indicios de articulación entre empresas del sector, son esfuerzos aislados; todavía no existen redes colaborativas consolidadas. La fragmentación del ecosistema reciclador, la competencia local y la falta de plataformas de cooperación dificultan el fortalecimiento de alianzas estratégicas.
Satisfacción global con el modelo circular (P16).	12,5 %	31,2 %	43,8 %	12,5 %	Confirma la estrecha relación entre articulación interempresarial y percepción integral del modelo, en la cual las empresas más conectadas y articuladas tienden también a mostrar mayores niveles de satisfacción con la implementación.
Análisis integrador: en conjunto, los datos de esta dimensión evidencian que las pymes recicladoras han alcanzado un nivel medio de madurez sistémica en su adopción del modelo circular. Si bien hay eficiencia operativa básica, aún requieren fortalecimiento en la satisfacción general y la colaboración efectiva, a través de políticas de integración sectorial, formación de clústeres y esquemas asociativos sostenibles y funcionales.					

Fuente: elaboración propia.

Evidencia cualitativa vinculada

Las narrativas recogidas evidencian que la madurez sistémica del modelo circular aún está en proceso de consolidación, especialmente en lo referente a la articulación interempresarial y percepción global del desempeño.

El (IcGO6) señaló que existe colaboración operativa entre pymes para "lavar o transformar material de forma compartida", mientras que el (IcE15) destacó que "estas alianzas permiten mantenernos activos en la cadena de valor del reciclaje". Por su parte, el (IcE2) agregó que "la cooperación con organismos públicos y privados es clave para sostener las operaciones", aunque también se reconoció la necesidad de fortalecer dichas redes mediante políticas de integración y gobernanza sectorial.

A pesar de la existencia de experiencias colaborativas puntuales, los actores coinciden en que la cooperación sectorial aún es frágil y dispersa. Estas percepciones cualitativas refuerzan los resultados cuantitativos de satisfacción moderada y eficiencia operativa básica, lo cual indica que la consolidación del modelo circular depende en gran medida del desarrollo y fortalecimiento de estructuras colectivas sólidas y de esquemas asociativos sostenibles.

Validación empírica del modelo

La validación empírica del modelo se desarrolló con análisis cuantitativos, con el fin de evaluar la solidez y coherencia del modelo circular propuesto. Esta fase incluyó técnicas estadísticas como correlaciones de Spearman, árboles de decisión, análisis de clústeres y coeficiente alfa de Cronbach, aplicadas sobre los datos obtenidos del cuestionario estructurado.

Los resultados permiten identificar asociaciones significativas entre variables clave, así como verificar la consistencia interna del instrumento y hacer evidentes patrones diferenciales entre grupos empresariales, lo que fortalece la validez del modelo y orienta su aplicación en contextos reales.

Análisis bivariado de relaciones entre variables

El análisis bivariado, realizado mediante el coeficiente de correlación de Spearman, permitió identificar relaciones significativas de las intradimensiones e interdimensiones del modelo circular, aportando evidencia empírica que valida la coherencia interna del instrumento aplicado y respalda el enfoque sistémico del modelo propuesto.

Relaciones intradimensionales

Dimensión económica

Entre la rentabilidad económica (P4) y la calidad del producto reciclado (P6), se observó una correlación perfecta con un coeficiente de r = 1,00. Esto sugiere que las empresas que logran mejorar la calidad de sus productos reciclados también experimentan mayores niveles de rentabilidad, reflejando una lógica operativa coherente en esta dimensión.

Dimensión ecológica

La reducción de residuos (P2) y la disminución de emisiones contaminantes (P3) presentaron una correlación perfecta (r = 1,00), lo que evidencia que estas prácticas están siendo gestionadas de manera conjunta dentro de un enfoque ambiental integrado.

Dimensión social

El impacto social percibido (P7) y el impacto en la comunidad (P10) registraron una correlación muy alta (r = 0,97), lo que indica que las percepciones internas sobre responsabilidad social se reflejan en el reconocimiento externo por parte del entorno comunitario.

Relaciones interdimensionales

Tecnológica ↔ transversal

Se identificó una correlación elevada entre la innovación tecnológica (P13) y la eficiencia general de los procesos (P14) (r = 0,90), lo que sugiere que aquellas empresas que han implementado innovaciones tecnológicas también perciben un mejor desempeño operativo en términos generales. Este hallazgo respalda conceptualmente la lógica del modelo encajado, en el que la tecnología actúa como un catalizador de la circularidad.

Colaboración ↔ satisfacción global

Finalmente, se halló una correlación perfecta entre la colaboración interempresarial (P15) y la satisfacción global con el modelo circular (P16) (r = 1,00), lo cual confirma que el grado de articulación entre actores del ecosistema circular impacta directamente en la valoración positiva del modelo implementado.

Estas relaciones evidencian que las dimensiones del modelo circular no se comportan de forma aislada, sino que están interconectadas a través de sinergias estratégicas que explican, en conjunto, el desempeño circular percibido por las pymes. En especial, la interacción entre innovación tecnológica, colaboración interempresarial y percepción de impacto social emergen como núcleos relacionales fundamentales del modelo adecuado.

Este análisis empírico fortalece la validez de las hipótesis planteadas, particularmente aquellas que establecen vínculos entre las dimensiones ecológica, social y tecnológica como pilares para la sostenibilidad efectiva del modelo circular en pymes recicladoras de plásticos.

En la tabla 8 se presentan las correlaciones bivariadas obtenidas, lo cual contribuye a sustentar empíricamente la interacción entre las dimensiones ecológica, social, tecnológica y económica del modelo adaptado.

Tabla 8. Análisis bivariado de correlaciones entre variables del modelo circular

Variables correlacionadas	Coeficiente (ρ)	Nivel de correlación	Interpretación
P4 Rentabilidad ⟷ P6 Calidad	1.00	Perfecta	Mejor calidad se asocia con mayor rentabilidad
P2 Residuos ⟷ P3 Emisiones	1.00	Perfecta	Gestión integrada de residuos y emisiones
P7 Impacto social ⟷ P10 Impacto Comunidad	0.97	Muy alta	Percepción social interna y externa están alineadas
P13 Innovación ⟷ P14 Eficiencia	0.90	Muy alta	Innovación impulsa eficiencia operativa
P15 Colaboración ⟷ P16 Satisfacción global	1.00	Perfecta	Colaboración interempresarial mejora percepción global

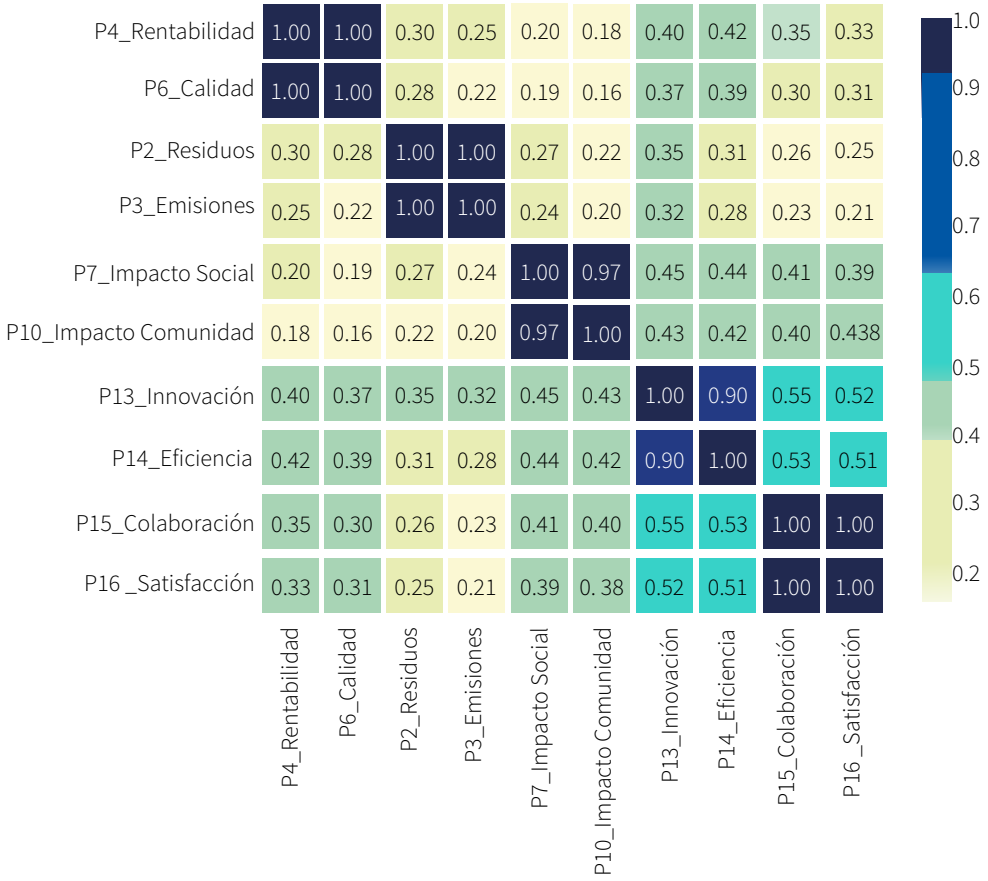
Nota. En la tabla se presentan las correlaciones aplicadas a las variables definidas en el modelo circular.

Fuente: elaboración propia.

Con el fin de complementar el análisis cuantitativo, se elaboró un mapa de calor a partir de las correlaciones bivariadas obtenidas mediante el coeficiente de Spearman (véase la figura 2). Esta representación visual permite observar con mayor claridad los vínculos de mayor y menor intensidad entre las variables del modelo, facilitando la identificación de asociaciones relevantes para la validación estructural.



Figura 2. Mapa de calor de correlaciones Spearman entre variables del cuestionario



Nota. Representa gráficamente la intensidad de las correlaciones, lo que facilita la identificación de patrones y asociaciones clave entre los indicadores del modelo.

Fuente: elaboración propia.

Análisis de correlación de Spearman entre d imensiones

El análisis de correlación de Spearman evidenció una estructura sólida y coherente entre las variables evaluadas en el instrumento aplicado a las pymes recicladoras de plásticos.

La alta correlación entre los ítems de una misma dimensión, como es el caso de la relación entre la *rentabilidad económica* (P4) y la *calidad de los productos reciclados*

(P6), con un coeficiente de r ~ 1,00, valida la alineación interna del instrumento en la dimensión económica. Esto sugiere que los gerentes asocian directamente la mejora en la calidad con el incremento de la rentabilidad.

De igual forma, se observó una relación perfecta entre los ítems de la dimensión ecológica (P2 y P3), ambos con r ~1,00, lo que evidencia que la *reducción de residuos* y la *disminución de emisiones contaminantes* son procesos interdependientes dentro de las prácticas de gestión ambiental. Este hallazgo es coherente con los principios de la economía circular, en los que el aprovechamiento de materiales y la eficiencia ambiental van de la mano.

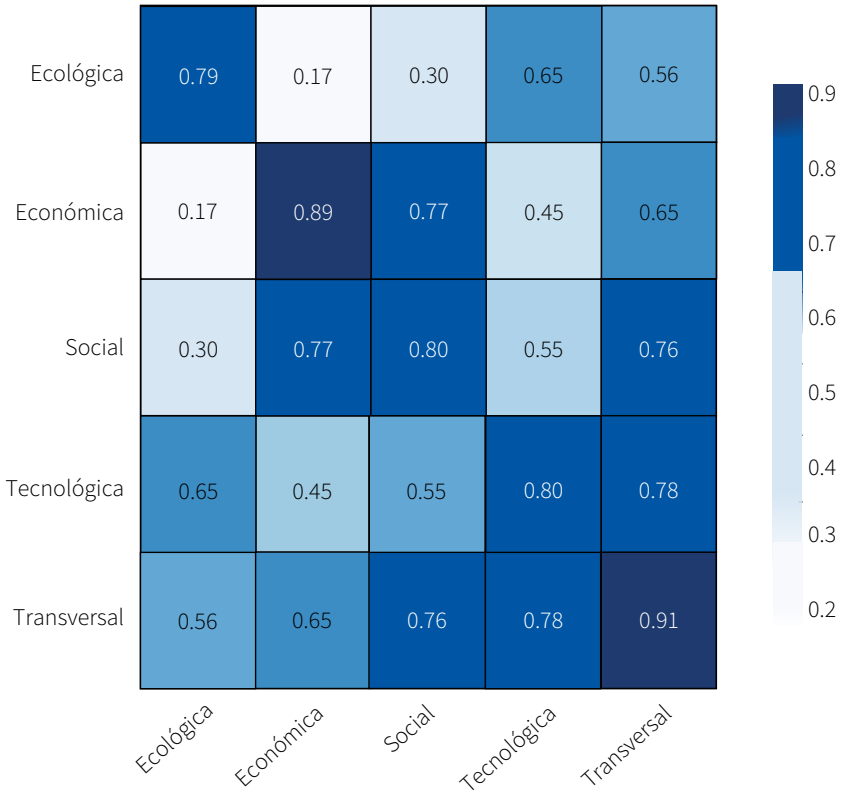
En la dimensión social, las correlaciones también fueron significativamente altas. Por ejemplo, el ítem de *impacto social* (P7) y el ítem de *impacto comunitario* (P10) alcanzaron una correlación de r = 0,97, lo que indica que las percepciones internas sobre el compromiso social se reflejan de manera consistente en la relación con el entorno local. Esta consistencia se interpreta como un indicador de madurez en la dimensión social del modelo circular propuesto.

Una de las correlaciones cruzadas más relevantes se presentó entre las dimensiones tecnológica y transversal. La relación entre la *innovación tecnológica* (P13) y la *eficiencia global de los procesos* (P14) arrojó un valor de r = 0,90, lo que sugiere que aquellas empresas que han implementado mayores niveles de innovación perciben una mejora en la eficiencia general de su operación circular. Esta interacción valida conceptualmente el modelo, el cual plantea que la incorporación tecnológica no es un elemento aislado, sino un facilitador de la competitividad operativa y sostenible.

Finalmente, la correlación de r ~ 1,00 entre los ítems de *colaboración interempresarial* (P15) y *satisfacción global con el modelo circular* (P16) indica que la articulación entre actores del ecosistema circular está directamente relacionada con una valoración positiva del impacto alcanzado (véase la figura 3). Esto refuerza la importancia de fortalecer las redes y vínculos entre pymes y otros actores del sistema productivo.

Estas relaciones evidencian que las dimensiones del modelo circular no se comportan de forma aislada, sino que están interconectadas a través de sinergias estratégicas que explican, en conjunto, el desempeño circular percibido por las pymes.

Figura 3. Correlación de Spearman entre dimensiones del cuestionario



Nota. Representa gráficamente los niveles de correlación promedio entre las dimensiones del modelo circular, facilitando la identificación de vínculos clave entre bloques temáticos del instrumento.

Fuente: elaboración propia.

Árbol de decisión y clústeres

Con el objetivo de evaluar preliminarmente la estructura lógica del modelo circular propuesto, se aplicó un árbol de decisión utilizando el algoritmo *Classification and Regression Trees* (CyRT) sobre los datos obtenidos del cuestionario estructurado. Esta técnica permite modelar relaciones jerárquicas entre variables explicativas y una variable respuesta categórica; en este caso, la satisfacción global percibida por los gerentes respecto al desempeño circular de sus empresas.

El análisis identificó que la variable más relevante fue la *innovación en productos y procesos* (P13), ya que el 85,7 % de los encuestados que reportaron niveles moderados o altos de innovación manifestaron también una alta satisfacción general. En segundo

lugar, el *impacto en la comunidad* (P10) mostró una fuerte asociación positiva, con el 81,3 % de las organizaciones altamente comprometidas socialmente clasificadas con niveles elevados de satisfacción. Por su parte, la *tasa de reciclaje efectiva* (P1) tuvo menor peso predictivo, pues el 93,8 % de las empresas reportaron valores inferiores al 40 %, lo que evidencia un área crítica de mejora en la dimensión ecológica.

La precisión global del modelo alcanzó un 50 %. Aunque este porcentaje es modesto, se considera aceptable dado el tamaño limitado de la muestra (n = 16). El árbol logró identificar correctamente las empresas con satisfacción alta (clase 4), lo que respalda la validez parcial del enfoque. Estos hallazgos justifican la transición metodológica hacia algoritmos más robustos como *Random Forest*, utilizados en el capítulo 5 para validar empíricamente el modelo ajustado.

Este ejercicio demuestra la pertinencia del enfoque proyectivo adoptado, al permitir que las variables emergentes sean validadas empíricamente como base para la estructuración del modelo. También se fortalece el hilo lógico entre los resultados cuantitativos, las dimensiones estratégicas y las recomendaciones estructurales desarrolladas en capítulos posteriores (Babbie, 2000; Breiman et al., 1984; Hernández-Sampieri et al., 2022).

Estos hallazgos se complementan con el análisis cuantitativo, que confirma que las variables más influyentes en la percepción de satisfacción global con el modelo circular son la *innovación tecnológica* (85,7 %) y el *impacto comunitario* (81,3 %). En contraste, la *tasa de reciclaje*, con un 93,8 % de respuestas en bajos niveles, mostró un peso menor. La convergencia de ambos enfoques ofrece una visión integral del estado actual del sector y sustenta las bases para el rediseño de un modelo circular realista y aplicable.

En síntesis, el árbol de decisión evidenció que variables como la *innovación tecnológica* (P13) y el *impacto en la comunidad* (P10) son determinantes para explicar la satisfacción global con el modelo circular, mientras que indicadores como la tasa de reciclaje mostraron menor peso predictivo. Estos resultados responden al objetivo específico 4, la pregunta P4 y la hipótesis H4, al validar parcialmente la estructura lógica del modelo propuesto mediante técnicas cuantitativas avanzadas.

Análisis de clústeres

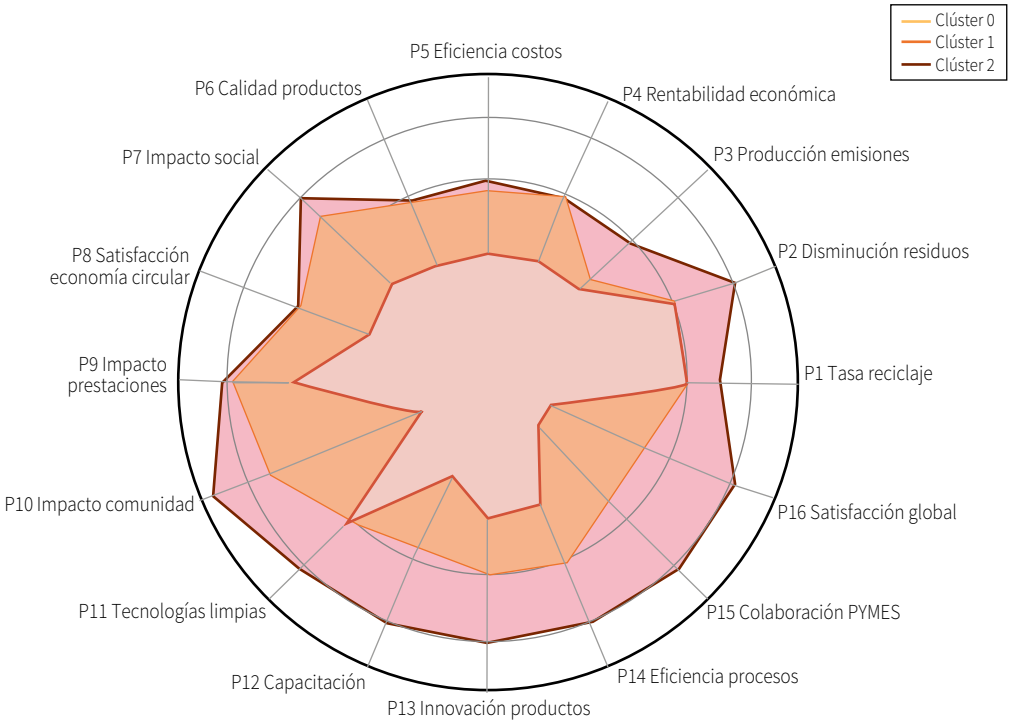
Con el propósito de visualizar las diferencias entre los perfiles empresariales identificados, se construyó un gráfico de radar que representa el promedio de respuestas por clúster, tomando como base las 16 variables del cuestionario distribuidas en cinco dimensiones: ecológica, económica, social, tecnológica y transversal. Este gráfico (véase la figura 4) permitió comparar de forma sintética el nivel de implementación del modelo de economía circular según el grupo al que pertenece cada empresa, revelando patrones diferenciados de comportamiento organizacional.

El *clúster 1* muestra un perfil alto, con puntuaciones destacadas en innovación tecnológica, colaboración interempresarial, impacto social y satisfacción global, lo que refleja un mayor grado de madurez en la transición hacia un modelo circular robusto.

En contraste, el *clúster 2* presenta un perfil bajo, caracterizado por niveles reducidos en prestaciones sociales, articulación con otras entidades y percepción de eficiencia.

Por su parte, el *clúster 0* se sitúa en un nivel intermedio en casi todas las dimensiones, representando un grupo en fase de consolidación. Este análisis visual respalda la segmentación realizada mediante *K-means* y evidencia la necesidad de estrategias diferenciadas para fortalecer la economía circular según el grado de avance de cada grupo empresarial.

Figura 4. Perfil promedio por clúster según dimensiones del modelo circular



Nota. Muestra el promedio de puntuación para cada dimensión por grupo identificado, permitiendo una interpretación comparativa del grado de avance en la implementación del modelo.

Fuente: elaboración propia.

En conclusión, el análisis estadístico y multivariado aplicado en esta investigación permitió validar empíricamente el ajuste del modelo circular, identificando tanto patrones comunes como diferencias significativas entre grupos empresariales. Estos hallazgos

refuerzan la necesidad de adoptar estrategias diferenciadas y adaptadas a la madurez de implementación de cada pyme recicladora, consolidando así un enfoque práctico y sustentable hacia la economía circular.

Alfa de Cronbach, varianza y asimetría

Para evaluar la fiabilidad interna del cuestionario estructurado, se calculó el coeficiente *alfa de Cronbach* para cada una de las cinco dimensiones del modelo circular. Los resultados se resumen en la tabla 8:

Tabla 9. Relación dimensiones alfa de Cronbach e índices de alfa de Cronbach (α)

Dimensión	Ítems incluidos	Alfa de Cronbach (α)	Interpretación
Ecológica	P1, P2, P3	0.871	Alta consistencia
Económica	P4, P5, P6	0.941	Excelente consistencia
Social	P7, P8, P9, P10	0.880	Alta consistencia
Tecnológica	P11, P12, P13	0.820	Alta consistencia
Transversal	P14, P15, P16	0.948	Excelente consistencia

Nota. La tabla se elaboró a partir del procesamiento de datos obtenidos del cuestionario estructurado y su análisis estadístico, con base en los criterios metodológicos establecidos en la revisión sistemática del modelo circular.

Fuente: elaboración propia.

Todos los coeficientes superan el umbral de 0,80, lo cual indica una alta fiabilidad interna según los criterios metodológicos establecidos por Hernández-Sampieri et al. (2022). Las dimensiones *económica* y *transversal* alcanzaron niveles superiores a 0,93, lo que sugiere una excelente cohesión entre los ítems que las conforman. Este resultado valida empíricamente la estructura conceptual del instrumento y refuerza la agrupación teórica planteada durante el diseño del modelo circular.

Los resultados obtenidos se apoyan en una varianza promedio de 0,361, lo que indica una dispersión moderada entre las percepciones de los gerentes de las pymes recicladoras de plásticos participantes en el estudio.

El coeficiente de variación fue del 18,4 %, lo que refleja un nivel aceptable de homogeneidad en los datos, adecuado para estudios de corte organizacional y perceptivo.

Asimismo, el índice de consenso general calculado para las variables analizadas alcanzó el 72,3 %, evidenciando una coherencia alta entre las respuestas, aunque sin llegar a representar unanimidad, lo cual es natural dada la diversidad operativa de las empresas participantes.

En particular, el análisis de asimetría aplicado a la dimensión tecnológica arrojó un valor de -0,53, lo que indica una ligera inclinación hacia valoraciones bajas, contrario a lo que se había interpretado inicialmente. Este comportamiento sugiere que, aunque existen avances, la innovación tecnológica aún presenta retos importantes en cuanto a percepción y adopción dentro del sector.

Marco integrador final

La siguiente tabla 8 resume la validación de las hipótesis formuladas en relación con cada dimensión del modelo circular, estableciendo su vínculo con las preguntas de investigación, los objetivos específicos, los hallazgos cuantitativos y la evidencia cualitativa más relevante.

Con el propósito de sintetizar la evidencia recopilada a lo largo del proceso de validación, la siguiente tabla presenta un cruce sistemático entre las hipótesis formuladas, las preguntas de investigación, los objetivos específicos y los hallazgos obtenidos, tanto desde el enfoque cuantitativo como cualitativo. Esta integración permite evaluar la coherencia interna del nuevo modelo circular y su aplicabilidad empírica en el contexto de las pymes recicladoras.

Tabla 10. Validación de hipótesis en relación con cada dimensión

Dimensión	H_0	Preguntas vinculadas	Objetivo específico asociado	Hallazgos cuantitativos	Hallazgos cualitativos clave	Conclusión integradora
Ecológica	H1	P1	Objetivo 1 (ambiental)	P1 (93,8 %) y P2 (81,2 %) moderados; P3 (81,2 %) bajo	IcE4, IcE9: reducción del impacto ambiental; (IcGO2): recolección eficiente	Se valida parcialmente H1: avances en residuos, rezagos en emisiones
Económica	H2	P3	Objetivo 3	P4 y P5 ≥ 81,2 % moderado; P6 moderado (68,8 %)	(IcGO1), (IcGO7): capacidad productiva; IcE10: mejora competitiva	Se valida parcialmente H2: eficiencia funcional, rentabilidad no consolidada
Social	H3	P1, P_2	Objetivo 1 (social)	P7 (56,m^2 % alto), P8 (87,5 % moderado), P9 (81,2 % alto), P10 (50 % alto).	IcE2, IcE4: empleo y bienestar; IcE9, IcE16: impacto comunitario	Se valida sólidamente H3: mejora laboral y comunitaria

Dimensión	H_0	Preguntas vinculadas	Objetivo específico asociado	Hallazgos cuantitativos	Hallazgos cualitativos clave	Conclusión integradora
Tecnológica	H4	P3	Objetivo 3	P11 (87,5 %) y P13 (68,8 %) moderados; P12 disperso	(IcGO3), (IcGO5): diferencias tecnológicas; IcE1, IcE15: barreras en innovación	Se valida parcialmente H4: innovación moderada, capacitación insuficiente
Transversal	H5	P5	Objetivo 5	P14 (75 % moderado), P15 y P16 (43,8 % moderado)	(IcGO6), IcE15: colaboración; IcE2: alianzas público-privadas	Se valida parcialmente H5: eficiencia global y colaboración moderada
Sistémica	HG	Todas	Objetivo general	Correlaciones r=1.00 (P4↔P6, P2↔P3, P15↔P16); clústeres diferenciados	Validación cruzada: cuantitativa + cualitativa + clústeres + Spearman	Se valida la hipótesis general del modelo con evidencia múltiple

Nota. La tabla se construyó con base en el cruce sistemático de hipótesis (H_0), hipótesis general (HG), preguntas de investigación, objetivos específicos y resultados empíricos (cuantitativos y cualitativos) obtenidos durante la validación del modelo circular.

Fuente: elaboración propia.

En conjunto, la tabla 10 evidencia que todas las dimensiones del modelo circular presentan avances significativos, aunque con distintos niveles de consolidación. La integración de hallazgos cuantitativos y cualitativos permite afirmar la validez general del modelo, de tal forma que resalta su aplicabilidad en el contexto real de las pymes recicladoras en Bogotá.

Validación cruzada de hipótesis

La presente investigación integró resultados cuantitativos, cualitativos y estadísticos con el fin de validar empíricamente las hipótesis formuladas sobre el modelo circular propuesto para pymes recicladoras de plásticos en Bogotá. A través de una estrategia de triangulación metodológica, se identificaron coincidencias, complementariedades y limitaciones entre los diferentes enfoques analíticos, lo que permitió una validación cruzada rigurosa y contextualizada de cada hipótesis:

Hipótesis H1: prácticas ecológicas y sostenibilidad operativa

Se observan niveles moderados de *adopción de reciclaje* (93,8 %) y *reducción de residuos* (81,2 %), pero bajos avances en *mitigación de emisiones* (81,2 % bajo). Narrativas como las del IcE9 e IcE16 respaldan una percepción de mejora ambiental, mientras que el (IcGO2) destaca mecanismos comunitarios de recolección. La correlación perfecta entre P2 y P3 (r = 1,00) refuerza la relación entre gestión de residuos y emisiones.

Validación parcial: se confirma influencia operativa, con debilidades en tecnologías limpias.

Hipótesis H2: circularidad y gestión estructurada

Rentabilidad, costos y calidad presentan valoraciones funcionales, pero no optimizadas. Los IcGO reportan capacidades modestas e IcE10 destaca efectos positivos de la innovación. La correlación perfecta entre *rentabilidad y calidad* (P4↔P6) respalda la lógica del modelo.

Validación parcial

Existen mejoras operativas, pero la sostenibilidad financiera aún no es estructural.

Hipótesis H3: impacto social y satisfacción

Impacto social y comunitario reciben valoraciones altas (P7: 56,2 % alto; P10: 50 % alto), reforzadas por testimonios sobre empleo, formación y sensibilización. La correlación entre impacto social y comunitario (r = 0,97) muestra consistencia entre la percepción interna y externa.

Validación sólida: se confirma el efecto positivo del modelo circular en el capital humano y el entorno.

Hipótesis H4: innovación tecnológica y eficiencia

Aunque se reporta un uso moderado de *tecnologías limpias e innovación* (P11 y P13), la *capacitación* (P12) presenta dispersión. Los IcGO evidencian contrastes entre empresas con maquinaria avanzada y otras con procesos tercerizados. La correlación entre innovación y eficiencia (r = 0,90) valida conceptualmente la hipótesis.

Validación parcial: la innovación incide positivamente, pero enfrenta restricciones en formación e inversión.

Hipótesis H5: articulación interempresarial y percepción del modelo

La *colaboración* (P15) y la *satisfacción global* (P16) muestran una correlación perfecta (r = 1,00), respaldada por testimonios sobre redes público-privadas ((IcGO6), IcE2, IcE15). Si bien la colaboración es moderada, su influencia en la valoración general del modelo es clara.

Validación parcial: la articulación existe, pero aún debe fortalecerse como eje estructural del modelo.

Hipótesis general: el modelo circular mejora el desempeño integral

La integración de los resultados demuestra que variables como *innovación* (P13), *impacto social* (P10) y *colaboración* (P15) son predictoras significativas de satisfacción general según el árbol de decisión. Las correlaciones cruzadas y el análisis de clústeres respaldan la coherencia sistémica del modelo.

Validación global confirmada: la evidencia empírica sustenta la pertinencia del modelo circular, adaptado a partir de la identificación de avances como áreas críticas de mejora en el sector analizado.

Con el propósito de verificar la validez integral del modelo circular propuesto, se implementó un proceso de triangulación metodológica que combinó hallazgos cuantitativos, cualitativos y análisis estadísticos. Esta estrategia permitió fortalecer la comprensión de las relaciones entre las variables clave y las hipótesis planteadas. La tabla 11 resume los resultados obtenidos a partir de dicha triangulación, evidenciando el grado de validación de cada hipótesis en función de la dimensión evaluada, así como su coherencia con los objetivos y preguntas de investigación.

Tabla 11. Triangulación de resultados para la validación cruzada de las hipótesis del modelo circular

Hipótesis	Evidencia cuantitativa	Evidencia cualitativa	Análisis estadístico	Conclusión
H1 – Prácticas ecológicas y sostenibilidad operativa	P1 (93,8 %), P2 (81,2 %) moderados; P3 (81,2 %) bajo	IcE9, IcE16: reducción de impacto; (IcGO2): recolección eficiente	P2↔P3 (r = 1.00)	Validación parcial: avances operativos con limitaciones tecnológicas
H2–Circularidad y gestión estructurada	P4, P5, P6 con valoraciones funcionales, pero no óptimas	(IcGO1), (IcGO7): capacidad productiva; IcE10: efectos de la innovación	P4↔P6 88(r = 1.00)	Validación parcial: eficiencia sin consolidación financiera

Hipótesis	Evidencia cuantitativa	Evidencia cualitativa	Análisis estadístico	Conclusión
H3 – Impacto social y satisfacción	P7 (56,2 % alto), P10 (50 % alto), percepción positiva predominante	IcE2, IcE4, IcE15: empleo, formación, compromiso comunitario	P7 ↔ P10 (r = 0.97)	Validación sólida: impacto social positivo confirmado
H4 – Innovación tecnológica y eficiencia	P11, P13 moderados; P12 con dispersión notable	(IcGO3), (IcGO5): brechas tecnológicas; IcE1, IcE15: barreras de formación	P13 ↔ P14 (r = 0.90)	Validación parcial: innovación funcional, limitada por capacitación
H5 – Articulación interempresarial y percepción del modelo	P14, P15, P16 con valores moderados; correlación perfecta (r=1.00)	(IcGO6), IcE15: colaboración operativa; IcE2: redes público-privadas	P15 ↔ P16 (r = 1.00)	Validación parcial: colaboración moderada, impacto positivo
Hipótesis general: modelo circular y desempeño integral	Árbol de decisión, correlaciones cruzadas, clústeres	Coherencia entre variables predictoras, satisfacción y desempeño	Validación integral mediante árboles, correlaciones y consistencia	Validación global confirmada: coherencia empírica y sistémica

Nota. La tabla presenta la síntesis del proceso de validación cruzada de hipótesis mediante la triangulación de datos cuantitativos, cualitativos y estadísticos.

Fuente: elaboración propia.

En síntesis, la evidencia triangulada respalda la validez del modelo circular, resaltando su coherencia interna y su aplicabilidad en el contexto real de las pymes recicladoras de plásticos.

Relación con objetivos y preguntas

La validación empírica del modelo circular no solo permitió contrastar las hipótesis formuladas, sino también establecer una relación coherente entre los objetivos específicos, las preguntas de investigación y las dimensiones analizadas. Esta relación asegura la solidez metodológica del estudio y refuerza su estructura argumentativa.

A continuación, se presenta dicha articulación de relación entre hipótesis, objetivos, preguntas y dimensiones del modelo circular, lo cual permite visualizar la coherencia metodológica que sustenta su diseño y validación (véase la tabla 12).

Tabla 12. Relación entre hipótesis, objetivos, preguntas y dimensiones del modelo circular

Hipótesis	Objetivo	Pregunta	Dimensión
H1: Las prácticas ecológicas influyen en la sostenibilidad operativa	Objetivo 1: Analizar percepciones, barreras y oportunidades ambientales en las pymes recicladoras	P1: ¿Qué percepciones tienen las pymes recicladoras sobre las prácticas de economía circular en su dimensión ambiental?	Ecológica
H2: La circularidad organizacional se relaciona con prácticas estructuradas de gestión	Objetivo 3: Evaluar el impacto de la gestión de procesos, infraestructura y tecnologías limpias	P3: ¿Qué elementos de gestión, infraestructura y tecnología inciden en la eficiencia operativa de las pymes recicladoras?	Económica
H3: La gestión social circular está asociada con niveles altos de satisfacción interna y externa	Objetivo 1 (dimensión social): Analizar la percepción del impacto social del modelo circular	P1 y P2: ¿Qué percepciones tienen las pymes recicladoras sobre el impacto social y comunitario del modelo circular?	Social
H4: La innovación tecnológica mejora la eficiencia de los procesos circulares	Objetivo 3: Evaluar el impacto de la gestión de procesos y tecnologías limpias	P3: ¿Qué elementos de infraestructura y tecnología inciden en la eficiencia operativa?	Tecnológica
H5: La articulación interempresarial se asocia a mayor percepción positiva del modelo	Objetivo 5: Validar el modelo ajustado mediante juicios de expertos y resultados empíricos	P5: ¿Qué nivel de ajuste y pertinencia presenta el modelo circular propuesto?	Transversal
Hipótesis general: El modelo circular basado en la ingeniería de procesos mejora el desempeño integral de las pymes	Objetivo general: Diseñar y validar un modelo circular ajustado para pymes recicladoras	Todas las preguntas (P1 a P5)	Sistémica / Integral

Nota. En la tabla se presenta la articulación entre hipótesis, objetivos, preguntas y dimensiones del modelo.

Fuente: elaboración propia.

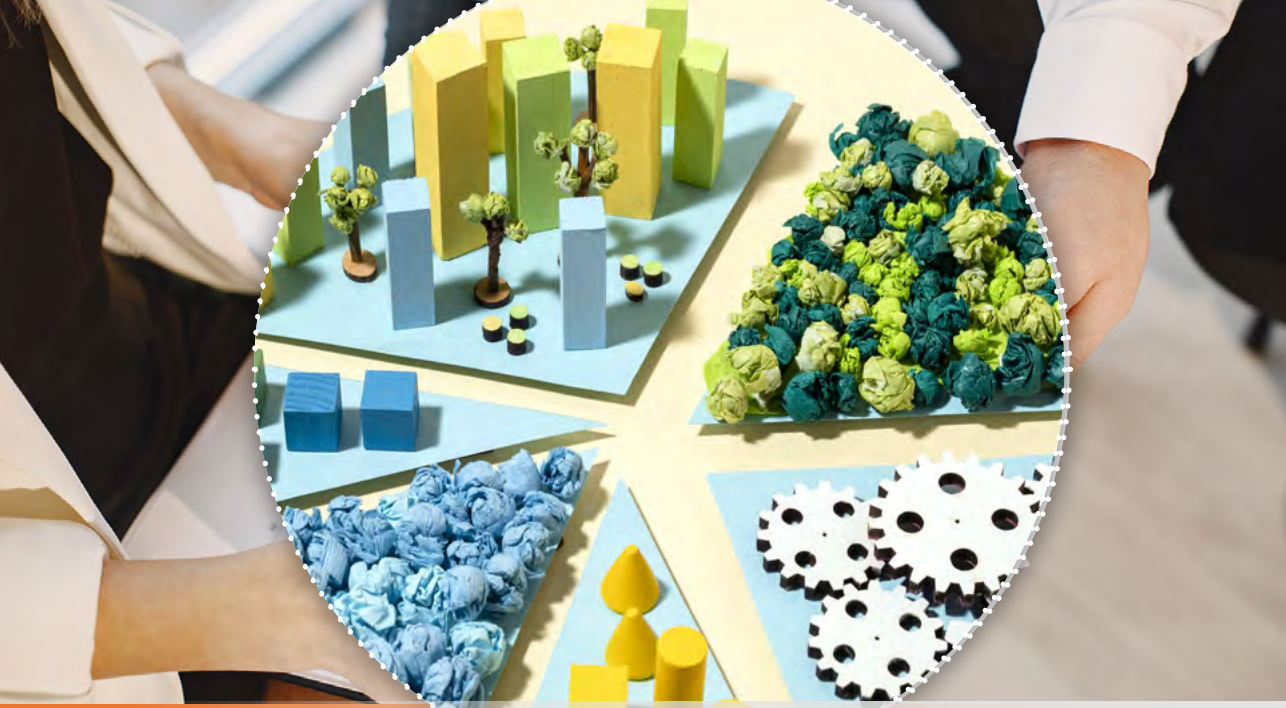
Los resultados presentados en este capítulo evidencian la complejidad y el estado actual de las pymes recicladoras de plásticos en Bogotá frente a la adopción de prácticas de economía circular. La validación cruzada de hipótesis, fundamentada en un enfoque secuencial cualitativo-cuantitativo, permitió identificar fortalezas y áreas críticas en las dimensiones ecológica, económica, social, tecnológica y transversal.

La evidencia empírica presentada revela avances significativos y limitaciones estructurales en la transición hacia la economía circular por parte de las pymes recicladoras de Bogotá. La validación cruzada de hipótesis, respaldada por correlaciones, testimonios y segmentación por clústeres, permite fundamentar sólidamente el diseño de un modelo adaptado.

En consecuencia, el siguiente capítulo presenta la propuesta estratégica construida a partir de los hallazgos de este capítulo, integrando procesos, indicadores y dimensiones clave en un marco aplicable, realista y contextualizado.



La validación empírica del modelo circular no solo permitió contrastar las hipótesis formuladas, sino también establecer una relación coherente entre los objetivos específicos, las preguntas de investigación y las dimensiones analizadas.



Capítulo 5

Modelo de economía circular



Los hallazgos expuestos en los capítulos anteriores evidencian que las pymes recicladoras de plásticos en Colombia operan bajo condiciones de desigualdad, en contextos de exclusión tecnológica, informalidad laboral y riesgos ambientales que comprometen tanto su sostenibilidad como su impacto positivo en los territorios. Sin embargo, también se identificaron capacidades resilientes, saberes técnicos acumulados y una creciente disposición a la transformación productiva. En este escenario, se hace necesario proponer un modelo de economía circular que no solo responda a los desafíos estructurales identificados, sino que también potencie las fortalezas existentes y promueva una transición justa, incluyente y viable.

Este capítulo presenta un modelo de economía circular orientado específicamente al fortalecimiento de las pymes recicladoras de plástico, brindando una perspectiva sistémica, participativa y sostenible. Esta propuesta integra dimensiones técnicas, sociales, ambientales e institucionales y está fundamentada tanto en los principios de la economía circular regenerativa como en herramientas de ingeniería de procesos y gobernanza colaborativa. Más allá de una estructura prescriptiva, el modelo busca ser un marco adaptable que permita orientar decisiones estratégicas, operativas y normativas en distintos contextos territoriales.

La construcción del modelo se basa en la articulación entre tres ejes centrales:

- la optimización de procesos productivos mediante tecnología apropiada y principios de ecodiseño;
- la inclusión social y laboral como componente estructural del sistema circular;
- la generación de valor compartido a partir de indicadores de sostenibilidad económica, ambiental y comunitaria.

Cada componente ha sido diseñado desde un enfoque empírico, con validación en el campo y retroalimentación por parte de actores clave del ecosistema reciclador.

A lo largo del capítulo se exponen los fundamentos conceptuales del modelo, su estructura metodológica, los componentes técnicos y sociales que lo integran, así como los criterios e indicadores para su implementación y evaluación. El objetivo es ofrecer una herramienta estratégica que contribuya a la transformación real de las pymes recicladoras, avanzando hacia un modelo de desarrollo más equitativo, sostenible y territorialmente justo.

Finalmente, el modelo adaptado ofrece una respuesta estructurada a los desafíos asociados con la disposición inadecuada de residuos plásticos, consolidándose como una herramienta estratégica para la transición hacia una economía circular en el sector.

Su aplicabilidad se pone en evidencia en las acciones integradas por dimensión: la dimensión ecológica favorece el cierre de ciclos mediante la recolección selectiva y la reducción de residuos no aprovechados; la dimensión económica impulsa la eficiencia operativa y la recuperación de valor; la dimensión social promueve condiciones laborales dignas y fortalece el compromiso organizacional; la dimensión tecnológica permite la trazabilidad e incorporación de tecnologías apropiadas, y la dimensión transversal asegura el cumplimiento normativo, la gobernanza interna y el establecimiento de alianzas clave. En conjunto, estas dimensiones potencian las capacidades circulares de las pymes recicladoras, optimizan recursos, minimizan pérdidas y promueven una gestión sostenible de los residuos plásticos.

Justificación del modelo

En la actualidad, la preocupación por los efectos ambientales provocados por el uso y desecho masivo de plásticos ha alcanzado niveles sin precedentes. En este contexto, las pymes dedicadas al reciclaje de plásticos cumplen un papel fundamental, especialmente en ciudades como Bogotá, donde la presión sobre los sistemas de gestión de residuos demanda soluciones cada vez más sostenibles.

No obstante, la aplicación de métodos tradicionales de reciclaje ha resultado insuficiente frente al acelerado incremento de la producción y consumo de plásticos de un solo uso, así como las limitaciones técnicas, normativas y estructurales del sector. Frente a este panorama, se hace necesario un enfoque más integral, adaptable y técnicamente robusto.

En respuesta a esta situación, se propone un modelo circular desarrollado bajo un enfoque secuencial cualitativo-cuantitativo y fundamentado en los principios de la ingeniería de procesos. Este modelo integra hallazgos cualitativos obtenidos mediante entrevistas a informantes clave del sector y resultados cuantitativos derivados del análisis de árboles de decisión y técnicas de agrupamiento, que permitieron identificar las variables más influyentes del desempeño circular en las organizaciones.

Su diseño apunta a optimizar la eficiencia operativa, fortalecer la articulación entre actores y mejorar la calidad de los productos reciclados mediante prácticas técnicas, sociales y colaborativas viables y replicables en el contexto colombiano, así como a priorizar la reintegración de materiales reciclables en los ciclos productivos, la innovación tecnológica, la articulación comunitaria, la formación del talento humano y la

implementación de sistemas colaborativos como estrategias clave para lograr una transición sostenible.

De esta manera, se busca no solo responder al abordaje de los desafíos actuales del sector, sino también proyectar a las pymes recicladoras hacia un modelo de gestión más eficiente, competitivo y ambientalmente responsable en el futuro.

Objetivo del modelo

El modelo ajustado propuesto busca fortalecer la transición efectiva de las pymes recicladoras de plásticos hacia un sistema de economía circular sostenible, competitivo y socialmente comprometido. Esta propuesta se sustenta en un enfoque metodológico secuencial cualitativo-cuantitativo y en una triangulación de datos que permitió validar cinco dimensiones clave: ecológica, económica, social, tecnológica y transversal. Cada dimensión se traduce en objetivos específicos, fundamentados en la literatura académica y en los hallazgos empíricos del estudio.

Componentes del modelo de economía circular

El modelo de economía circular propuesto para las pymes recicladoras de plásticos en Colombia por Hernández Alomia (2025) se estructura en torno a cinco dimensiones estratégicas interdependientes: ecológica, económica, social, tecnológica y transversal. Cada dimensión responde a los principios de la ingeniería de procesos, entre los cuales se encuentran la trazabilidad, la mejora continua, la eficiencia operativa y la evaluación de entradas y salidas, y se ha operacionalizado a partir de variables clave identificadas mediante análisis estadístico, validación cualitativa y juicio de expertos.

Esta arquitectura dimensional permite una comprensión integral de la circularidad en las pymes recicladoras, conectando lo operativo con lo estratégico, lo ambiental con lo social y lo técnico con lo organizacional. A continuación, se detallan los componentes fundamentales por cada dimensión:

Dimensión ecológica: regenerar desde los residuos

El componente ecológico busca reducir el impacto ambiental mediante prácticas de optimización de los recursos, tales como la minimización de residuos, la recolección

selectiva, el reciclaje de ciclo cerrado y la gestión eficiente de residuos no aprovechables, así como la incorporación de tecnologías limpias. Incluye estrategias de gestión de residuos peligrosos, eficiencia energética y análisis de ciclo de vida. Esta dimensión considera indicadores como

- Reducir el impacto ambiental de las pymes recicladoras mediante la promoción de prácticas sostenibles de reciclaje, reutilización de materiales y gestión eficiente de residuos (Rodríguez Nivicela et al., 2022; World Economic Forum et al., 2016).
- Incrementar la tasa de recuperación y transformación de residuos plásticos, integrando procesos circulares que minimicen la huella ecológica y fortalezcan la sostenibilidad organizacional (Hahladakis y Iacovidou, 2018; Iacovidou et al., 2017).

El modelo promueve acciones de mitigación basadas en principios de ecodiseño, análisis de ciclo de vida y valorización energética, especialmente en aquellas pymes que manejan altos volúmenes de plásticos posconsumo de baja densidad.

Dimensión económica: Circular con rentabilidad

Esta dimensión se orienta a fortalecer la sostenibilidad financiera de las pymes mediante gestión eficiente de costos, incremento de productividad, diversificación de ingresos y consolidación de modelos de negocio basados en productos reciclados de valor agregado. Fomenta la rentabilidad del negocio mediante diversificación de ingresos, eficiencia en costos y acceso a nuevos mercados verdes. Considera la creación de valor agregado en productos reciclados y esquemas de financiación adaptados. Sus principales variables incluyen

- optimizar los costos operativos y aumentar la rentabilidad, implementando procesos circulares que reduzcan el consumo de recursos e incrementen el aprovechamiento de insumos reciclables (Ibujés Villacís y Benavides Pazmiño, 2018; Nizami et al., 2017);

- desarrollar productos de valor agregado a partir del reciclaje de plásticos que incrementen la competitividad de las pymes en mercados sostenibles (Albats et al., 2023; Martins et al., 2022).

El modelo incluye herramientas para el control estadístico de procesos (SPC), análisis costo-beneficio de tecnologías limpias y esquemas de monetización de servicios ambientales.

Dimensión social: circularidad con dignidad

El componente social reconoce que las pymes recicladoras no son solo unidades económicas, sino espacios de empleo, inclusión y desarrollo comunitario; promueve la equidad y la inclusión de actores tradicionalmente marginados, como recicladores de base, mujeres cabeza de hogar y jóvenes en situación de vulnerabilidad. Plantea la mejora en condiciones laborales, acceso a formación técnica y gobernanza participativa. Por ello, el modelo incorpora variables como

- Promover condiciones laborales dignas y equitativas mediante el fortalecimiento del bienestar organizacional, la cultura interna y la satisfacción del talento humano (Geissdoerfer et al., 2017).
- Incrementar el impacto social positivo de las pymes recicladoras en sus comunidades, fomentando la inclusión, la generación de empleo y la conciencia ambiental (Padilla et al., 2020).

Se proponen estrategias de fortalecimiento del capital humano, así como formación en economía circular y articulación con redes de recicladores de base, con enfoque de género y territorialidad.

Dimensión tecnológica: eficiencia con innovación

Esta dimensión articula incorporación de tecnologías limpias, automatización de procesos críticos y trazabilidad digital, adaptadas a las capacidades reales de las pymes. Impulsa la tecnificación de procesos productivos, incluyendo automatización, trazabilidad digital y sistemas de monitoreo de calidad. Se contemplan plataformas para trazabilidad de residuos, control estadístico de procesos y registro de huella ambiental. Los componentes clave incluyen:

- Incorporar tecnologías limpias e innovadoras que mejoren la calidad de los productos reciclados y la eficiencia de los procesos de transformación (Millar et al., 2019; Padilla-Rivera et al., 2024).
- Fortalecer las capacidades técnicas del personal a través de formación continua en prácticas circulares y herramientas de innovación orientadas a la mejora continua (Rodríguez Nivicela et al., 2022). Fortalecer las capacidades técnicas del personal a través de formación continua en prácticas circulares y herramientas de innovación orientadas a la mejora continua (Rodríguez Nivicela et al., 2022).

Desde la ingeniería de procesos, se aplican herramientas como reingeniería (BPR), ciclo PDCA y simulación operativa para la optimización del rendimiento y la reducción de fallas.

Dimensión transversal: gobernanza, normatividad y redes

Esta dimensión actúa como marco habilitante del modelo, orientada a la articulación institucional, el cumplimiento normativo y la creación de sinergias multiescalares; incorpora elementos de gobernanza, normatividad, cooperación interinstitucional y articulación con políticas públicas. Asegura la sostenibilidad institucional del modelo a largo plazo y la coherencia con agendas internacionales, como los ODS. Abarca

- fomentar la colaboración interempresarial y las alianzas estratégicas, generando redes de valor que escalen el modelo circular a nivel territorial (Marchi et al., 2017; Torres-Guevara et al., 2021; World Economic Forum et al., 2016);
- elevar la eficiencia percibida y la satisfacción organizacional, asegurando que la implementación del modelo contribuya a resultados verificables y sostenibles (Hernández-Sampieri et al., 2022).

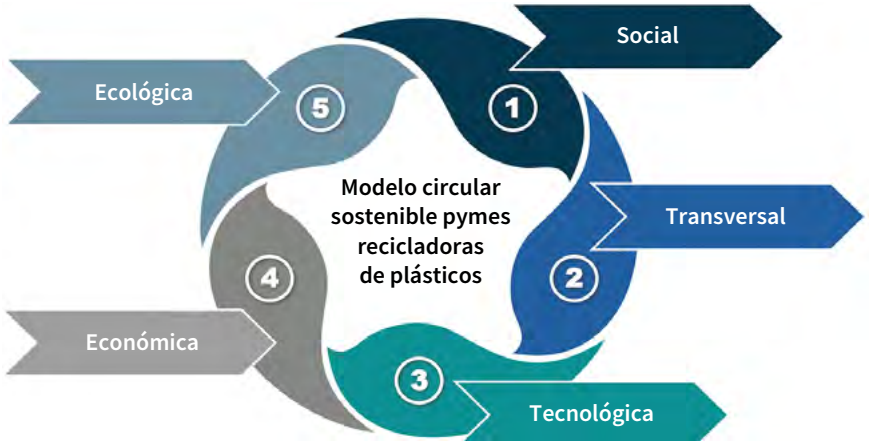
La inclusión de esta dimensión permite avanzar hacia una gestión sistémica que reconozca la interdependencia entre actores, la legitimidad social del reciclaje y las oportunidades de escalabilidad del modelo en otros territorios.

Modelo ajustado

El modelo circular ajustado constituye el resultado integrador y aplicado de la presente tesis doctoral, cuyo propósito fue proponer una alternativa metodológica y operativa para el desarrollo sostenible en pequeñas y medianas empresas recicladoras de plásticos en Bogotá.

Su construcción se fundamenta en un enfoque secuencial cualitativo-cuantitativo de tipo exploratorio, que permitió identificar, validar y operacionalizar un conjunto de dimensiones estratégicas y variables clave mediante entrevistas semiestructuradas, análisis cuantitativos (frecuencias, correlaciones, árboles de decisión) y validación empírica en 16 empresas del sector.

Este modelo se estructura en cinco dimensiones interdependientes: ecológica, económica, social, tecnológica y transversal. Cada dimensión está conformada por variables específicas priorizadas en función de su nivel de consenso, peso estadístico, aplicabilidad técnica y contribución a la circularidad. Del mismo modo, se incorporan principios de ingeniería de procesos, como la trazabilidad, la eficiencia operativa, la evaluación de entradas y salidas y la mejora continua.



El modelo circular está diseñado para operar como un sistema cíclico de diagnóstico, intervención y retroalimentación, que puede ser aplicado por gerentes, coordinadores de calidad, ingenieros de planta o consultores externos en empresas del sector reciclador. Su lógica de funcionamiento parte del principio de mejora continua bajo el ciclo PHVA (planear, hacer, verificar, actuar), adaptado al contexto de reciclaje plástico.

Las empresas inician aplicando los instrumentos construidos durante esta investigación (cuestionario estructurado), que permiten medir el nivel de avance en cada dimensión mediante variables como eficiencia energética (económica), uso de tecnologías apropiadas (tecnológica), prácticas de recolección y clasificación (ecológica), cultura organizacional (social) y cumplimiento normativo (transversal).

A partir del diagnóstico, se identifican áreas críticas o dimensiones con bajo desempeño. Los resultados obtenidos en el capítulo 4, por ejemplo, mostraron que las dimensiones social y tecnológica presentaban menor madurez en comparación con las dimensiones económica y ecológica. Este análisis se realiza apoyado en correlaciones de Spearman, árboles de decisión y la validación cruzada por hipótesis.

Con base en las brechas identificadas, se diseñan acciones de mejora alineadas con los principios de economía circular y las capacidades organizacionales. Estas acciones pueden incluir la implementación de trazabilidad digital, la formación del personal, alianzas interinstitucionales o la sustitución de equipos obsoletos.

Implementación operativa y seguimiento de indicadores

Cada acción debe estar asociada a indicadores medibles definidos en esta investigación (véase la tabla 13), tales como tasa de aprovechamiento de residuos, costos unitarios

de reciclaje, índice de cultura circular y cumplimiento legal. Se propone un sistema de monitoreo bimensual o trimestral que permita hacer ajustes continuos con base en los resultados obtenidos.

Tabla 13. Variables e indicadores asociados al modelo circular

Variables	Dimensión	Indicadores
Modelo circular	Ecológica	Tasa de reciclaje y reutilización Reducción de residuos Reducción de emisiones
Eficiencia del reciclaje	Económica	Rentabilidad económica Eficiencia en costos de procesamiento Calidad de los productos reciclados
Impacto Social	Social	Impacto social interno Satisfacción economía circular Impacto en prestaciones laborales Impacto en la comunidad
Ingeniería de Procesos	Tecnológica	Uso de tecnologías limpias Capacitación en economía circular Innovación tecnológica
Medición global	Transversal	Eficiencia general de procesos Colaboración interempresarial Satisfacción global con el modelo

Nota. La tabla sintetiza las variables clave del modelo circular y los indicadores propuestos para su monitoreo continuo.

Fuente: elaboración propia.

Evaluación y retroalimentación para el siguiente ciclo

El modelo culmina con una evaluación de resultados frente a los indicadores planteados, lo que permite retroalimentar el diagnóstico inicial y cerrar el ciclo con una visión de mejora progresiva. Esta estructura garantiza su adaptabilidad, escalabilidad y replicabilidad en otras pymes del sector.

Este modelo responde de forma estructural al problema de la disposición inadecuada de residuos plásticos, al permitir que las empresas recicladoras fortalezcan su capacidad de circularidad, incrementen su eficiencia operativa y reduzcan impactos ambientales mediante una ruta técnica validada. Por otra parte, al estar basado en datos reales de 16 pymes bogotanas y articulado con evidencia cualitativa (percepciones de empleados y gerentes), garantiza la factibilidad contextual y práctica.

La interacción entre dimensiones no es lineal ni jerárquica, sino sistémica y adaptable. El modelo propuesto permite que las organizaciones se autogestionen con base en evidencia y construyan una hoja de ruta hacia la sostenibilidad sin depender exclusivamente de marcos normativos externos.

Representación visual del modelo

El diseño del modelo describe la estructura y el funcionamiento del modelo circular propuesto para las pymes recicladoras de plásticos, ajustado a sus condiciones reales en Colombia. La propuesta metodológica articula dimensiones ecológicas, sociales, económicas, tecnológicas y transversales, estructuradas en fases de implementación progresiva, acompañadas de herramientas de evaluación e indicadores. El modelo se representa como un engranaje circular dinámico, con cinco ejes radiales (las dimensiones) conectados a un núcleo operativo que rota en fases. Cada dimensión se vincula a líneas de acción, y estas, a su vez, a indicadores específicos de desempeño. Las conexiones externas representan alianzas estratégicas con actores públicos, privados y comunitarios.

Esta representación facilita la comprensión sistémica del modelo y su replicabilidad en otros contextos, resaltando la interdependencia entre componentes técnicos, sociales y ambientales.

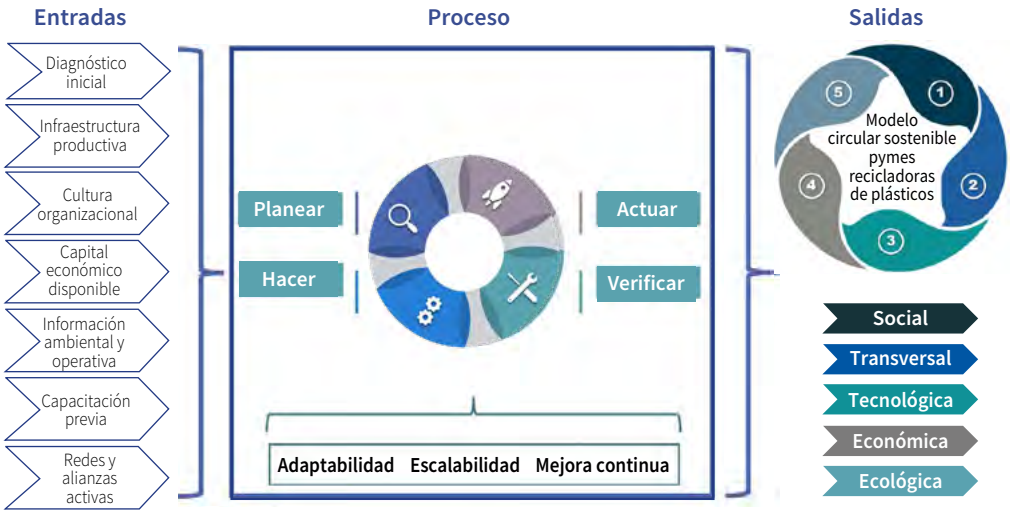
El modelo propuesto surge como respuesta integral a las tensiones estructurales, limitaciones operativas y potencialidades no aprovechadas de las pymes recicladoras de plásticos en Colombia. A diferencia de aproximaciones normativas o teóricas que suelen ignorar el contexto territorial, este modelo se diseñó a partir de datos empíricos, un análisis mixto y la participación de actores del sector. Su finalidad es guiar la transición hacia una economía circular inclusiva, eficiente y sostenible, articulando capacidades empresariales con impactos sociales y ambientales positivos.

En la figura 5 se presenta el modelo circular ajustado, organizado por dimensiones, variables estratégicas y su articulación con el proceso de reciclaje. El centro del diagrama

El modelo circular está diseñado para operar como un sistema cíclico de diagnóstico, intervención y retroalimentación.

simboliza la optimización continua, mientras que los bloques externos representan las dimensiones clave que soportan el avance hacia la economía circular.

Figura 5. Modelo circular sostenible para pymes recicladoras de plástico



Nota. Representación gráfica del modelo circular propuesto, con integración de dimensiones estratégicas y fases de implementación en el contexto de pymes recicladoras de plástico.

Fuente: elaboración propia.

El modelo circular sostenible propuesto se estructura en tres componentes principales: entradas, proceso y salidas, los cuales permiten una implementación adaptable, escalable y orientada a la mejora continua.

Las entradas se hacen evidentes como los factores críticos para la implementación; antes de iniciar el ciclo operativo del modelo, es indispensable evaluar los siguientes aspectos asociados a indicadores específicos de diagnóstico:

- diagnóstico inicial:
    - aplicación de un cuestionario estructurado y validado,
    - nivel de avance por dimensión;
- infraestructura productiva:
    - equipos clave como trituradora, peletizadora y lavadora,
    - evaluación de la disponibilidad y estado del equipo;
- cultura organizacional:
    - compromiso del personal, liderazgo institucional y clima laboral,
    - indicadores como la satisfacción laboral y la percepción interna del cambio;

- capital económico disponible:
    - o recursos financieros asignados a estrategias de circularidad,
    - o presupuesto proyectado para sostenibilidad operativa;
- información ambiental y operativa:
    - o datos relevantes sobre generación de residuos, procesos de reciclaje, emisiones y costos,
    - o medición de tasa de reciclaje y costos unitarios;
- capacitación previa:
    - o nivel de formación del equipo humano en economía circular e innovación,
    - o porcentaje del personal capacitado en prácticas sostenibles;
- redes y alianzas activas:
    - o existencia de convenios, redes de colaboración y alianzas interempresariales,
    - o número y calidad de las alianzas activas vigentes.

Para la etapa del proceso, es importante reconocer la estructura metodológica basada en el ciclo PHVA. El modelo adopta esta lógica circular, integrando herramientas de gestión de procesos, innovación y calidad, lo que permite la adaptación a distintos niveles de madurez empresarial, permitiendo una implementación gradual o escalonada:

- Planear:
    - o aplicación de herramientas como SIPOC (*supplier-input-process-output-customer*), VSM (*value stream mapping*) y *benchmarking* sectorial;
    - o identificación de brechas técnicas y organizativas.
- Hacer:
    - o rediseño e implementación técnica de procesos clave;
    - o formación operativa y articulación con redes territoriales.
- Verificar:
    - o revisión de indicadores mediante KPI, sistemas de gestión de calidad (QMS) y análisis de cumplimiento;
    - o uso de herramientas como Random Forest y las 6M para validar desempeño.
- Actuar:
    - o aplicación de estrategias de mejora continua como PDCA, Kaizen y ambidiestralidad operativa;
    - o integración de *feedback* cualitativo y cuantitativo para retroalimentación organizacional.

Las salidas reflejan los impactos generados por el modelo circular una vez aplicado, entendiendo que se esperan resultados en cinco dimensiones clave que consolidan la sostenibilidad integral.

- Dimensión social:
    - o indicadores: encuestas internas, participación social, percepción comunitaria;
    - o resultados: mejora de condiciones laborales, satisfacción del personal, impacto social positivo.
- Dimensión transversal:
    - o indicadores: cumplimiento legal, número de alianzas, percepción global con el modelo;
    - o resultados: cumplimiento normativo, redes colaborativas eficaces, replicabilidad del modelo.
- Dimensión tecnológica:
    - o indicadores: nivel de digitalización, nuevos procesos, personal formado;
    - o resultados: uso de TIC, trazabilidad, innovación continua.
- Dimensión económica:
    - o indicadores: costos unitarios, márgenes operativos, calidad del producto reciclado;
    - o resultados: reducción de costos, mayor rentabilidad, valor agregado a los productos.
- Dimensión ecológica:
    - o indicadores: tasa de reciclaje, residuos no aprovechados, emisiones evitadas (CO_2);
    - o resultados: incremento en la tasa de reciclaje, disminución de residuos y emisiones.

En síntesis, para el desarrollo del modelo circular ajustado en pymes recicladoras de plásticos, se definieron variables estratégicas por cada dimensión, junto con su tipo de medición, a fin de garantizar una evaluación integral, evidenciando que se requiere una estructura clara de evaluación que permita su implementación y seguimiento en contextos reales.

Para ello, se definieron variables estratégicas asociadas a cada dimensión del modelo, las cuales son evaluadas mediante mediciones cuantitativas y cualitativas, según su naturaleza y finalidad analítica. Esta clasificación busca orientar tanto a los gestores como a los investigadores en el monitoreo del avance hacia la sostenibilidad. A continuación, se presenta un resumen estructurado de dichas variables y su respectivo tipo de medición (véase la tabla 14).

Tabla 14. Dimensiones, variables estratégicas y tipo de medición

Dimensión	Variables estratégicas	Tipo de medición
Ecológica	Prácticas de recolección, clasificación, reducción de residuos y control de impacto	Cuantitativa y cualitativa
Económica	Reducción de costos operativos, aprovechamiento de materiales, eficiencia financiera	Cuantitativa
Social	Cultura organizacional, compromiso del personal, condiciones laborales	Cualitativa y cuantitativa
Tecnológica	Uso de TIC, trazabilidad y tecnificación del proceso productivo	Cuantitativa
Transversal	Cumplimiento normativo, alianzas estratégicas, liderazgo y gestión	Cualitativa y cuantitativa

Nota. En la tabla se detallan las principales variables estratégicas por dimensión, así como el tipo de medición empleada para su evaluación dentro del modelo circular.

Fuente: elaboración propia.

Este esquema de variables y tipos de medición no solo facilita la operativización del modelo, sino que también permite su adaptación flexible a diversos entornos organizacionales, garantizando una evaluación integral del desempeño circular. En conjunto, estos elementos fortalecen la viabilidad del modelo circular como una herramienta práctica para la toma de decisiones sostenibles en pymes recicladoras de plásticos, promoviendo una transformación sistémica hacia la economía circular en contextos reales.

Aplicación del modelo en contextos reales

La implementación del modelo circular en una empresa recicladora puede realizarse siguiendo cinco pasos estructurados, los cuales integran tanto las variables cuantitativas como las cualitativas identificadas en este estudio.

- *Diagnóstico inicial:* aplicar el cuestionario validado a la empresa para evaluar su nivel de avance en cada una de las cinco dimensiones del modelo. Este diagnóstico permite clasificar la empresa según grupos de desempeño definidos mediante árboles de decisión (bajo, intermedio, alto).

- *Priorización de brechas:* con base en los puntajes obtenidos por dimensión, se identifican las áreas de menor desarrollo. Las variables priorizadas por los modelos de Random Forest indican cuáles tienen mayor peso para orientar mejoras.

- *Complemento cualitativo:* se pueden hacer entrevistas semiestructuradas al personal o revisión documental para comprender factores no cuantificables que afectan las dimensiones social o transversal, como percepciones, liderazgo o gobernanza.

- *Diseño e implementación de acciones:* a partir del diagnóstico integral, la empresa diseña estrategias operativas o de gestión para mejorar en las áreas críticas. Por ejemplo, implementar trazabilidad digital, formar al personal o establecer alianzas con actores clave.

- *Evaluación periódica y retroalimentación:* se repite la medición después de cada periodo (ej. semestral) para identificar mejoras o retrocesos. Esta retroalimentación alimenta un ciclo de mejora continua, orientado por datos y evidencias.

Esta secuencia asegura que el modelo no solo sea una propuesta conceptual, sino una herramienta funcional, replicable y adaptable a las capacidades reales de las pymes recicladoras.

La construcción del modelo para las pymes recicladoras de plásticos se fundamentó en un enfoque secuencial cualitativo-cuantitativo de tipo exploratorio, que integró hallazgos cualitativos y cuantitativos de forma coherente y complementaria. Este modelo se desarrolla y fundamenta en los principios de la ingeniería de procesos y responde a una serie de condiciones operativas reales del sector reciclador en la ciudad de Bogotá.

En una primera fase cualitativa se aplicó la técnica de modelado de temas (*topic modeling*), utilizando métodos como *LDA* y *Non-negative Matrix Factorization* (NMF), con el fin de analizar las entrevistas semiestructuradas realizadas a los gerentes de operaciones y expertos del sector. Este análisis permitió identificar en las narrativas patrones comunes, tales como la gestión de residuos, el compromiso con la sostenibilidad, la integración social, la innovación técnica y la oferta de servicios complementarios. Estas categorías emergentes fueron la base para el diseño del cuestionario estructurado, instrumento aplicado posteriormente.

Complementariamente, el enfoque propuesto por Zocco y Malvezzi (2024) ofrece una base teórica cuantificable desde la dinámica de sistemas, útil para evaluar y optimizar la circularidad en configuraciones industriales, lo que refuerza la necesidad de estructurar modelos integrales y adaptables en este tipo de estudios.

En la fase cuantitativa se empleó un análisis de *árbol de decisión* (CyRT), que permitió la jerarquización de las variables según su influencia en la percepción global de satisfacción con la economía circular. Entre las variables más determinantes e influyentes se identificaron la innovación en productos y procesos (P13), el impacto en la comunidad (P10) y la tasa efectiva de reciclaje (P1), validando empíricamente los componentes estructurales del modelo.

Una vez integradas estas evidencias, se consolidaron los datos obtenidos durante la investigación y se apuntalaron los datos relevantes y comparables conseguidos, abarcando desde los testimonios cualitativos y sus patrones temáticos hasta los resultados estadísticos del cuestionario aplicado a las 16 pymes evaluadas. Este conjunto de datos y evidencias permitió construir una base robusta para el análisis final.

En esta etapa se incorporó el uso del algoritmo *Random Forest* como herramienta de clasificación y validación. Esta técnica permite estimar con mayor precisión la importancia relativa de cada variable en el desempeño de las pymes, reduciendo el riesgo de sobreajuste y reforzando la solidez empírica del modelo ajustado.

De este modo, el modelo propuesto no solo cuenta con sustento teórico, sino que también se ha validado empíricamente mediante una estrategia metodológica rigurosa. Su diseño incorpora dimensiones críticas, como la eficiencia operativa, el compromiso social, la articulación institucional y la calidad de los procesos, lo que asegura su pertinencia y aplicabilidad en el contexto real de las pymes recicladoras de plásticos en Bogotá.

Resultados del árbol de decisión Random Forest

Para evaluar la importancia relativa de las variables que explican la satisfacción global con el modelo de economía circular, se aplicó el algoritmo *Random Forest* sobre los datos cuantitativos recolectados de las 16 pymes recicladoras de plásticos. Esta técnica permitió identificar las dimensiones y variables con mayor peso predictivo en el desempeño percibido.

Los resultados muestran que las variables más relevantes fueron

- Impacto social percibido (Social_P7_Impacto_social): 22,35 %
- Impacto en la comunidad (Social_P10_Impacto_comunidad): 21,92 %
- Colaboración interempresarial (Transversal_P15_Colaboracion_Pymes): 21,70 %
- Capacitación en economía circular (Tecnologica_P12_Capacitacion): 10,17 %
- Tecnologías limpias (Tecnológica_P11_Tecnologias_limpias): 5,81 %

Las variables relacionadas con la *dimensión ecológica* y *económica* presentaron menor relevancia, lo cual coincide con los hallazgos cualitativos y de árbol de decisión. En particular, variables como *Rentabilidad económica, Calidad de productos reciclados* y *Satisfacción con beneficios de economía circular* no aportaron un peso significativo al modelo predictivo.

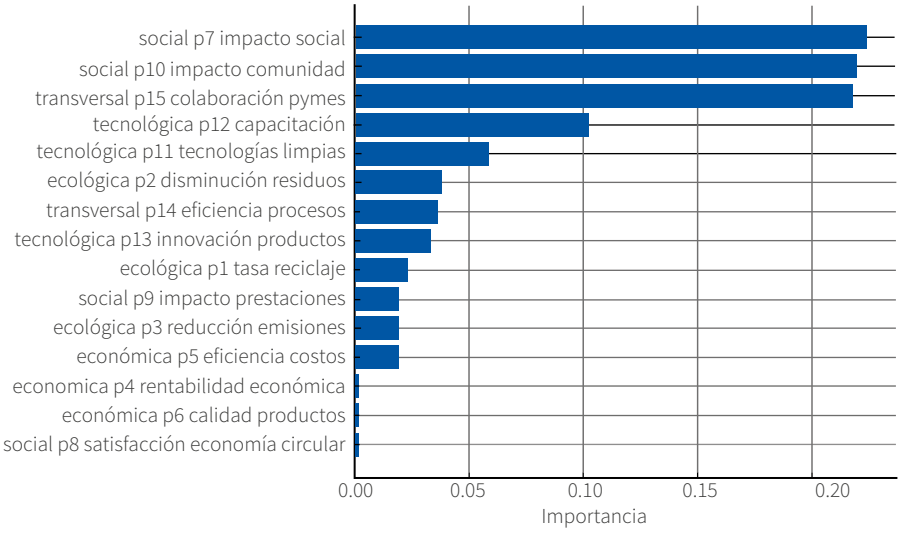
En cuanto al desempeño del modelo, la implementación del algoritmo *Random Forest*, con clases reclasificadas y validación cruzada, arrojó resultados técnicamente satisfactorios. Se observaron niveles altos de precisión en los subconjuntos de prueba, especialmente en la clasificación de empresas con percepciones de satisfacción alta.

Sin embargo, dado el tamaño limitado de la muestra (n = 16), estos resultados deben interpretarse como indicios exploratorios y no como evidencia concluyente. La posibilidad de sobreajuste continúa siendo una limitación inherente a este tipo de análisis con muestras pequeñas. A pesar de ello, la consistencia observada entre diferentes técnicas (Random Forest y árbol de decisión) refuerza la validez relativa del modelo propuesto.

En síntesis, las dimensiones *social, transversal y tecnológica* emergen como las más influyentes en el desempeño circular de las pymes recicladoras, lo que confiere al modelo una utilidad concreta como herramienta diagnóstica y de orientación estratégica dentro del contexto colombiano.

La figura 6 presenta la importancia relativa de las variables que explican la satisfacción global de las pymes recicladoras de plásticos con respecto al modelo de economía circular, según el algoritmo *Random Forest*. Este análisis permitió identificar los factores más determinantes en la predicción del desempeño organizacional desde una perspectiva multivariable y empírica.

Figura 6. Importancia relativa de las variables predictoras en el desempeño circular según el algoritmo *Random Forest*



Nota. La figura muestra los resultados del análisis de importancia relativa de las variables predictoras en la satisfacción global con el modelo de economía circular, aplicando el algoritmo Random Forest a 16 pymes recicladoras de plásticos.

Fuente: elaboración propia.

Como se observa, las variables con mayor peso predictivo e incidencia corresponden a las *dimensiones social y transversal*, en particular: el impacto social percibido (Social_P7), el impacto de la empresa en la comunidad (Social_P10) y la colaboración interempresarial (Transversal_P15), que en conjunto representan más del 65 % de la importancia total del modelo. Estas variables reflejan no solo la conexión entre las empresas y su entorno, sino también la necesidad de fortalecer redes de valor colaborativas para una economía circular efectiva.

En segundo plano, la capacitación en prácticas de economía circular (Tecnológica_P12) y el uso de tecnologías limpias (Tecnológica_P11) también mostraron un impacto relevante, lo que confirma la importancia de la dimensión tecnológica en el fortalecimiento del desempeño organizacional.

Por el contrario, las variables asociadas a la rentabilidad económica o la calidad percibida de los productos reciclados mostraron menor peso explicativo, lo cual sugiere que en esta muestra la percepción de éxito circular se encuentra más estrechamente vinculada al compromiso social, la formación técnica y la colaboración institucional que a resultados estrictamente financieros.

Estos resultados respaldan la estructura del modelo ajustado propuesto en esta investigación, validando empíricamente las dimensiones estratégicas que deben priorizarse en el fortalecimiento de las pymes recicladoras de plásticos en Bogotá.

Procesos estratégicos del modelo

La implementación del modelo en las pymes recicladoras de plásticos requiere un enfoque estructurado que combine los principios de la economía circular con herramientas propias de la ingeniería de procesos.

A partir del análisis de las dimensiones validadas (*ecológica, económica, social, tecnológica y transversal*), se propone una ruta metodológica que permite operativizar el modelo, articulando sostenibilidad, eficiencia y mejora continua. Este enfoque se apoya en la integración progresiva de prácticas circulares, tecnologías limpias, cultura organizacional y alianzas estratégicas.

Los procesos estratégicos definidos para la aplicación del modelo son los siguientes:

- *Planificación y análisis inicial:* evaluar el estado actual de la empresa en términos de infraestructura, procesos, recursos y cultura organizacional; identificar oportunidades de mejora en la gestión de residuos, impacto ambiental, rentabilidad y colaboración (Quispe Palomino y Quispe Huisa, 2021).
- *Identificación de oportunidades:* aplicar *benchmarking* frente a prácticas circulares de referencia, incorporar innovaciones tecnológicas adecuadas al contexto local y

establecer alianzas interinstitucionales que fortalezcan la cadena de valor (Albats et al., 2023; Armijos et al., 2024).

- *Mejora de procesos:* mapear los procesos clave relacionados con la gestión de residuos, clasificación, transformación y comercialización; identificar cuellos de botella y aplicar metodologías de mejora continua, como PDCA (Plan-Do-Check-Act), para incrementar eficiencia y calidad.
- *Desarrollo del plan de implementación:* establecer un cronograma con responsables, recursos y KPI que permitan monitorear avances en cada una de las dimensiones del modelo, asegurando trazabilidad y compromiso organizacional (Geissdoerfer et al., 2017).
- *Capacitación y formación:* promover programas formativos continuos sobre economía circular, tecnologías limpias y gestión colaborativa, dirigidos al personal operativo, administrativo y directivo (Padilla et al., 2024).
- *Monitoreo y evaluación:* aplicar herramientas de gestión de calidad, medición de desempeño y control estadístico que permitan evaluar los resultados alcanzados y retroalimentar la estrategia (Rodríguez Nivicela et al., 2022).
- *Mejora continua:* consolidar una cultura organizacional basada en la innovación incremental mediante metodologías como Kaizen, reforzando los logros obtenidos y adaptando el modelo a los cambios del entorno.

Estos procesos no solo permiten aterrizar el modelo acoplado a la realidad operativa de las pymes recicladoras de Bogotá, sino que aseguran su sostenibilidad, escalabilidad y pertinencia frente a los desafíos contemporáneos del desarrollo sostenible.

Planificación y análisis inicial

La planificación y el análisis inicial constituyen la fase de diagnóstico fundamental para la implementación estratégica del modelo circular ajustado en las pymes recicladoras de plásticos. Esta etapa permite identificar la situación actual de la organización, sus capacidades internas, sus brechas operativas y las condiciones del entorno, garantizando así un punto de partida realista y adaptado a las cinco dimensiones clave del modelo: ecológica, económica, social, tecnológica y transversal.

El proceso de planificación se desarrolla a través de los siguientes componentes:

- *Evaluación de la situación actual:* se hace un análisis exhaustivo de la infraestructura, procesos de reciclaje y capacidades operativas existentes en la empresa, con el objetivo de establecer una línea base de desempeño y sostenibilidad (Quispe Palomino y Quispe Huisa, 2021).

- *Inventario de recursos:* se identifican los recursos disponibles, tanto físicos (infraestructura, maquinaria) como humanos (personal técnico y operativo) y financieros (fondos internos o externos).

- *Análisis de procesos:* se examinan los flujos actuales de recolección, clasificación, procesamiento y comercialización de residuos plásticos mediante herramientas como el mapeo de procesos y el diagrama SIPOC.

- *Evaluación del mercado:* se analizan la oferta y la demanda de productos reciclados a nivel local y regional, incluyendo tendencias emergentes y nichos de valorización de materiales (Enking et al., 2025; Winans et al., 2017). Evaluación del mercado: se analizan la oferta y la demanda de productos reciclados a nivel local y regional, incluyendo tendencias emergentes y nichos de valorización de materiales (Enking et al., 2025; Winans et al., 2017).

- *Identificación de oportunidades:* se aplican análisis de brechas y *benchmarking* con buenas prácticas nacionales e internacionales, lo cual permite detectar áreas prioritarias de intervención.

- Esta fase inicial proporciona información clave para el diseño individualizado del modelo adaptado en cada empresa, asegurando que el plan de implementación esté alineado con las capacidades reales, el contexto de operación y los objetivos estratégicos definidos para cada dimensión del modelo.

Identificación de oportunidades

La identificación de oportunidades representa una etapa estratégica dentro del proceso de implementación del modelo circular, ya que permite detectar áreas críticas de mejora, innovaciones tecnológicas aplicables y posibilidades reales de expansión para las pymes recicladoras de plásticos.

Esta fase se encuentra directamente relacionada con las dimensiones tecnológica, transversal y económica del modelo, al fomentar el fortalecimiento de capacidades, la articulación interempresarial y la inserción en nuevos mercados circulares.

Esta fase se operacionaliza a través de las siguientes estrategias clave:

- *Benchmarking:* realización de comparaciones sistemáticas entre los procesos actuales de la empresa y referentes nacionales e internacionales en buenas prácticas de reciclaje, con el objetivo de identificar brechas de desempeño y adoptar estándares avanzados de circularidad (Cervera-Muñoz, 2023).

- *Innovación tecnológica:* investigación y evaluación de nuevas tecnologías que aumenten la eficiencia, automatización y sostenibilidad de los procesos. Ejemplos

de esto incluyen la adopción de sistemas de clasificación basados en inteligencia artificial, el uso de sensores para separación avanzada o la integración de maquinaria modular de última generación.

- *Colaboración y alianzas estratégicas:* establecimiento de redes de colaboración con otras pymes, universidades, centros de investigación y entidades gubernamentales. Estas alianzas permiten compartir recursos, desarrollar proyectos conjuntos y acceder a programas de apoyo técnico y financiero (Marchi et al., 2017).

- *Exploración de nuevos mercados:* análisis de tendencias locales e internacionales en el uso de materiales reciclados, identificando oportunidades para diversificar la oferta, incursionar en sectores como el mobiliario urbano, los materiales de construcción ecológicos o los productos textiles sostenibles.

Estas estrategias no solo incrementan la eficiencia operativa y reducen los costos, sino que también potencian el crecimiento sostenible de las organizaciones, reforzando su papel en la economía circular y en el desarrollo económico local.

Mejora de procesos

La mejora de procesos implica un análisis crítico y sistemático de las actividades actuales, orientado a la transformación sostenible de los sistemas de producción. Para ello, se propone una hoja de ruta compuesta por las siguientes acciones estructuradas:

- *Mapeo de procesos actuales:* identificación, secuenciación y documentación detallada de todas las actividades relacionadas con la recolección, clasificación, procesamiento y comercialización de plásticos reciclados. Se recomienda el uso de herramientas como diagramas de flujo, SIPOC o *Value Stream Mapping* (VSM) para visualizar los puntos críticos del flujo operativo.

- *Análisis de procesos:* evaluación sistemática de cada etapa para detectar cuellos de botella, redundancias, pérdidas de tiempo o recursos y áreas con bajo valor agregado. Se sugieren técnicas como el análisis de valor agregado, el análisis de causa raíz y la matriz de priorización de problemas (Corbin y Strauss, 2015).

- *Identificación de oportunidades de mejora:* formulación de propuestas específicas que integren la adopción de tecnologías limpias, la automatización de tareas operativas, el rediseño de la cadena de suministro y la aplicación de metodologías como *lean manufacturing* (Ōno, 1988) o seis sigma.

- *Desarrollo del plan de implementación:* establecimiento de objetivos específicos y concretos de mejora, definición de responsables por área, elaboración de cronogramas y presupuestos, así como la planificación de acciones piloto que permitan validar las soluciones propuestas.

- *Capacitación y formación:* ejecución de programas de formación técnica y operativa para asegurar la apropiación de nuevas tecnologías, buenas prácticas de reciclaje y cultura de sostenibilidad dentro del personal de la empresa.

- *Monitoreo y evaluación:* diseño de un sistema de gestión de calidad (QMS) orientado al seguimiento de avances, utilizando indicadores clave de desempeño (KPI) relacionados con eficiencia, costos, productividad y sostenibilidad.

- *Mejora continua:* fomento de una cultura organizacional basada en la innovación permanente y el aprendizaje adaptativo mediante metodologías como el ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*), Kaizen y auditorías internas de procesos.

Desarrollo del plan de implementación

Tal como se introdujo en la descripción de los procesos estratégicos del modelo circular, esta sección profundiza en las estrategias de mejora de procesos, una fase clave para optimizar la eficiencia operativa, incrementar la calidad productiva y reforzar la sostenibilidad en las pymes recicladoras de plásticos. Esta etapa se vincula directamente con las dimensiones *económica*, *tecnológica* y *transversal*, al promover la innovación, la optimización de recursos y el fortalecimiento organizacional.

La implementación sistemática de estas estrategias permitirá a las pymes recicladoras alcanzar mayores niveles de eficiencia y competitividad, y consolidar su compromiso con los principios de la economía circular, el desarrollo sostenible y la mejora continua de sus operaciones.

Asignación de responsabilidades

La fase de asignación de responsabilidades dentro del desarrollo del plan de implementación es crucial para asegurar que las tareas sean ejecutadas de manera efectiva y eficiente. Durante esta fase, se identifican las funciones específicas de cada miembro del equipo o departamento involucrado, a fin de garantizar que las acciones necesarias para alcanzar los objetivos del plan sean asumidas por las personas más capacitadas y con la autoridad adecuada.

La asignación clara de responsabilidades (véase la tabla 15) no solo facilita la organización del trabajo, sino que también establece un sistema de rendición de cuentas, lo que permite monitorear el progreso y efectuar ajustes si es necesario. De igual forma, es importante que las responsabilidades y funciones asignadas estén alineadas con las competencias de cada miembro y con los recursos disponibles, asegurando así una implementación fluida y sin contratiempos.

Tabla 15. Asignación de responsabilidades en la implementación del modelo circular ajustado

Responsabilidad	Persona/Equipo Asignado
Gestión General	Gerente General
Operaciones de Reciclaje	Jefe de Producción
Marketing y Relaciones Públicas	Departamento de Marketing
Educación y Capacitación	Coordinador de Capacitación
Monitoreo y Evaluación	Analista de Calidad
Finanzas y Presupuesto	Director Financiero

Nota. La tabla muestra la distribución funcional de responsabilidades clave asignadas a diferentes áreas o actores de la organización para garantizar la ejecución eficiente del plan de implementación.

Fuente: elaboración propia.

Cronograma

El cronograma es una herramienta fundamental dentro del plan de implementación, ya que proporciona una estructura temporal clara para llevar a cabo las actividades planificadas. Al definir plazos específicos para cada tarea, permite la coordinación de los esfuerzos de los equipos, asegurando el cumplimiento de los objetivos en el tiempo estipulado y la detección de posibles retrasos o desviaciones. Esto facilita el monitoreo y control del proyecto, permitiendo ajustes oportunos para mantener el plan en curso y garantizar su éxito (véase la tabla 16).

Tabla 16. Cronograma de actividades para la implementación del modelo circular

Actividad	Duración	Inicio	Fin
Estudios de viabilidad	2 meses	01/03/2025	30/04/2025
Planificación del proyecto	1 mes	01/05/2025	31/05/2025
Adquisición de maquinaria	3 meses	01/06/2025	31/08/2025
Reclutamiento de personal	2 meses	01/07/2025	31/08/2025
Capacitación y formación	1 mes	01/09/2025	30/09/2025
Inicio de operaciones	-	01/10/2025	-

Nota. Se presenta el cronograma estimado, con la duración y las fechas previstas para cada una de las actividades estratégicas del plan de implementación, estructurado como diagrama de Gantt.

Fuente: elaboración propia.

Presupuesto

El presupuesto en cualquier plan de implementación es esencial, ya que define los recursos financieros necesarios para llevar a cabo las actividades del proyecto de manera eficiente. Un presupuesto bien elaborado permite asignar los fondos adecuados a cada tarea, evitar el derroche y asegurar el uso óptimo de los recursos. También facilita la toma de decisiones al proporcionar una visión clara de las limitaciones financieras y de la viabilidad del proyecto. Un presupuesto detallado es crucial para mantener el control financiero, evitar sorpresas y garantizar que el proyecto se ejecute dentro de los márgenes establecidos (véase la tabla 17).

Tabla 17. Presupuesto estimado por fase para la implementación del modelo circular

Categoría / Fase del modelo circular	Concepto específico	Valor aproximado (COP)
1. Infraestructura	Adecuación de espacio productivo y servicios públicos	$ 80 000 000
	Compra de maquinaria básica (trituradora, lavadora, peletizadora)	$ 120 000 000
2. Gestión del talento humano	Sueldos y prestaciones para 5 empleados durante el primer año	$ 60 000 000
	Capacitación técnica en economía circular e ingeniería de procesos	$ 10 000 000
3. Educación y sensibilización	Campañas de educación ambiental y talleres comunitarios	$ 8 000 000
4. Mejora de procesos y monitoreo	Implementación de indicadores y software básico de seguimiento	$ 12 000 000
	Adquisición de equipos de medición y control de calidad	$ 15 000 000
5. Gestión operativa y logística	Transporte, servicios logísticos, energía y agua	$ 25 000 000
6. Fondo de contingencia e imprevistos	Reserva para ajustes, imprevistos e innovación	$ 20 000 000
TOTAL APROXIMADO		**$350 000 000**

Nota. El presupuesto propuesto se organiza por fases clave del modelo circular e incluye conceptos específicos, con valores aproximados en pesos colombianos (COP). Este presupuesto puede variar según el contexto de cada pyme.

Fuente: elaboración propia.

Capacitación y formación

La implementación exitosa del modelo circular para las pymes recicladoras de plásticos requiere no solo la ejecución inicial de acciones estratégicas, sino también el desarrollo de capacidades internas, el seguimiento continuo del desempeño y la instauración de una cultura organizacional basada en la mejora permanente.

La capacitación de los empleados es esencial para garantizar que la implementación de los nuevos procesos, tecnologías y prácticas de sostenibilidad sea comprendida y aplicada correctamente en toda la organización (Obando Changuán, 2020). Las acciones propuestas en esta fase incluyen

- Desarrollo de programas de formación inicial sobre principios de la economía circular, gestión sostenible de residuos y nuevas tecnologías aplicadas al reciclaje de plásticos.
- Capacitación específica: para el manejo de maquinaria nueva, sistemas automatizados de clasificación y procesos de control de calidad.
- Realización de talleres y sesiones de actualización periódica: para mantener la competencia técnica del personal y fomentar el aprendizaje continuo.

Esta estrategia busca empoderar a los empleados, aumentar su nivel de compromiso y fortalecer la cultura de responsabilidad ambiental dentro de la empresa.

Monitoreo y evaluación

La implementación de un sistema de monitoreo y evaluación es fundamental para asegurar la eficacia de los nuevos procesos y garantizar la mejora continua (Rodríguez Nivicela et al., 2022). Las acciones clave son

- Establecimiento de indicadores clave de desempeño (KPI) que permitan medir aspectos como la eficiencia de los procesos, la calidad del producto reciclado, el uso de recursos y la satisfacción de los clientes.
- Implementación de un sistema de gestión de calidad (QMS) que facilite el control de los procesos productivos, detecte desviaciones y establezca acciones correctivas.
- Revisión periódica de los resultados obtenidos: favorece el seguimiento y la retroalimentación continua a los equipos de trabajo.

Estos mecanismos de evaluación, aplicados de forma clara y coherente, favorecen la identificación en diversas áreas sujetas a planes de mejora, garantizando la alineación con las acciones que cumplan los objetivos estratégicos del modelo circular.

Como herramienta de seguimiento estratégico, se propone la aplicación del enfoque OKR (*Objectives and Key Results*), que permite alinear objetivos cualitativos con resultados clave cuantificables. Esta metodología de gestión facilita la medición del desempeño organizacional mediante indicadores concretos, adaptables al entorno de las pymes recicladoras (Doerr, 2018).

En esa misma línea, se articula con la lógica de los procesos ambidiestros (*ambidexterity strategy*), que equilibran actividades de explotación operativa y exploración innovadora (Duncan, 1976),

Validación del modelo propuesto

La validación del modelo propuesto se ha realizado desde una perspectiva mixta, articulando tres enfoques complementarios: validación empírica, validación teórica y validación por expertos. Esta estrategia asegura la coherencia interna del modelo, su viabilidad operativa y la pertinencia en el contexto de las pymes recicladoras de plásticos en Bogotá (Flick et al., 2015; Hernández-Sampieri et al., 2022).

La *validación empírica* se realizó respecto a los resultados obtenidos mediante la aplicación de los instrumentos a las empresas de la muestra. Los datos recolectados se analizaron con estadística descriptiva, análisis de clústeres y correlación de Spearman, en los que se evidenciaron patrones comunes y diferenciados respecto a la implementación de prácticas sostenibles.

Los componentes del modelo propuesto, como la eficiencia en los procesos de reciclaje, la adopción de tecnologías limpias, el compromiso social, la colaboración interempresarial y la capacitación en economía circular, encuentran respaldo en los hallazgos cuantitativos y cualitativos presentados en el capítulo 4. Esta correspondencia confirma que el modelo no es una construcción teórica aislada, sino una representación estructurada de los elementos que ya se manifiestan, en diversos grados, en las empresas participantes (Babbie, 2000; Creswell y Plano Clark, 2018).

En segundo lugar, la *validación teórica* se fundamenta en la literatura especializada para la construcción y sustentación de la presente investigación, que incluye fundamentos propios, así como aportes clave de la ingeniería de procesos (Kalmykova et al., 2018; J. M. F. Mendoza et al., 2017).

Por último, la *validación por expertos* se realizó mediante revisión conceptual del modelo por parte de académicos e investigadores en sostenibilidad, ingeniería ambiental y economía circular, quienes participaron previamente en la validación del instrumento de recolección de datos.

Esta revisión se alineó con las recomendaciones metodológicas de Geissdoerfer et al. (2017) y Merli et al. (2018) sobre juicio de expertos. Esta revisión permitió contrastar la estructura lógica del modelo, la aplicabilidad de las fases y la factibilidad de implementación en el contexto colombiano. Los expertos valoraron positivamente la pertinencia del modelo, destacando su alineación con las necesidades reales del sector, así como su potencial para guiar intervenciones orientadas al fortalecimiento de capacidades, impulsar la innovación tecnológica y mejorar la sostenibilidad organizacional en pymes de reciclaje.

En conjunto, estos tres niveles de validación empírica, teórica y experta proporcionan una base sólida para afirmar que el modelo circular que se ha propuesto es una herramienta robusta y viable en su contexto. Su aplicación contribuye al desarrollo sostenible del sector y representa un aporte original en la intersección entre la ingeniería de procesos y la economía circular en contextos empresariales.

Conclusiones del capítulo

El modelo ajustado representa una contribución original al integrar principios de ingeniería de procesos con economía circular en el contexto colombiano, ofreciendo una herramienta adaptable para pymes del sector reciclador, con evidencia empírica validada.

La propuesta de un modelo circular para las pymes recicladoras de plásticos, fundamentada en los principios de la economía circular y la ingeniería de procesos, constituye una alternativa viable, sostenible, pertinente y adaptada a las necesidades específicas de las 16 organizaciones ubicadas en la ciudad de Bogotá. A través de un enfoque metodológico secuencial cualitativo-cuantitativo, que integró técnicas de investigación de modelado de temas e incluyó análisis mediante árboles de decisión, se identificaron los principales factores críticos para la implementación, desarrollo y éxito del modelo: la implementación efectiva de estrategias circulares, la eficiencia en los procesos de reciclaje, el compromiso social y el fortalecimiento de redes de apoyo institucional.

El desarrollo del modelo incluye una ruta de trabajo mediante la estructuración y diseño de la definición de objetivos claros, la estructuración de procesos estratégicos, la asignación de responsabilidades, la planificación de cronogramas y presupuestos, así como la incorporación de mecanismos de capacitación, monitoreo y mejora continua, con el ánimo de garantizar la factibilidad técnica, económica, social y ambiental de la propuesta.

La adopción e implementación del modelo permitirá a las pymes recicladoras de plástico optimizar sus procesos productivos, reducir su impacto ambiental, fortalecer su competitividad en un mercado cada vez más exigente en procesos de sostenibilidad y

contribuir a la consolidación de un tejido empresarial cada día más comprometido con la innovación, la responsabilidad social y el desarrollo económico sostenible.

De este modo, el modelo no solo responde a los desafíos contemporáneos de la gestión de residuos plásticos, sino que también ofrece un camino práctico y efectivo hacia una economía circular robusta, resiliente y generadora de valor para la sociedad.

Valor agregado: de la ingeniería a la sostenibilidad territorial

El modelo demuestra que la ingeniería de procesos no solo puede optimizar flujos operativos, sino también estructurar soluciones socialmente inclusivas y ambientalmente responsables. Su enfoque permite planificar, monitorear y ajustar operaciones de reciclaje con criterios técnicos, humanos y ecológicos, contribuyendo así al cumplimiento de varios ODS (8, 12 y 13) desde una lógica aplicada y territorial (Rodríguez Nivicela et al., 2022; Kalmykova et al., 2018).

Este marco también ofrece una plataforma para el aprendizaje organizacional, al estructurar la toma de decisiones en función de datos, percepciones y retroalimentación continua. El objetivo no es únicamente lograr la circularidad de materiales, sino fortalecer las capacidades resilientes y adaptativas de las pymes recicladoras en territorios con presión ambiental y desigualdad social.

Valor social, económico y ambiental del modelo

La implementación del modelo tiene efectos sinérgicos en tres dimensiones clave de la sostenibilidad:

- Social: al fomentar la formalización laboral, la inclusión de poblaciones vulnerables y el reconocimiento del reciclaje como actividad digna y estratégica, se contribuye a mejorar la calidad de vida de los trabajadores, reducir la desigualdad y fortalecer la cohesión territorial.

- Económica: el modelo mejora la eficiencia operativa, permite acceder a mercados diferenciados (verdes o con sellos circulares), optimiza costos de producción y genera nuevas oportunidades de emprendimiento en torno a la valorización de residuos.

- Ambiental: se promueve la reducción efectiva de residuos plásticos, la mitigación de emisiones contaminantes y el fortalecimiento de prácticas productivas con menor huella ecológica, especialmente en zonas urbanas densas como Bogotá.

La combinación de estos tres ejes genera un valor compartido que excede los beneficios individuales de cada empresa, proyectándose como un aporte a los sistemas locales de desarrollo sostenible.

Contribuciones del modelo de economía circular

La investigación desarrollada permitió demostrar que las pymes recicladoras de plásticos, pese a operar en contextos estructuralmente adversos, poseen un potencial transformador decisivo para avanzar hacia modelos de economía circular con impacto local, inclusión social y mejora ambiental. El modelo propuesto se construyó a partir de datos empíricos, análisis técnico y participación de actores clave, lo cual le otorga validez operativa y pertinencia contextual.

Entre las principales conclusiones destacan las siguientes:

- Existen brechas críticas en materia de formalización, innovación, articulación institucional y salud ambiental que afectan el desempeño sostenible de las pymes recicladoras, particularmente en ciudades como Bogotá. Estas brechas no han sido suficientemente atendidas por las políticas públicas vigentes.

- La economía circular, más allá del reciclaje tradicional, debe entenderse como una estrategia sistémica que integra variables tecnológicas, sociales, económicas y ecológicas. Su implementación efectiva requiere modelos adaptados a las realidades de cada territorio y sector.

- El modelo diseñado demostró ser viable, replicable y efectivo al incorporar cinco dimensiones estratégicas (ecológica, económica, social, tecnológica y transversal), fases de implementación progresiva y un sistema de indicadores de sostenibilidad que permite medir avances concretos en función de los ODS.

- Desde la perspectiva de la ingeniería de procesos, el modelo constituye una innovación metodológica y operativa, al incorporar análisis estadístico avanzado, principios de mejora continua y lógica de diseño circular, contribuyendo al campo con herramientas aplicables y con potencial de escalabilidad.

En términos de valor agregado, el modelo genera múltiples beneficios: mejora de procesos, optimización de recursos, inclusión de trabajadores, fortalecimiento institucional y disminución del impacto ambiental, consolidando una propuesta de alto impacto social y ambiental.

Finalmente, la investigación demuestra que la circularidad real solo es posible si se vinculan el saber técnico con el saber territorial, y la política pública con la ingeniería participativa. La sostenibilidad en Colombia depende no solo de innovaciones tecnológicas, sino también de transformaciones institucionales y culturales que reconozcan el rol clave de las pymes recicladoras en la transición ecológica justa.

Contribución estratégica del modelo circular

A diferencia de enfoques genéricos, el modelo responde directamente a tres vacíos detectados en la literatura: la falta de modelos operativos adaptados a pymes reales, la escasa integración de la ingeniería de procesos como eje estructurante y la ausencia de evidencia empírica sobre circularidad organizacional en reciclaje urbano (De Miguel et al., 2021; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024).

El diseño metodológico está basado en entrevistas, árboles de decisión, clústeres y validación cruzada, lo que permitió construir una herramienta contextual, replicable y técnicamente viable para entornos urbanos con características similares a las de Bogotá. Se ha validado que las dimensiones con mayor incidencia en el desempeño circular fueron el compromiso social, la innovación tecnológica y la colaboración interinstitucional (Hernández Alomia, 2025).

Fortalecimiento del modelo: aplicación, indicadores y mejora continua

El modelo circular no es una construcción teórica aislada, sino una herramienta operativa diseñada para aplicarse en escenarios reales, particularmente en empresas recicladoras de plástico urbano en contextos como Bogotá. Su aplicabilidad se refuerza mediante una lógica de funcionamiento basada en ciclos de mejora continua (PHVA), lo que permite a los gerentes y equipos operativos actuar estratégicamente sobre áreas críticas detectadas durante el diagnóstico (Hernández Alomia, 2025).

Cada una de las dimensiones cuenta con indicadores asociados que permiten medir el progreso de las pymes frente a metas de eficiencia, inclusión y sostenibilidad. Por ejemplo, en la dimensión ecológica se mide la tasa de reciclaje y reducción de residuos; en la económica, la rentabilidad y el costo unitario; en la social, la satisfacción organizacional y la formalización laboral; y en la tecnológica, la adopción de tecnologías limpias y el nivel de capacitación del personal.

En cuanto a la dimensión transversal, uno de los aportes innovadores del modelo es incorporar la articulación institucional como variable evaluable, dado que la gobernanza interinstitucional es esencial para la sostenibilidad a largo plazo (Foro Económico Mundial et al., 2016; Marchi et al., 2017; Hernández Alomia, 2025).

Conclusiones y recomendaciones

Este capítulo expone los aportes del modelo propuesto a nivel técnico, social y ambiental, así como su potencial de replicabilidad en otros territorios. Se destacan las contribuciones a la ingeniería de procesos, el fortalecimiento de la sostenibilidad empresarial y la alineación con políticas públicas orientadas al desarrollo circular.

Las conclusiones presentadas buscan dar respuesta a las preguntas de investigación planteadas, verificar las hipótesis formuladas y evaluar el cumplimiento de los objetivos definidos. Asimismo, permiten reflexionar críticamente sobre los avances logrados y las limitaciones persistentes, tanto en la teoría como en la práctica de la economía circular aplicada a contextos empresariales excluidos o periféricos.

De manera complementaria, presentamos recomendaciones orientadas al nivel organizacional, enfocado en las pymes como actores centrales del proceso; al nivel institucional, que compromete a los sectores público y académico en el diseño de políticas y estrategias de apoyo; y al nivel territorial, donde se reconoce la importancia de los contextos locales, las redes comunitarias y las dinámicas sociales en la consolidación de modelos circulares con justicia ambiental y equidad.

Este capítulo final no representa el cierre de un proceso investigativo, sino una apertura hacia nuevas líneas de investigación, validación y escalamiento del modelo, en coherencia con los principios de mejora continua, regeneración ecológica y sostenibilidad con enfoque de equidad.

Conclusiones

La presente investigación doctoral tuvo como objetivo central proponer un modelo de economía circular como alternativa para el desarrollo sostenible en las pymes recicladoras de plásticos de Bogotá, con base en los principios de la ingeniería de procesos.

Este propósito se logró a través de un diseño metodológico secuencial cualitativo-cuantitativo de tipo exploratorio, estructurado en fases que integraron revisión teórica, diagnóstico empírico, validación técnica y ajuste del modelo, garantizando así su pertinencia, aplicabilidad y coherencia con el entorno empresarial objeto de estudio.

Desde una perspectiva integradora, los hallazgos cuantitativos obtenidos mediante análisis de frecuencia, correlaciones bivariadas, árboles de decisión y algoritmos de clasificación (*Random Forest*), junto con el análisis cualitativo de entrevistas semiestructuradas, permitieron identificar patrones sólidos de comportamiento organizacional, así como barreras y potencialidades en la adopción de prácticas circulares.

Estos hallazgos se contrastaron con la literatura existente, lo que permitió consolidar una propuesta fundamentada teóricamente y contextualizada empíricamente.

La estructura y los componentes del modelo se sustentan en cinco dimensiones fundamentales: ecológica, económica, social, tecnológica y transversal. Cada una de estas dimensiones fue validada por medio del análisis empírico, y su integración responde a principios de la ingeniería de procesos, tales como la estandarización, la mejora continua, la eficiencia operacional y la evaluación sistemática del desempeño.

En ese sentido, el modelo no constituye una propuesta teórica abstracta, sino una herramienta concreta, viable y replicable para el fortalecimiento del sector reciclador, con capacidad de generar valor económico, ambiental y social.

Uno de los principales aportes técnicos consiste en la configuración de un sistema de dimensiones estratégicas, en el que se aborden, como en el caso de la investigación desarrollada, las dimensiones ecológica, económica, social, tecnológica y transversal, pero que a su vez permita establecer aportes con variables asociadas e indicadores que permiten medir el grado de circularidad, eficiencia y sostenibilidad de las operaciones. Esto convierte el modelo en una herramienta de ingeniería para la toma de decisiones basada en datos (Hernández Alomia, 2025; Creswell y Plano Clark, 2018).

Desde el campo de la ingeniería aplicada, el modelo desarrolla una estructura metodológica que operacionaliza los principios de circularidad mediante herramientas de sistematización, control de procesos, optimización operativa y mejora continua, claves de la ingeniería de procesos (Kalmykova et al., 2018). La aplicación del ciclo PHVA (planear-hacer-verificar-actuar) como eje metodológico de implementación en las pymes recicladoras representa una innovación concreta, con capacidad de ser replicada y escalada a otros sectores de la industria colombiana.

Desde los aportes a la ingeniería y la sostenibilidad, el modelo constituye una herramienta metodológica robusta que permite aplicar principios de la ingeniería de procesos a desarrollos más sostenibles en contextos de baja tecnificación, generando contribuciones en la estandarización de prácticas operativas en plantas recicladoras y permitiendo cerrar la brecha existente entre la teoría académica y la realidad operativa de las pymes, potenciando la ingeniería como motor de transformación social.

La transición hacia una economía circular demanda repensar los fundamentos de la ingeniería tradicional, orientándola hacia una práctica regenerativa, interdisciplinaria y con enfoque territorial. En este marco, el modelo propuesto en esta investigación

doctoral representa una contribución sustantiva tanto a la ingeniería de procesos como a los enfoques contemporáneos de sostenibilidad, al articular teoría, evidencia empírica y validación aplicada en pequeñas y medianas empresas recicladoras de plásticos en Bogotá (Hernández Alomia, 2025).

En suma, los resultados e impactos obtenidos permiten concluir que el modelo constituye una propuesta válida, pertinente y de alto impacto potencial, no solo en la transformación del sector reciclador, sino en la generación de valor compartido para la sociedad y el medioambiente.

En términos operativos, el modelo actúa como una guía para la ingeniería transformadora. Permite identificar cuellos de botella, evaluar la trazabilidad de materiales, medir la eficiencia energética y establecer mecanismos de retroalimentación para la mejora progresiva. Al hacerlo, democratiza el acceso a metodologías de análisis y diseño propias de la ingeniería avanzada, pero adaptadas a las condiciones y capacidades reales de las pymes (Millar et al., 2019; Rodríguez Nivicela et al., 2022).

La articulación con políticas públicas y marcos internacionales se establece desde el modelo que es coherente con la ENEC (MADS, 2019) y puede servir como base para planes de desarrollo local y agendas regionales de sostenibilidad, por lo cual se articula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en especial con los ODS 9, 11, 12 y 13, así como con diversas políticas de gestión integral de residuos sólidos y economía inclusiva que aportan a estrategias de cambio climático y producción limpia.

En cuanto a procesos de políticas públicas, las implicaciones en el valor agregado territorial y social se reflejan y van más allá de los resultados técnicos. El modelo promueve un enfoque de desarrollo territorial inclusivo, reconociendo y fortaleciendo las capacidades locales que favorecen la dignificación del trabajo de recicladores de base y el fomento de su formalización.

En particular, la dimensión social fortalece el papel de las pymes como agentes de transformación en comunidades periféricas, donde el reciclaje representa no solo una actividad económica, sino también una vía de inclusión y resiliencia.

El modelo incluso atiende tres vacíos críticos detectados en la literatura y que se plantearon en los primeros capítulos del presente libro:

- la falta de modelos adaptados a las condiciones reales de las pymes recicladoras;
- la débil articulación entre ingeniería de procesos y economía circular;
- la escasez de estudios empíricos que evalúen los efectos de la circularidad sobre el desempeño organizacional (Hernández Alomia, 2025; Merli et al., 2018).

La investigación también demuestra cómo la ingeniería con sentido social y ambiental puede generar valor compartido en territorios históricamente marginados. La integración

de variables, como cultura organizacional, alianzas interempresariales, percepción de justicia ambiental y satisfacción del personal reciclador, permite al modelo contribuir a una sostenibilidad estructural que trasciende lo operativo y se instala en lo ético (Arnedo Lasheras, 2020; Padilla-Rivera et al., 2020).

Desde el marco institucional vigente, Colombia ha avanzado en el diseño de instrumentos regulatorios, como la Ley 2232 de 2022 sobre plásticos de un solo uso, la ENEC y la reciente Resolución 803 de 2024 del Ministerio de Ambiente, que operativiza lineamientos concretos para seis flujos prioritarios: plásticos, biomasa, agua, energía, construcción y productos de consumo masivo. No obstante, aún persiste una brecha significativa entre estos instrumentos y su aplicabilidad real en territorios donde operan las pymes recicladoras, especialmente en ciudades como Bogotá (Hernández Alomia, 2025; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024).

Con este fin, el modelo desarrollado permite establecer una hoja de ruta para la incorporación progresiva de criterios de economía circular en las políticas locales y sectoriales. Por ejemplo, promueve la adopción de políticas de compras públicas sostenibles, en las que las entidades estatales prioricen bienes reciclados o de bajo impacto ambiental, generando así demanda estructural para las pymes circulares (Hernández Alomia, 2025).

Asimismo, se destaca la necesidad de integrar incentivos fiscales y financieros, tales como subsidios, tasas preferenciales de interés o deducciones tributarias, dirigidos a las empresas que demuestren mejoras en sus indicadores de sostenibilidad. Esta propuesta cobra fuerza si se vincula con los marcos de financiamiento verde o climático que han venido siendo impulsados por organismos multilaterales, como el BEI o la cooperación alemana (De Miguel et al., 2021; Deuman, 2024).

Un segundo componente clave es el fortalecimiento de la infraestructura normativa y técnica en los entes territoriales, de manera que puedan orientar, supervisar y articular estrategias circulares con enfoque diferencial. En Bogotá, por ejemplo, sería necesario actualizar la política distrital de residuos sólidos para incluir principios de circularidad, rutas tecnológicas para reciclaje de alto valor y plataformas de cooperación público-privada entre asociaciones de recicladores, empresas del sector y universidades (Padilla-Rivera et al., 2024; Hernández Alomia, 2025).

En tercer lugar, se propone impulsar una política de formación y reconversión laboral para el reciclaje con enfoque circular que supere las lógicas asistencialistas y se oriente hacia la certificación de competencias técnicas, el desarrollo de capacidades organizacionales y el acceso a redes de innovación. Esto requiere articular al SENA, las universidades técnicas y los gremios empresariales bajo esquemas de formación dual y asesoría técnica in situ (Obando Changuán, 2020; Iguarán Manjarrés y Campo Rivadeneira, 2017).

Desde una perspectiva transversal, el modelo también ofrece insumos para el diseño de políticas integradas de salud ambiental y desarrollo social, al visibilizar las condiciones laborales precarias, los riesgos sanitarios y la inequidad en el acceso a oportunidades de las pymes recicladoras. El enfoque del modelo permite transitar de una mirada centrada en residuos a una estrategia de economía del bienestar, con impactos positivos en la salud pública, la cohesión social y la resiliencia comunitaria (Sarmiento Paredes et al., 2022).

Finalmente, debe destacarse que la implementación de este tipo de modelos exige una gobernanza colaborativa, en la que los distintos niveles del Estado (nacional, regional y local), el sector privado, la academia y la sociedad civil construyan soluciones, metas y métricas conjuntas. Esto se traduce en la necesidad de diseñar sistemas de información compartidos, observatorios de economía circular y mecanismos de rendición de cuentas que garanticen la trazabilidad, transparencia y mejora continua de las políticas públicas (Albats et al., 2023; Hernández Alomia, 2025).

Líneas de investigación futuras

A partir de los resultados del estudio doctoral y de la validación del modelo circular ajustado, el autor Hernández Alomia (2025) identifica diversas oportunidades para profundizar en el estudio y la consolidación de prácticas de economía circular en pymes recicladoras, tanto en Bogotá como en contextos similares a nivel regional.

Una primera línea de investigación sugerida corresponde a la replicación del modelo en otros sectores productivos, como empresas transformadoras de residuos, industrias manufactureras sostenibles o cadenas de valor del agro. Esto permitirá validar la versatilidad del modelo y ajustar sus dimensiones a diferentes contextos productivos.

Una segunda línea consiste en el desarrollo de herramientas digitales e indicadores automatizados de medición de circularidad que integren las cinco dimensiones propuestas (económica, ecológica, social, tecnológica y transversal) en plataformas de fácil acceso para las pymes. Esta línea es clave para facilitar el monitoreo en tiempo real, reducir cargas operativas y fortalecer la toma de decisiones basada en datos .

En tercer lugar, se recomienda explorar estudios comparativos a nivel nacional e internacional que analicen la influencia de políticas públicas y marcos regulatorios en la adopción de modelos circulares en pymes. Esta línea permitiría establecer un *benchmarking* y contribuir al diseño de políticas más eficientes, adaptadas a las realidades del sector reciclador en América Latina.

Otra línea emergente se orienta hacia la integración de enfoques de responsabilidad extendida del productor (REP) y esquemas de trazabilidad de materiales reciclados,

en articulación con el modelo propuesto. Las investigaciones futuras podrían evaluar el impacto de dichas estrategias en la sostenibilidad del modelo circular, desde una perspectiva sistémica y del ciclo de vida del producto.

Finalmente, se propone investigar la relación entre madurez organizacional y adopción efectiva del modelo circular, considerando factores como liderazgo, cultura empresarial, capacidad de innovación y gestión del conocimiento. Estos estudios permitirían afinar estrategias de implementación progresiva del modelo en función del nivel de desarrollo de cada empresa.

En conjunto, estas líneas de investigación permitirán no solo profundizar el conocimiento académico en torno a la economía circular aplicada a pymes, sino también contribuir a la transformación estructural del sector reciclador, facilitando su tránsito hacia una economía más resiliente, regenerativa e inclusiva.

Recomendaciones

En el transcurrir del presente estudio, se han analizado diversas estrategias y perspectivas conducentes a perfeccionar las operaciones de reciclaje y fomentar la sostenibilidad en las pymes. Durante el recorrido, se han identificado acciones innovadoras y eficaces que pueden aplicarse para potenciar tanto el desempeño económico como el efecto positivo en el medioambiente de estas empresas.

A continuación, se exponen las sugerencias obtenidas de este estudio, proporcionando una orientación práctica para la implementación de un modelo circular en las pequeñas y medianas empresas recicladoras de plásticos, con la finalidad de promover un crecimiento sostenible y competitivo. Con el propósito de fomentar y apoyar la implementación de prácticas de economía circular en las pymes recicladoras de plásticos:

- **Fomentar políticas y normativas** claramente establecidas que exijan a las compañías incorporar prácticas de reciclaje y economía circular. Estas estrategias deben estar en consonancia y concordancia con los ODS.

- **Ofrecer subsidios, deducciones tributarias y otros estímulos financieros** a las compañías que inviertan en tecnologías de reciclaje y adopten prácticas sustentables. Esto motivará a las pequeñas y medianas empresas a hacer las inversiones requeridas para optimizar sus operaciones.

- **Promover la edificación y actualización de infraestructuras de reciclaje**, mejorar los sistemas de recolección y categorización de materiales reciclables. Es fundamental potenciar la infraestructura y la logística para incrementar la eficacia del reciclaje.

- **Impulsar iniciativas educativas y de sensibilización** orientadas a la comunidad y a las compañías sobre la relevancia del reciclaje y la economía circular. Estas campañas deben contemplar la capacitación de los empleados en tecnologías emergentes y buenas prácticas.

- **Respaldar la cooperación entre el sector público y privado** mediante proyectos compartidos y la distribución de recursos. Estas colaboraciones pueden incrementar las habilidades de las pymes e incentivar la innovación en el reciclaje de plásticos.

- **Invertir en investigación y desarrollo** para encontrar soluciones vanguardistas y sustentables para el reciclaje de plásticos. Esto incluye soporte a las pymes en la implementación de tecnologías novedosas y métodos sofisticados que incrementen la eficacia y eficiencia del reciclaje.

- **Fomentar la creación de productos reciclables, desmontables y reparables**, mediante regulaciones que promuevan la economía circular desde el origen del producto.

- **Implementar políticas de compras públicas sostenibles** que privilegien los productos reciclados y sostenibles. Esto podría generar un mercado para los artículos reciclados e incentivar a las compañías a implementar prácticas de economía circular.

- **Adquirir tecnología moderna a través** de equipos de vanguardia y tecnologías en auge que mejoren los procesos de recolección, clasificación y reciclaje de materiales. Estas inversiones incrementarán la eficiencia y la capacidad para procesar información.

- **Ofrecer capacitación continua a los trabajadores** en técnicas de reciclaje, sostenibilidad y economía circular. No solo incrementará la eficacia en las operaciones, sino que también dotará a los empleados de nuevas competencias y saberes.

- **Establecer alianzas estratégicas** con otras compañías, entidades educativas y organizaciones no gubernamentales para intercambiar saberes, recursos y tecnologías. La cooperación entre sectores puede incrementar las habilidades y el efecto de las pequeñas y medianas empresas.

- **Incorporar principios de diseño sustentable** en la producción de materiales, garantizando que sean sencillos de reciclar, desmontar y reparar. Esto promoverá una economía circular y disminuirá la pérdida de recursos.

- **Optimizar la organización y la transferencia de desechos** para su transformación en materiales reciclables. Esto abarca la puesta en marcha de sistemas eficaces de manejo de desechos y la disminución de los gastos operativos.

- **Brindar oportunidades para innovar y diversificar productos** mediante el uso de materiales reciclados. Esto podría ampliar la variedad de productos producidos y optimizar la rentabilidad.
- **Ejecutar campañas de sensibilización y formación** orientadas a la comunidad, con el objetivo de fomentar la relevancia del reciclaje y la economía circular.
- **Involucrar a la comunidad local** en las acciones de reciclaje puede incrementar su involucramiento y dedicación.
- **Establecer sistemas de monitoreo y transparencia** en el uso de materiales reciclados y sostenibles, asegurando la confianza de los clientes y aliados comerciales.
- **Desarrollar programas de incentivos** para motivar tanto a los trabajadores como a la comunidad a participar de manera activa en las actividades de reciclaje. Esto puede abarcar premios financieros o reconocimientos por el óptimo rendimiento en proyectos de sostenibilidad.
- **Implementar programas de reciclaje y devolución de productos** que promuevan la recuperación de materiales de gran valor y minimicen el efecto en el medioambiente. Estas iniciativas pueden cerrar el ciclo de vida de los productos y fomentar la sostenibilidad a largo plazo.
- **Fomentar hábitos responsables en el hogar**, distinguir los desechos reciclables de los no reciclables y guardarlos en los recipientes apropiados. El adecuado proceso de separación de materiales simplifica el proceso de reciclaje y favorece la sostenibilidad.
- **Promover la educación ambiental en espacios comunitarios**, como escuelas, parques y eventos públicos, e impulsar el respaldo a las pymes recicladoras mediante el consumo de sus productos o la difusión de sus iniciativas.
- **Comunicarse** acerca de la relevancia del reciclaje y la economía circular, e involucrarse en conferencias, seminarios y campañas de educación llevadas a cabo por las autoridades locales o las pequeñas y medianas empresas de reciclaje de plásticos.
- **Cooperar con las iniciativas** de higiene y reciclaje en instituciones educativas, parques y otros lugares públicos.
- **Soporte a las pymes** locales especializadas en reciclaje de plásticos, ya sea adquiriendo sus productos o promoviendo sus proyectos.
- **Adoptar costumbres** que reduzcan la producción de desechos, tales como usar bolsas reutilizables durante las compras, emplear botellas de agua reutilizables y eludir productos con embalaje excesivo.

Referencias

Ahmadov, T., Durst, S., Gerstlberger, W. y Kraut, E. (2025). Las Pymes en el camino hacia una economía circular: Perspectivas desde una perspectiva multidisciplinaria. *Management Review Quarterly*, *75*(1), 289-322. https://doi.org/10.1007/s11301-023-00380-2

Albats, E., Podmetina, D. y Vanhaverbeke, W. (2023). Open innovation in SMEs: A process view towards business model innovation. *Journal of Small Business Management*, *61*(6), 2519-2560. https://doi.org/10.1080/00472778.2021.1913595

Almeida-Guzmán, M. y Díaz-Guevara, C. (2020). Economía circular, una estrategia para el desarrollo sostenible. Avances en Ecuador. *Estudios de la Gestión. Revista Internacional de Administración*, (8), 34-56. https://doi.org/10.32719/25506641.2020.8.10

Angulo, M. G., Batista, M. T. y Caicedo, M. I. G. (2024). Advances and Challenges of a Circular Economy (CE) in Agriculture in Ibero-America: A Bibliometric Perspective. *Sustainability, 16*(24), 11266. https://doi.org/10.3390/su162411266

Armijos Armijos, J. C., Ziller Carvajal, K. L., von-Bischoffshausen León, P. y Araya Mena, A. (2024). Diagnostic Study to Evaluate the Degree of Development of the Circular Economy in Chilean Companies through the Application of a 5D Model. *Sustainability, 16*(18), 8145. https://doi.org/10.3390/su16188145

Arnedo Lasheras, R. (con Jaca García, C., León Perfecto, C. y Ormazábal Goenaga, M.). (2020). *Guía práctica para implementar la economía circular en las pymes* (1.ª ed.). AENOR Internacional, SAU.

Atif, S., Ahmed, S., Wasim, M., Zeb, B., Pervez, Z. y Quinn, L. (2021). Towards a Conceptual Development of Industry 4.0, Servitisation, and Circular Economy: A Systematic Literature Review. *Sustainability, 13*(11), 6501. https://doi.org/10.3390/su13116501

Babbie, E. (2000). *Fundamentos de la investigación social*. Cengage Learning Latin America.

Bejarano, P.-A. C., Rodríguez-Miranda, J.-P., Maldonado-Astudillo, R. I., Maldonado-Astudillo, Y. I. y Salazar, R. (2022). Circular Economy Indicators for the Assessment

of Waste and By-Products from the Palm Oil Sector. *Processes, 10*(5), 903. https://doi.org/10.3390/pr10050903

Bianco, C., Isso, F. y Moskat, M. (2021). *Plásticos en América Latina: Breve reseña de su producción, consumo e impactos ambientales*. Break Free from Plastic; Gaia; Taller Ecologista. https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/2022/03/Plasticos-en-America-Latina-2022.pdf

Blei, D. M., Ng, A. Y. y Jordan, M. I. (2003). Latent Dirichlet Allocation. *Journal of Machine Learning Research, 3*(4-5), 993-1022.

Bongers, A. y Casas, P. (2022). The circular economy and the optimal recycling rate: A macroeconomic approach. *Ecological Economics, 199*, 107504. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107504

Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A. y Stone, C. J. (1984). *Classification and Regression Trees*. Wadsworth International Group.

Campuzano Fernández, S. E., Cortes Saavedra, G. M. y Turriago Campuzano, A. M. (2011). Nueva visión mundial de la economía: integración de saberes hacia el cuidado del sistema ecológico. *Nova, 9*(16), 188-208. https://doi.org/10.22490/24629448.502

Cervera-Muñoz, A. (2023). Análisis de la gestión de calidad de los procesos en las empresas de reciclaje de la ciudad de Bogotá: revisión de la literatura. *Producción + Limpia, 17*(2), 154-174. https://doi.org/10.22507/pml.v17n2a9

Circle Economy. (2019). *The Circularity Gap Report. Closing the Circularity Gap in a 9% World*. Platform for Accelerating the Circular Economy. https://www.circularity-gap.world/2019

Coalición de Economía Circular de América Latina y el Caribe. (2022). *Economía circular en América Latina y el Caribe: Una visión compartida*. Organización de las Naciones Unidas. https://www.unep.org/es/resources/publicaciones/economia-circular-en-america-latina-y-el-caribe-una-vision-compartida

Compromiso Empresarial Economía Circular. (2024, julio 2). *Pacto por los Plásticos traza el camino hacia la economía circular de plásticos en Colombia para el 2030*. https://cempre.org.co/pacto-por-los-plasticos-traza-el-camino-hacia-la-economia-circular-de-plasticos-en-colombia-para-el-2030/

Corbin, J. y Strauss, A. (2015). *Basics of Qualitative Research* (4.ª ed.). SAGE.

Creswell, J. W. y Plano Clark, V. L. (2018). D*esigning and Conducting Mixed Methods Research* (3.ª ed.). SAGE.

De la Cuesta González, M. y Pardo, E. (2020). *Transición hacia la economía circular: Guía para PYME*. Fundación Instituto de Crédito Oficial; Universidad Nacional de Educación a Distancia. https://www.fundacionico.es/documents/137403/183194/EC_Pymes_Guia_Final_confichas.pdf

De Miguel, C., Martínez, K., Pereira, M. y Kohout, M. (2021). E*conomía circular en América Latina y el Caribe: Oportunidad para una recuperación transformadora* (LC/TS.2021/120). Comisión Económica para América Latina y el Caribe. https://www.cepal.org/es/publicaciones/46877-economia-circular-america-latina-caribe-oportunidad-una-recuperacion-transformadora

Del Saz, S. (2008). Medio ambiente y desarrollo: Una revisión conceptual. *CIRIEC-España, Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa, 61*, 31-49. https://www.redalyc.org/pdf/174/17412302003.pdf

Deuman. (2024). *Guía para el financiamiento de la economía circular en República Dominicana*. Caribe Circular. https://www.giz.de/en/downloads/giz2024-es-guia-para-el-financiamiento-EC-RD.pdf

Doerr, J. (2018). *Measure what matters: How Google, Bono, and the Gates Foundation rock the world with OKRs*. Penguin.

Duncan, R. B. (1976). The ambidextrous organization: Designing dual structures for innovation. En R. H. Kilmann, L. R. Pondy y D. P. Slevin (Eds.), *The Management of Organization Design* (Vol. 1, pp. 167-188). North-Holland.

Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*. https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an-accelerated-transition

Ellen MacArthur Foundation. (2019). *The butterfly diagram: Visualising the circular economy*. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram

Enking, J., Becker, A., Schu, G., Gausmann, M., Cucurachi, S., Tukker, A. y Gries, T. (2025). Recycling processes of polyester-containing textile waste–A review. *Resources, Conservation and Recycling, 219*, 108256. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108256

Espinoza, A. (2023). Economía circular: Una aproximación a su origen, evolución e importancia como modelo de desarrollo sostenible. *Revista de Economía Institucional, 25*(49), 109-134. https://doi.org/10.18601/01245996.v25n49.06

Esposito, M., Tse, T. y Soufani, K. (2016, junio 7). *Companies are working with consumers to reduce waste*. Harvard Business Review. https://hbr.org/2016/06/companies-are-working-with-consumers-to-reduce-waste

Esposito, M., Tse, T. y Soufani, K. (2018). Introducing a Circular Economy: New Thinking with New Managerial and Policy Implications. *California Management Review, 60*(3), 5-19. https://doi.org/10.1177/0008125618764691

European Commission. (2026, febrero 27). *Circular Economy—Environment*. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy_en

European Commission. (s. f.). *The European Green Deal*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

Flick, U., del Amo, T. y Blanco, C. (2015). *Diseño de la investigación cualitativa*. Morata. https://edmorata.es/wp-content/uploads/2020/06/Flick.Disen%CC%83oInvestigacionCualitativa.PR_.pdf

Flórez Rendón, A. L. y Cogollo Flórez, J. M. (2017). Relación entre las prácticas de ingeniería del mejoramiento y las ventas en las micro, pequeñas y medianas empresas. *Revista Espacios, 38*(41), 24. https://www.revistaespacios.com/a17v38n41/17384124.html

Garcés-Ayerbe, C., Rivera-Torres, P., Suárez-Perales, I. y Leyva-de La Hiz, D. I. (2019). Is It Possible to Change from a Linear to a Circular Economy? An Overview of Opportunities and Barriers for European Small and Medium-Sized Enterprise Companies. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 16*(5), 851. https://doi.org/10.3390/ijerph16050851

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P. y Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production, 143*, 757-768. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048

Geyer, R., Jambeck, J. R., y Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances, 3*(7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

Greenpeace. (2024). *Datos sobre la producción de plásticos*. https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/

Guzzo, D., Pigosso, D. C. A., Videira, N. y Mascarenhas, J. (2022). A system dynamics-based framework for examining Circular Economy transitions. *Journal of Cleaner Production, 333*, 129933. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129933

Hahladakis, J. N. y Iacovidou, E. (2018). Closing the loop on plastic packaging materials: What is quality and how does it affect their circularity? *Science of The Total Environment, 630*, 1394-1400. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.330

Hernández Alomia, O. G. (2025). *Modelo circular como alternativa para el desarrollo sostenible en PYMES recicladoras de plásticos: Un enfoque desde la ingeniería de procesos* [Tesis de doctorado, Universidad EAN]. Biblioteca Digital Minerva. https://hdl.handle.net/10882/14964

Hernández Alomia, O. G., y Cortés Barreto, M. A. (2025). Gestión sostenible, globalización y cultura empresarial en tiempos de crisis; ¿innovar o perecer? *European Public & Social Innovation Review, 11*, 1-15. https://doi.org/10.31637/epsir-2026-1634

Hernández Alomia, O. G., Curvelo Hassán, J. O., y Guevara Torrecillas, D. O. (2025). Modelo circular para el desarrollo sostenible en PYMES recicladoras de plásticos: Una revisión sistemática. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8*(6), 9210-9241. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15601

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C. y Baptista-Lucio, P. (2022). *Metodología de la investigación* (7.ª ed.). McGraw-Hill.

Hurtado, J. (2012). *Metodología de la investigación: Guía para una comprensión holística de la ciencia*. CIEA-Sypal y Quirón.

Iacovidou, E., Velis, C. A., Purnell, P., Zwirner, O., Brown, A., Hahladakis, J., Millward-Hopkins, J. y Williams, P. T. (2017). Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review. *Journal of Cleaner Production, 166,* 910-938. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.100

Ibujés Villacís, J. M. y Benavides Pazmiño, M. A. (2018). Contribución de la tecnología a la productividad de las pymes de la industria textil en Ecuador. *Cuadernos de Economía, 41*(115), 140-150. https://doi.org/10.1016/j.cesjef.2017.05.002

Iguarán Manjarrés, V. J. y Campo Rivadeneira, L. E. (2017). Eficiencia en la productividad desde la perspectiva del cliente interno y externo en las empresas recicladoras del plástico en el departamento de La Guajira-Colombia. *Investigación e Innovación en Ingenierías, 5*(1), 72-91. https://doi.org/10.17081/invinno.5.1.2617

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015. Quality management systems – Requirements*. https://www.iso.org/standard/62085.html

Johnstone, L. (2024). Strategising for the circular economy through servitisation. *Journal of Services Marketing, 38*(10), 17-31. https://doi.org/10.1108/JSM-10-2023-0395

Kalmykova, Y., Sadagopan, M. y Rosado, L. (2018). Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling, 135*, 190-201. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034

Kirchherr, J., Reike, D. y Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling, 127*, 221-232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005

Lau, W. W. Y., Shiran, Y., Bailey, R. M., Cook, E., Stuchtey, M. R., Koskella, J., Velis, C. A., Godfrey, L., Boucher, J., Murphy, M. B., Thompson, R. C., Jankowska, E., Castillo, A., Pilditch, T. D., Dixon, B., Koerselman, L., Kosior, E., Favoino, E., Gutberlet, J., … Palardy, J. E. (2020). *Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. Science, 369*(6510), 1455-1461. https://doi.org/10.1126/science.aba9475

Loayza, A. y Silva Meza, M. (2013). Procesos industriales sostenibles. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial, 11*(2), 113-122. https://www.redalyc.org/pdf/816/81629469013.pdf

Ma, W., De Jong, M., Zisopoulos, F. y Hoppe, T. (2023). Introducing a classification framework to urban waste policy: Analysis of sixteen zero-waste cities in China. *Waste Management, 165*, 94-107. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.04.012

Marchi, B., Zanoni, S. y Zavanella, L. E. (2017). Symbiosis between industrial systems, utilities and public service facilities for boosting energy and resource efficiency. *Energy Procedia, 128*, 544-550. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.006

Martins, A., Castelo Branco, M., Novo Melo, P. y Machado, C. (2022). Sustainability in Small and Medium-Sized Enterprises: A Systematic Literature Review and Future Research Agenda. *Sustainability, 14*(11), 6493. https://doi.org/10.3390/su14116493

Mendoza, J. M. F., Sharmina, M., Gallego-Schmid, A., Heyes, G. y Azapagic, A. (2017). Integrating Backcasting and Eco-Design for the Circular Economy: The BECE Framework. *Journal of Industrial Ecology, 21*(3), 526-544. https://doi.org/10.1111/jiec.12590

Mendoza, R. A., Niebles, E.. E., Barreto, C. D., Fabregas, J. y Buelvas, E. M. (2020). Análisis de la cadena de valor del reciclaje de plástico. Un caso de estudio en el departamento del Atlántico (Colombia). *Espacios, 41*(25). https://www.revistaespacios.com/a20v41n25/20412514.html

Merli, R., Preziosi, M. y Acampora, A. (2018). How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production, 178*, 703-722. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.112

Millar, N., McLaughlin, E. y Börger, T. (2019). The Circular Economy: Swings and Roundabouts? *Ecological Economics, 158*, 11-19. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.012

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022a). *Estrategia Nacional de Economía Circular. Gobierno de Colombia*. https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/estrategia-nacional-de-economia-circular/

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022b). *Plan Nacional para la Gestión Sostenible de Plásticos de un Solo Uso. Gobierno de Colombia*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/plan-nacional-para-la-gestion-sostenible-de-plasticos-un-solo-uso-minambiente.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024a). *Minambiente establece medidas para la reducción gradual de plásticos de un solo uso en Colombia*. Gobierno de Colombia. https://www.minambiente.gov.co/minambiente-establece-medidas-para-la-reduccion-gradual-de-plasticos-de-un-solo-uso-en-colombia/

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024b). Resolución 0803 de 2024: Por la cual se desarrollan parcialmente las disposiciones de la Ley 2232 de 2022, sobre la reducción gradual de la producción y consumo de ciertos productos plásticos de un solo uso, el artículo 2.2.7C.7 del Decreto 1076 de 2015 que establece medidas tendientes a la reducción gradual de la producción y consumo de ciertos plásticos de un solo uso y se adoptan otras disposiciones. *Diario Oficial, 160*(52799), 137-167. https://bit.ly/4cWpbj5

Morseletto, P. (2020). Restorative and regenerative: Exploring the concepts in the circular economy. *Journal of Industrial Ecology, 24*(4), 763-773. https://doi.org/10.1111/jiec.12987

Muñoz-Vélez, M. F., Hidalgo-Salazar, M. A. y Mina-Hernández, J. H. (2018). Effect of Content and Surface Modification of Fique Fibers on the Properties of a Low-Density Polyethylene (LDPE)-Al/Fique Composite. *Polymers, 10*(10), 1050. https://doi.org/10.3390/polym10101050

Murray, A., Skene, K. y Haynes, K. (2017). The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *Journal of Business Ethics, 140*(3), 369-380. https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2

Nizami, A. S., Rehan, M., Waqas, M., Naqvi, M., Ouda, O. K. M., Shahzad, K., Miandad, R., Khan, M. Z., Syamsiro, M., Ismail, I. M. I. y Pant, D. (2017). Waste biorefineries: Enabling circular economies in developing countries. *Bioresource Technology, 241*, 1101-1117. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.097

Noticias ONU. (2021, marzo 26). *La economía circular: Un modelo económico que lleva al crecimiento y al empleo sin comprometer el medio ambiente*. Noticias ONU. https://news.un.org/es/story/2021/03/1490082

Noticias ONU. (2023, junio 5). *El camino de América Latina para detener la marea del plástico*. Organización de las Naciones Unidas. https://news.un.org/es/story/2023/06/1521702

Obando Changuán, M. P. (2020). Capacitación del talento humano y productividad: Una revisión literaria. *ECA Sinergia, 11*(2), 166-173. https://doi.org/10.33936/eca_sinergia.v11i2.2254

Observatorio Empresarial para el Crecimiento Inclusivo. (2022). Guía empresarial para el crecimiento inclusivo. Grupos de interés y valor compartido. *Fundación CODESPA*. https://www.crecimientoinclusivo.org/wp-content/uploads/2022/05/Guia_GruposdeInteres_y_ValorCompartido.pdf

Ojeda, J. P. y Mercante, I. T. (2021). Reciclaje de residuos plásticos para la producción de agregados livianos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 37*, 489-499. https://doi.org/10.20937/RICA.54081

Ōno, T. (1988). T*oyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. Productivity Press.

Organización de las Naciones Unidas. (2024). *Día de las microempresas y las pequeñas y medianas empresas*. https://www.un.org/es/observances/micro-small-medium-businesses-day

Organization for Economic Cooperation & Development. (2022). *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. Organization for Economic Cooperation & Development. https://doi.org/10.1787/de747aef-en

Padilla-Rivera, A., Morales Brizard, M., Merveille, N. y Güereca-Hernandez, L. P. (2024). Barriers, Challenges, and Opportunities in the Adoption of the Circular Economy in Mexico: An Analysis through Social Perception. *Recycling, 9*(5), 71. https://doi.org/10.3390/recycling9050071

Padilla-Rivera, A., Russo-Garrido, S. y Merveille, N. (2020). Addressing the Social Aspects of a Circular Economy: A Systematic Literature Review. *Sustainability, 12*(19), 7912. https://doi.org/10.3390/su12197912

Palomo Llinares, R. y Sánchez-Tormo, J. (2023). Topic modeling mediante machine *learning* no supervisado de artículos científicos sobre salud laboral y servicios de atención de salud a domicilio. *Hospital a Domicilio, 7*(4), 167-178. https://doi.org/10.22585/hospdomic.v7i4.200

Pearce, D. W. y Turner, R. K. (1989). *Economics of Natural Resources and the Environment*. Johns Hopkins University Press.

Pérez Fabián, I. N. (2025). Reciclaje de plásticos: Una estrategia clave para la sostenibilidad ambiental. Una revisión de la literatura. C*iencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8*(6), 9514-9524. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15623

Plastics Europe. (2021). *La economía circular de los plásticos. Una visión europea*. https://plasticseurope.org/es/wp-content/uploads/sites/4/2021/11/Economia_Circular_Plasticos-June2020_Spanish.pdf

Plataforma Urbana y de Ciudades. (2024, octubre 30). *La transición hacia la economía circular en América Latina y el Caribe*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. https://plataformaurbana.cepal.org/es/recursos/la-transicion-hacia-la-economia-circular-en-america-latina-y-el-caribe

Pomponi, F. y Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production, 143*, 710-718. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2020). *Informe de progreso sobre el compromiso global por la nueva economía del plástico*. Organización de las Naciones Unidas. https://www.unep.org/es/resources/informe/informe-de-progreso-sobre-el-compromiso-global-por-la-nueva-economia-del-plastico

Quiroz-Flores, J. C., Aguado-Rodríguez, R. J., Zegarra-Aguinaga, E. A., Collao-Diaz, M. F. y Flores-Pérez, A. E. (2024). Industry 4.0, circular economy and sustainability in the food industry: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering and Operations Management, 6*(1), 1-24. https://doi.org/10.1108/IJIEOM-12-2022-0071

Quispe Palomino, A. y Quispe Huisa, V. (2021). Reutilización y reciclaje de residuos sólidos en economías emergentes en Latinoamérica: Una revisión sistemática. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 5*(6), 13184-13202. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i6.1316

Rajić, M. N., Stanković, Z. Z., Mančić, M. V., Milosavljević, P. M. y Maksimović, R. (2024). Business Process Reengineering with a Circular Economy PDCA Model from the Perspective of Manufacturing Industry. *Processes, 12*(5), 877. https://doi.org/10.3390/pr12050877

Ramos Aranda, M. S. y Duque Cuesta, E. A. (2020). Responsabilidad social y ambiental en las pequeñas y medianas empresas (PYMES). *Panorama Económico, 28*(1), 16-22. https://doi.org/10.32997/pe-2020-2666

Reh, L. (2013). Process engineering in circular economy. *Particuology, 11*(2), 119-133. https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.11.001

Rodríguez Nivicela, D. M., Mosquera Cedillo, X. A. y Vega Granda, A. D. C. (2022). Análisis de la aplicación del modelo de economía circular en las empresas del Ecuador. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas, 5*(1), 127-137. https://doi.org/10.62452/fksw3737

Sarmiento Paredes, S., Carro Suárez, J. y Nava, D. (2022). La transición a una economía circular como una ventaja competitiva en la pyme de la manufactura textil en Tlaxcala, México. *Acta Universitaria, 32*, e3492. https://doi.org/10.15174/au.2022.3492

Schade, A., Melzer, M., Zimmermann, S., Schwarz, T., Stoewe, K. y Kuhn, H. (2024). Plastic Waste Recycling–A Chemical Recycling Perspective. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 12*(33), 12270-12288. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c02551

Taylor, S. J. y Bogdan, R. (2020). *Introducción a los métodos cualitativos de investigación: La búsqueda de significados* (J. Piatigorsky, Trad.). Universidad de Sonora.

The Food Tech. (2024, agosto 9). *El futuro de los empaques: Reciclaje y economía circular en la industria de alimentos y bebidas*. The Food Tech. https://thefoodtech.com/insumos-para-empaque/reciclaje-de-empaques-economia-circular-industria-alimentos-bebidas/#h-innovaciones-tecnologicas-en-recoleccion-y-reciclaje

Torres-Guevara, L. E., Prieto-Sandoval, V. y Mejia-Villa, A. (2021). Success Drivers for Implementing Circular Economy: A Case Study from the Building Sector in Colombia. *Sustainability, 13*(3), 1350. https://doi.org/10.3390/su13031350

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2021). *Engineering for sustainable development: Delivering on the Sustainable Development Goals* [UNESCO Engineering Report]. United Nations. https://www.unesco.org/en/basic-sciences-engineering/report

Velásquez-Barrios, A., Rueda-Duran, C., Marín-Valencia, P., Mogollón-Rincón, E., Álvarez-Giraldo, J., Cardona-Cabarcas, R., Giraldo-Osorio, Ó. H. y Cardona-Alzate, C. A. (2019). Analysis of the environmental impact using the waste reduction algorithm in polypropylene production by applying grade transition strategies in Colombia. *Environmental Science and Pollution Research, 26*(35), 35533-35542. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05493-4

Vera-Acevedo, L. D. y Raufllet, E. (2022). Análisis de la Estrategia Nacional de Economía Circular de Colombia a partir de dos modelos. *Estudios Políticos*, (64), 27-52. https://doi.org/10.17533/udea.espo.n64a02

Winans, K., Kendall, A. y Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68*(1), 825-833. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123

World Commission on Environment and Development (Ed.). (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press.

World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation y McKinsey & Company. (2016). *The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics*. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics

Yu, L., Ge, Q., Han, K., Ji, W. y Liu, Y. (2025). *Designing optimal subsidy schemes and recycling plans for sustainable treatment of construction and demolition waste* (Versión 2). arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2504.10955

Zocco, F. y Malvezzi, M. (2024). *Circular Economy Design through System Dynamics Modeling* (arXiv:2411.13540; Versión 1). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.13540

Sello Editorial
Universidad Nacional
Abierta y a Distancia

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA

Sede Nacional José Celestino Mutis
Calle 14 Sur # 14-23
PBX: 344 37 00 - 344 41 20
Bogotá, D. C., Colombia
www.unad.edu.co

Escanee el código para acceder a la versión *online* de este libro