

Un análisis prospectivo con dinámica de sistemas de las políticas de responsabilidad extendida del productor: Un negocio para unos pocos

Jorge Castrillón-Ocampo, Sebastián Jaén, Pablo Maya-Duque¹

ALIADO - Analítica e investigación para la toma de decisiones, Universidad de Antioquia, Colombia

Abstract

Este artículo presenta un análisis prospectivo de la evolución del sistema de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) para la gestión de residuos en países en desarrollo, utilizando como caso de estudio el sector de envases y empaques en Colombia. El modelo de dinámica de sistemas empleado destaca dos fases diferenciadas en la evolución del sistema REP: una anterior y otra posterior al cumplimiento de las metas máximas de recolección y certificación. En la fase previa al cumplimiento de dichas metas, la simulación muestra un auge en la creación de organizaciones de productores (ORPs), gestores y transformadores, impulsado por el aumento en la demanda. Este crecimiento está influenciado por la magnitud de las metas de recolección, su incremento progresivo y el nivel de integración vertical entre las ORPs y los gestores, lo cual incrementa la rentabilidad. No obstante, las barreras de entrada y la incapacidad de algunas empresas para cubrir la recolección regional de residuos eventualmente desaceleran este auge. En la fase posterior al cumplimiento de las metas, el mercado experimenta la salida de empresas y una reducción de costos, alcanzando un punto de equilibrio. Esta tendencia se acelera aún más si los productores disminuyen la generación de residuos, lo que conlleva a una concentración del mercado, especialmente entre los transformadores. El análisis sugiere que incrementos continuos en las metas de recolección y transformación son necesarios para mantener la competitividad del mercado y evitar el dominio de unas pocas empresas. Los hallazgos resaltan la importancia de las condiciones locales en la configuración de los resultados de las políticas REP. La proliferación de ORPs en Colombia difiere de las tendencias observadas en otros países, lo que ilustra la influencia de los parámetros normativos sobre el comportamiento del mercado. La dinámica de sistemas se presenta como una herramienta valiosa para simular escenarios futuros, apoyar el diseño de políticas y comprender el impacto de la REP en el ecodiseño, las prácticas de economía circular y el cumplimiento normativo. El estudio aboga por el uso de herramientas más robustas de apoyo a la decisión para aumentar la efectividad de las políticas REP y evitar la concentración del mercado y los altos costos.

1. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos ha sido identificada como un problema de alcance global y se espera que aumente a un ritmo más acelerado que el crecimiento poblacional hacia el año 2050. En respuesta a esta problemática, los gobiernos han venido tomando decisiones relacionadas con la gestión de residuos, con el objetivo de mitigar la contaminación de los océanos, la transmisión de enfermedades, el deterioro de los ecosistemas y otras consecuencias negativas (Kaza et al., 2018). Algunas de estas iniciativas se han enmarcado dentro del concepto de economía circular, con el propósito de aumentar la eficiencia en el uso de los recursos, reducir los residuos urbanos e industriales y mejorar el equilibrio entre la

¹ Autor de correspondencia: pablo.maya@udea.edu.co

economía, el medio ambiente y la sociedad (Castro et al., 2022; Ghisellini et al., 2016). La reducción de residuos en este contexto busca regenerar los ecosistemas naturales y mantener en circulación productos y materiales conservando su máximo valor de mercado. Esto implica mantener los materiales en uso como productos y, cuando esto no sea posible, como componentes o materias primas, preservando así el valor intrínseco de los bienes y los materiales (Ellen MacArthur Foundation, 2020).

En el caso particular de los residuos de envases y empaques, algunos esfuerzos se han concentrado inicialmente en atacar el problema de los productos de un solo uso, los cuales, a pesar de ser prácticos por su capacidad de protección y bajo costo, generan toneladas de residuos (Dey et al., 2021). Un ejemplo claro es el de los envases plásticos que, aunque presentan características que deberían facilitar su reciclaje, siguen llegando a los vertederos y muestran bajas tasas de aprovechamiento. No obstante, esta situación se encuentra en proceso de transición gracias a programas como la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) (Lombardi et al., 2021), una iniciativa que traslada la responsabilidad de gestionar los productos al final de su vida útil, incluidos los envases y empaques de un solo uso, a los fabricantes o productores (OECD, 2016).

Responsabilidad Extendida del Productor (REP)

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) define REP como un enfoque de política ambiental en el cual la responsabilidad del productor sobre su producto se extiende hasta la etapa postconsumo, lo que implica que el productor asume la responsabilidad de recolectar los bienes al final de su vida útil (OECD, 2016). En este sentido, los productores tienen la obligación de proporcionar los recursos financieros necesarios para la recolección, o bien, de asumir directamente la operación de recolección, liberando a los municipios de esta tarea. Este tipo de política también busca reducir la proporción de residuos destinados a disposición final mediante el aumento de las tasas de reciclaje e incentivando a los productores a rediseñar productos, envases y empaques, favoreciendo aquellos materiales cuya gestión y valorización resulte más sencilla, y evitando aquellos que representen una carga para el medio ambiente o un riesgo para la salud humana (OECD, 2016).

Algunos de los elementos básicos de una política de responsabilidad extendida incluyen: la definición del productor obligado al cumplimiento (por ejemplo, embotelladores, fabricantes, distribuidores), los productos y/o materiales cubiertos por el sistema (por ejemplo, envases y empaques), las metas de recolección y transformación asociadas a la gestión adecuada de estos productos (por ejemplo, porcentajes anuales de recuperación) y el proceso de certificación del cumplimiento (por ejemplo, reporte anual de certificaciones de aprovechamiento y transformación). En particular, los productores pueden cumplir con la REP de manera individual o colectiva. En el primer caso, el productor asume de forma autónoma el cumplimiento de las metas definidas, estableciendo los procesos requeridos para la recolección, gestión y valorización de los materiales (OECD, 2016). En el caso del cumplimiento colectivo, entra en escena un nuevo actor: la Organización de Responsabilidad del Productor (ORP), que en Colombia recibe el nombre de Plan Colectivo. Cuya función es integrar, en nombre de un grupo de productores, la recolección y distribución de los residuos. Estas organizaciones agrupan a dos tipos de actores (gestores y transformadores), y supervisan y garantizan el cumplimiento de las metas de recolección y transformación, de acuerdo con las cantidades establecidas por la regulación (línea base). La línea base corresponde a una cantidad de residuos calculada con base en el volumen total de empaques puestos en el mercado por el conjunto de productores participantes en un esquema colectivo de cumplimiento.

Los productores son plenamente responsables de financiar y/o apoyar operativamente a la ORP (Kunz et al., 2018). Las ORPs cobran una tarifa por sus servicios, cuyos precios están sujetos a la competencia existente en el mercado debido al número de ORPs en operación. Para un grupo de productores en un esquema de cumplimiento colectivo, la centralización de actividades y responsabilidades, así como la garantía de condiciones justas, son elementos que contribuyen a la reducción de costos (Favot, 2022). Las ORPs son especialmente útiles para brindar servicios de logística inversa a sus miembros, particularmente cuando se trata de empresas de menor tamaño (Tian et al., 2019). En la actualidad, hay aproximadamente 400 sistemas REP en funcionamiento en todo el mundo, la mayoría de ellos en Estados miembros de la Unión Europea (UE), donde la normativa sobre residuos establece normas generales para su uso (Ramasubramanian et al., 2023).

REP en un país en desarrollo de renta media

En la práctica, los países en desarrollo presentan diferencias significativas en la implementación de los sistemas de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) en comparación con los países desarrollados, debido a condiciones contrastantes en diversos factores, incluyendo aspectos sociales, económicos y tecnológicos (Johannes, et.al, 2021). El bajo nivel de desarrollo de la industria del reciclaje dificulta notablemente la implementación efectiva de los sistemas REP en estos países. Una infraestructura de reciclaje robusta es esencial para lograr una recolección, procesamiento y reciclaje eficaces de materiales, elementos centrales en la REP. Sin embargo, en muchos países en desarrollo, las instalaciones inadecuadas y la limitada capacidad tecnológica resultan en bajas tasas de reciclaje y prácticas ineficientes de gestión de residuos. Además, la debilidad del sector del reciclaje representa un reto adicional para involucrar a los productores y garantizar el cumplimiento de las regulaciones REP (Johannes, et.al, 2021).

La existencia de un sistema de recolección basado en el mercado para materiales reciclables puede convertirse en un competidor de las Organizaciones de Responsabilidad del Productor (ORP), que operan bajo el sistema REP (Johannes, H. P., et.al, 2021). En muchos países en desarrollo, esta recolección basada en el mercado suele involucrar recicladores informales que recuperan materiales reciclables con valor de reventa. Estos materiales son recolectados de contenedores en la vía pública o de sitios de disposición, y posteriormente vendidos a intermediarios antes de llegar al vertedero. Para incentivar la cooperación con los recicladores, suele destinarse una parte de los ingresos generados por la comercialización de materiales reciclables al pago de una tarifa de gestión de residuos. Esto permite mejorar las tasas de recuperación al tiempo que los recicladores informales obtienen un sustento a partir de esta actividad. Sin embargo, el sistema REP puede generar competencia con los recicladores informales por materiales valiosos, lo cual podría alterar ese equilibrio (OECD, 2016).

En países en desarrollo, los sistemas REP frecuentemente dependen de la existencia de múltiples ORPs (Park, J., et.al, 2018; Chaudhary, S., and Jain, A. 2023). Esta situación es impulsada por varios factores interrelacionados que difieren notablemente de aquellos presentes en países desarrollados. En primer lugar, la existencia de marcos regulatorios inmaduros genera ambigüedades respecto a las responsabilidades y normativas en la gestión de residuos. Esta incertidumbre lleva a los actores a crear sus propias ORPs para navegar el entorno regulatorio de forma autónoma, lo cual resulta en un enfoque fragmentado de la gestión. En segundo lugar, la falta de infraestructura adecuada genera vacíos en la prestación de servicios que múltiples ORPs intentan cubrir. Al atender necesidades específicas en distintas regiones o sectores, las ORPs pueden adaptar sus estrategias a las condiciones y desafíos locales, especialmente en zonas donde los servicios de recolección formal son limitados o inexistentes. Algunas ORPs se especializan en ciertos materiales o flujos de residuos, lo que contribuye a mejorar

los esfuerzos de reciclaje. Asimismo, la existencia de un sistema informal de recolección robusto añade complejidad al panorama, ya que los recicladores informales desempeñan un papel clave en el reciclaje y su actividad genera competencia entre las ORPs, que buscan integrarlos a sus operaciones o construir sus propias redes de recolección. Esta competencia fomenta un entorno dinámico en el cual múltiples ORPs compiten por involucrar tanto a los productores como al sector informal, lo que contribuye a la proliferación de organizaciones. Por el contrario, en los países desarrollados, los sistemas de gestión de residuos suelen ser más centralizados y estructurados, con un menor número de ORPs operando bajo un marco regulatorio uniforme (OECD, 2016). Esto se traduce en una menor competencia y especialización, dado que la gestión de residuos en estos países es generalmente más regulada. En consecuencia, la combinación de un marco legal incipiente, infraestructura insuficiente y el papel central del sector informal crea condiciones favorables para la aparición de múltiples ORPs que compiten.

En este contexto, el propósito de este estudio es desarrollar un análisis prospectivo que ilustre diferentes escenarios y permita anticipar los posibles resultados e impactos de las políticas REP en países en desarrollo, tomando como caso de referencia el sistema recientemente establecido en Colombia. Este trabajo aborda un vacío en la literatura, ya que la mayoría de las investigaciones existentes se han centrado en el diseño y evaluación de políticas REP en países desarrollados, o bien han pasado por alto las dinámicas específicas de las economías emergentes. Dado que los marcos de política ambiental en estos países suelen evolucionar adaptando prácticas provenientes de la Unión Europea u otras regiones desarrolladas como Estados Unidos, resulta fundamental examinar el impacto de condiciones particulares en los mercados emergentes. Entre estos factores se destacan la competencia entre ORPs, la inmadurez regulatoria y el rol protagónico de los actores del sector informal.

Este estudio analiza las principales variables que afectan el costo, tamaño y desempeño del sistema REP, considerando tanto los efectos esperados de la reducción en la generación de residuos como su retroalimentación sobre el comportamiento del mercado. En particular, se abordan factores como el número de actores involucrados y su desempeño en términos de eficiencia de costos y capacidad para recolectar residuos y cumplir su propósito. Este trabajo se basa en la investigación de Apriadi (2024), que explora escenarios de política para abordar el problema de los plásticos de un solo uso mediante la implementación de sistemas REP, evaluando el impacto de dichas políticas sobre los flujos de residuos plásticos. También se relaciona con el estudio de Mohamad (2024), que aplica la dinámica de sistemas (DS) para analizar el impacto de políticas orientadas a fortalecer los sistemas REP en la industria automotriz.

Este estudio contribuye a la literatura de diversas maneras: ofrece una aplicación del análisis prospectivo mediante dinámica de sistemas para anticipar los impactos de políticas REP, tanto intencionados como no intencionados, considerando las interacciones entre productores, ORPs, gestores y transformadores en el contexto de un país en desarrollo. Genera insumos útiles para países con contextos similares que están adoptando políticas REP. Además, introduce un marco sistémico para evaluar el desempeño de estas políticas en términos de aumento de la recolección y transformación, así como la reducción de costos y disposición final. Finalmente, este trabajo propone un enfoque novedoso para identificar las variables clave que influyen en los resultados de dichas políticas.

2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

Desde la adopción de las primeras políticas de REP en la década de 1990, cuando la OCDE emitió sus primeras directrices sobre el tema (OECD, 2001), ha existido una discusión en torno a la posibilidad de formación de monopolios anticompetitivos y a la conveniencia de contar con múltiples ORPs en comparación con un sistema regulado por un número reducido de estas organizaciones (OECD, 2001). En este sentido, se ha debatido sobre el desarrollo de diferentes esquemas REP, lo que ha derivado en la recomendación de promover la existencia de múltiples ORPs en cada mercado (OECD, 2016; Salhofer et al., 2016). No obstante, existe escasa literatura que aborde el comportamiento dinámico — a lo largo del tiempo— relacionado con la aparición y los costos operativos de las ORPs en el marco de los sistemas REP (Apriadi et al., 2024; Chu et al., 2023; Kuo et al., 2021; Tu et al., 2020). Algunos enfoques que utilizan DS como metodología principal han explorado la evolución, eficiencia y desempeño de las ORPs desde diversas perspectivas y contextos de mercado a nivel mundial.

El trabajo de Xu (2010), propone un modelo de DS con el objetivo de predecir la cantidad de material generado como residuo posconsumo en el mercado de productos electrónicos. Su enfoque evidencia que los modelos de regresión tradicionales no son suficientes para representar las dinámicas de los impactos socioeconómicos. El modelo plantea la existencia de un proveedor externo encargado de gestionar la logística de recolección de los productos al final de su vida útil. Los resultados obtenidos llevan al autor a concluir que existe un problema sistémico en el que los productores, las organizaciones encargadas de la logística inversa y los transformadores deben integrarse para mejorar el desempeño y la eficiencia. Desde otra perspectiva, el trabajo de Destyanto et al. (2019), desarrolla un modelo de DS que integra los esquemas REP para la gestión de residuos de envases y empaques en Indonesia. Esta propuesta plantea un marco conceptual con el propósito de guiar el diseño de políticas. Por su parte, Peng et al. (2019), emplean la teoría de juegos para identificar las principales causas de fracaso de las regulaciones ambientales. El estudio considera como actores a las entidades reguladoras y a las empresas productoras, y analiza su comportamiento durante la implementación de sistemas REP, considerando posibles escenarios de incumplimiento. Posteriormente, utilizan dinámica de sistemas para simular el juego propuesto, encontrando que la legislación, la supervisión y los mecanismos de inspección deben tener un rol más activo para incentivar o restringir las acciones de los productores en contextos REP.

Trabajos recientes han abordado la interacción entre los actores que participan en un sistema REP. Por ejemplo, Tu et al. (2020) proponen un modelo de juego tripartito entre la entidad gubernamental de protección ambiental, los productores y los consumidores, el cual es simulado mediante un modelo de DS. Los resultados sugieren que las estrategias de “regulación estricta” y los subsidios financieros por parte de una autoridad superior de protección ambiental contribuyen a reducir los conflictos de comportamiento entre los actores, aunque sus efectos moderadores son limitados. He y Sun (2022), identifican factores clave para el éxito de los mecanismos REP aplicados al reciclaje de baterías desde una perspectiva del lado de la oferta, utilizando también teoría de juegos. Su estudio, complementado con dinámica de sistemas, concluye que un sistema dinámico de recompensas y sanciones puede lograr que hasta el 97% de los fabricantes de vehículos de nueva energía y los consumidores participen en la protección ambiental a través del reciclaje de estas baterías. Finalmente, el trabajo de Zheng et al. (2022), desarrolla un modelo de decisión mixto utilizando teoría de juegos cooperativos y optimización, con el objetivo de reducir el costo total de recuperación. Los autores concluyen que, para las ORPs, la identificación de la reciclabilidad del material es un factor crítico que debería integrarse a la normativa mediante mecanismos de recompensa y penalización.

En la literatura también se encuentran estudios que, aunque no abordan directamente la problemática de las ORPs, utilizan la dinámica de sistemas para analizar cuestiones relacionadas. Por ejemplo, el trabajo de Kuo et al. (2021) busca optimizar el sistema de financiamiento del reciclaje basado en cadenas de suministro inversas en Indonesia. El estudio presenta resultados relevantes que apoyan la toma de decisiones respecto a la REP en empaques, orientadas a la optimización tarifaria. Los autores prestan especial atención a los flujos de materiales y financieros. El modelo distingue claramente entre recolectores y entidades denominadas “socios de recolección”, y evalúa también la integración de una agencia de reciclaje. De forma similar, Chu et al. (2023) analizan la gestión de residuos eléctricos y electrónicos con el fin de minimizar la liberación de sustancias peligrosas al ambiente. Su estudio evalúa el impacto de los precios sobre la competencia, así como la posibilidad de formalizar las cadenas de suministro informales.

No se han identificado casos en la literatura donde se estudie de forma directa el comportamiento del mercado de ORPs en términos de la entrada y salida de nuevas organizaciones en función de las condiciones del mercado y su impacto en la eficiencia. Resulta necesario profundizar en estudios que exploren la evolución y tamaño del mercado, considerando que, en diversas ocasiones, la relación entre precio y competencia ha sido reconocida como un factor determinante para el éxito de los esquemas REP (Favot, 2022).

3. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO DE CASO

En Colombia, la introducción de políticas asociadas a REP comenzó en el año 2002 con la regulación de la gestión de residuos sólidos. Las primeras iniciativas normativas se enfocaron en los residuos peligrosos y los envases de vidrio no retornables utilizados para alimentos y medicamentos. Posteriormente, se introdujeron regulaciones adicionales para la gestión de baterías de plomo-ácido y medicamentos, seguidas por esquemas de recolección específicos para baterías, computadores, bombillas, neumáticos y plaguicidas. La política más reciente que regula la gestión de envases y empaques bajo un sistema REP fue promulgada en 2018 y actualizada en 2020 (Alianza Circular, 2023).

La política colombiana de REP para envases y empaques distingue entre planes individuales y planes colectivos (ORPs). Cada esquema debe cumplir con la regulación vigente en cuanto a estructura administrativa y técnica, línea base del material introducido al mercado, y características técnicas y logísticas requeridas para su operación (ANLA, 2020). En particular, el funcionamiento logístico y operativo del plan debe garantizar la recolección de residuos, considerando aspectos económicos, ambientales y sociales. Asimismo, debe cumplir con criterios de cobertura geográfica, reportando a la autoridad ambiental sobre aspectos como las rutas de recolección, sistemas de logística inversa, alianzas entre actores, entre otros (ANLA, 2020).

La Figura 1 ilustra la estructura del sistema REP en Colombia. Los recicladores informales, también denominados recuperadores o recicladores de oficio, Son personas que se dedican a recolectar manualmente material residual en las calles o directamente desde zonas designadas para la disposición de residuos. Su sustento depende en gran medida del ingreso generado por la venta del material recuperado, ya sea a organizaciones formales o informales de recolección de residuos (Gallego et al., 2023). El proceso de recolección de residuos en Colombia depende de dos sistemas que coexisten: el sistema público de gestión de residuos, que involucra a varias empresas prestadoras del servicio de aseo responsables de actividades como la recolección de residuos sólidos, la clasificación de materiales reciclables y su transporte a centros de acopio y transformación; y, por otro lado, las organizaciones de

recicladores formalizados que también aportan al sistema público recolectando materiales en zonas que no cuentan con cobertura adecuada de recolección formal.

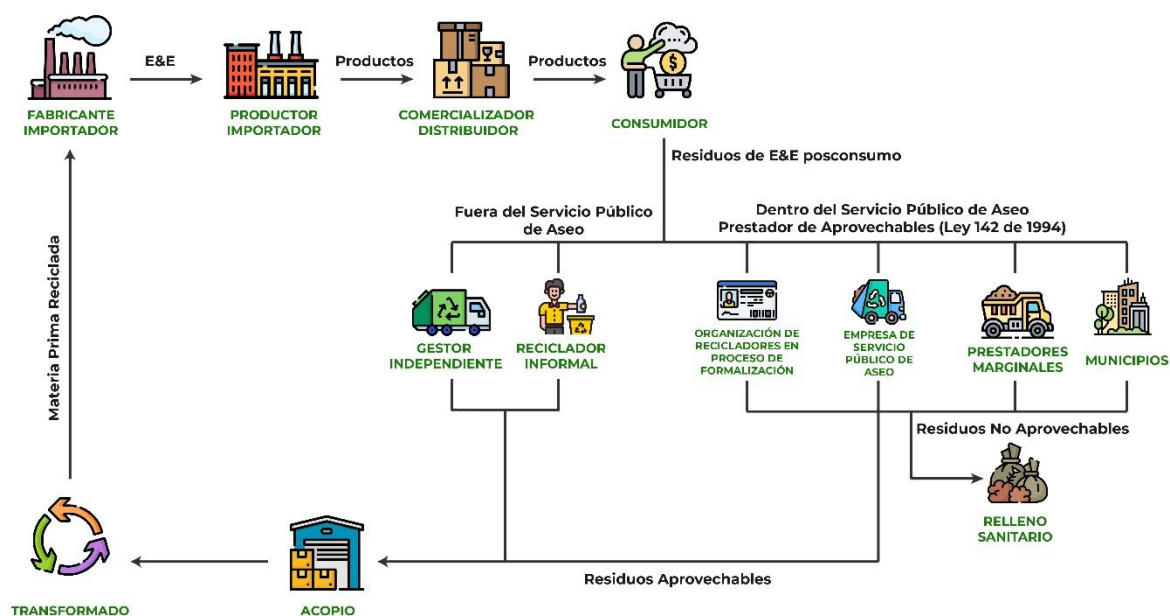


Figura 1. Actores del Sistema REP en Colombia. Fuente (Cempre, 2018).

El segundo sistema opera de forma independiente. Está compuesto por empresas gestoras de residuos que recolectan y manejan materiales reciclables, junto con recicladores informales, todos ellos por fuera del sistema público. Estos actores generan ingresos en función del valor del material que recolectan y venden a intermediarios o directamente a productores. Los esfuerzos logísticos de todas las categorías de organizaciones recolectoras contribuyen a cerrar el ciclo entre productores y consumidores (Gallego et al., 2023).

En Colombia, aproximadamente el 30% de los residuos sólidos generados corresponde a papel, cartón, vidrio, plástico y metal, de los cuales más de la mitad proviene de envases y empaques. A modo de ejemplo, en el caso del plástico —que es el material predominante— se introducen anualmente en el mercado nacional alrededor de 700.000 toneladas, de las cuales se recicla el 31,9%. Sin embargo, solo el 3% de dicho aprovechamiento corresponde a material efectivamente reincorporado en nuevos envases y empaques plásticos (Rojas, 2023). Con la introducción de planes individuales y colectivos (ORPs), y dado que su desempeño depende de factores como los precios, el número de ORPs y su eficiencia, se espera que los niveles de reciclaje y aprovechamiento aumenten tanto en el corto como en el largo plazo.

Metas de recolección y su impacto en el número de ORPs.

El sistema REP colombiano se estructura como un sistema de múltiples ORPs en competencia y, desde su creación en 2021, ha experimentado un auge en el número de organizaciones y planes individuales de cumplimiento. Esto ha impactado el mercado existente en torno a los materiales que gestiona y ha generado un aumento significativo en el número de actores que recolectan y transforman materiales. De acuerdo con Acoplasticos (2022), una asociación gremial colombiana que agrupa empresas de las cadenas productivas químicas, la capacidad instalada de la industria del reciclaje aumentó en un 40%

entre 2019 y 2021. Asimismo, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) informó que el número de transformadores certificados en Colombia entre 2021 y 2023 fue de aproximadamente 200, de los cuales cerca del 40% se registraron durante el último año. Para el año 2021, cuando comenzó a aplicarse la regulación, se estableció como meta recolectar y transformar el 10% del volumen de material de empaque introducido al mercado por los productores. Esta meta aumentará gradualmente entre un 2% y un 3% anual, hasta alcanzar el 30% en el año 2030. Del mismo modo, los requerimientos de cobertura se ampliarán desde las ciudades más pobladas hacia municipios intermedios y pequeños, lo que incrementará los costos asociados a la recolección.

Aún no se tiene claridad sobre cómo reaccionaría el sistema REP ante choques exógenos derivados del aumento en las metas de recolección y transformación. Por tanto, es necesario evaluar, tanto en el corto como en el largo plazo, cómo dicho aumento impactaría el número de ORPs, los precios de los procesos de recolección y transformación, y en última instancia, la cantidad de residuos recolectados. Este análisis debe considerar las dinámicas endógenas propias de las ORPs y los choques exógenos ocasionados por el incremento en las metas regulatorias de recolección y transformación.

4. METODOLOGÍA

4.1. Modelo de dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas (DS) es una metodología adecuada para simular el comportamiento dinámico de sistemas complejos, enfocándose en niveles elevados de agregación y considerando el impacto de políticas, riesgos e incertidumbres sobre el desempeño futuro del sistema (Stermán, 2010). DS utiliza diagramas causales para representar las principales estructuras de retroalimentación y los retardos presentes en el sistema, mientras que las simulaciones permiten identificar el comportamiento futuro de las variables y su influencia a través de mecanismos de retroalimentación (Rebs et al., 2019; Stermán, 2001). Esta metodología es especialmente útil para modelar mercados de recolección de residuos inspirados en la economía circular, debido a su capacidad para representar los flujos de materiales e información, lo que permite realizar análisis prospectivos de las variables involucradas (Ghosh et al., 2023). Además, la DS permite identificar los componentes principales del sistema, simular las relaciones dinámicas entre variables y construir escenarios que ayuden a comprender el impacto de las políticas sobre la estructura y el comportamiento del sistema (Stermán, 2010).

4.2. Hipótesis dinámica

En la DS, la hipótesis dinámica se representa mediante un diagrama de bucles causales que ilustra una visión agregada de la interacción entre las variables del sistema (Stermán, 2010). La hipótesis dinámica presentada en la Figura 1 describe la estructura causal del sistema REP en Colombia, destacando cuatro bucles principales: R1, un bucle de refuerzo que representa el flujo de materiales desde los residuos hacia insumos reutilizables; y los bucles de balance B1, B2 y B3, que modelan la dinámica del mercado considerando los efectos de la oferta sobre los precios, los márgenes de utilidad y la entrada o salida de nuevos actores.

R1 representa el impacto exógeno de la meta de recolección y transformación sobre la demanda de residuos aprovechables. La estabilidad del sistema depende fundamentalmente de esta meta, la cual, según la normativa vigente, establece un objetivo de recuperación de residuos que se incrementa

progresivamente, comenzando en un 10% en 2021 y alcanzando un 30% en 2030. A medida que esta meta se incrementa, también lo hace la demanda de residuos reciclables, lo que incentiva la actividad de los gestores, transformadores y ORPs, quienes deben procesar los residuos y certificar el cumplimiento de los requisitos regulatorios. El bucle R1 es impulsado por la interacción entre transformadores, gestores y la meta de recolección y transformación. Este proceso determina la cantidad de material recolectado, su transformación y la generación de materia prima reciclada, la cual eventualmente regresa a los productores para ser utilizada en nuevos productos, cerrando así el ciclo del sistema y dando origen a nuevos residuos.

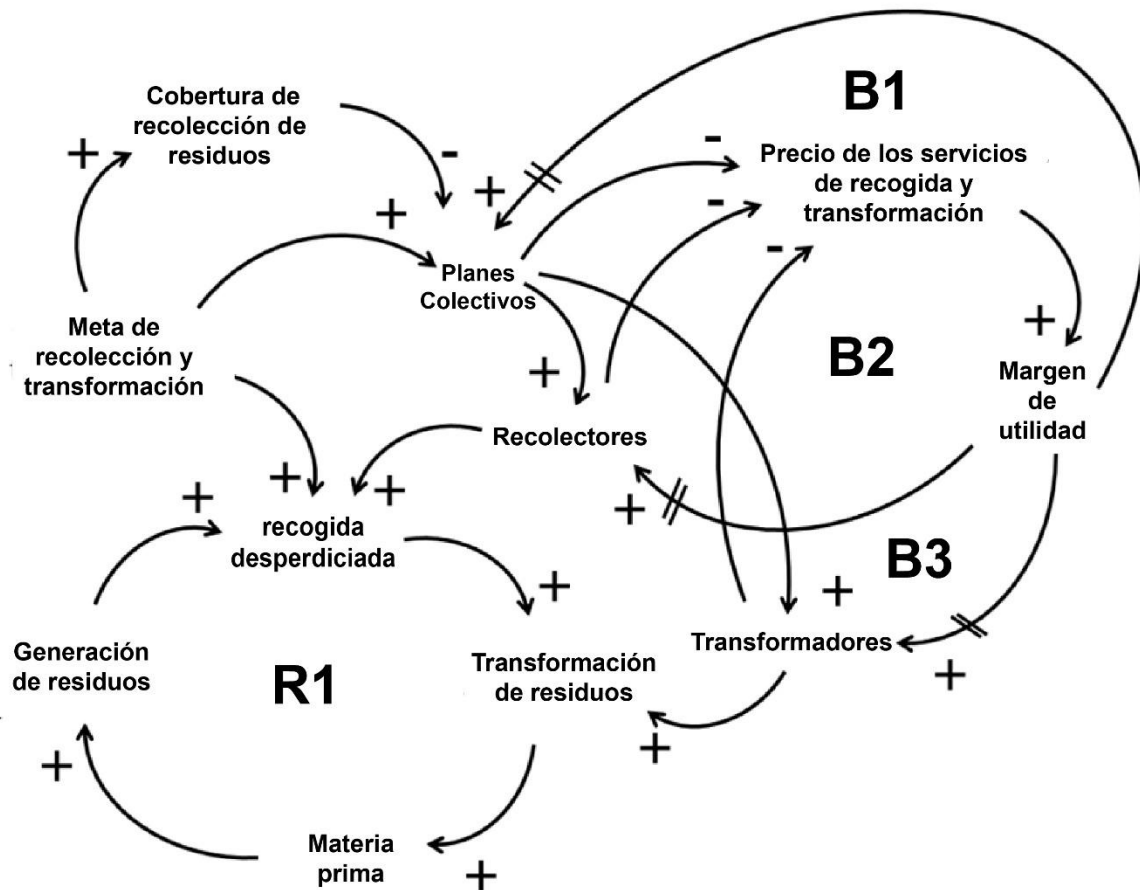


Figura 2. Diagrama causal del sistema de REP de envases y empaques en Colombia.

La dinámica competitiva de cada actor en el sistema se modela a través de los bucles de balance B1, B2 y B3, los cuales reflejan el impacto de la oferta y la competencia sobre la sostenibilidad de cada actor. El bucle B1 (Efecto competitivo sobre las ORPs) muestra cómo la competencia entre ORPs determina el precio de sus servicios. Un aumento en la oferta de servicios por parte de las ORPs reduce los precios, lo que afecta su rentabilidad y limita la entrada de nuevas organizaciones. El bucle B2 (Efecto competitivo sobre los gestores) señala que un mayor número de gestores incrementa la oferta de residuos recolectados, reduciendo el precio por recolección. No obstante, precios más bajos disminuyen los márgenes de ganancia, lo que restringe la entrada de nuevos gestores y equilibra el crecimiento del sector. Finalmente, el bucle B3 (Efecto competitivo sobre los transformadores) representa cómo, a medida que se incrementa la oferta de residuos transformables, la competencia entre transformadores reduce el precio de transformación. Un precio más bajo impacta negativamente los márgenes de utilidad, lo que a su vez afecta la sostenibilidad de estos actores a lo largo del tiempo.

En todos los bucles de balance, el impacto de los márgenes de utilidad sobre el número de empresas no es inmediato ni uniforme; este depende del nivel de barreras de entrada y salida existentes. Las ORPs y los gestores enfrentan barreras de entrada más bajas que los transformadores, debido a la regulación vigente y a la tecnología requerida para prestar sus servicios.

La interdependencia entre estos actores es clave para la estabilidad del sistema. Las ORPs financian el proceso de gestión de residuos mediante el pago de servicios a gestores y transformadores. Sin embargo, los costos de cumplimiento están determinados por factores exógenos, como la meta de recolección y los requerimientos de cobertura territorial, los cuales incrementan la complejidad operativa y financiera del sistema.

La estructura causal representada en la Figura 1 sirve como marco de referencia para analizar la evolución del sistema REP en Colombia. Para evaluar escenarios futuros, es necesario complementar este análisis con un modelo basado en niveles y flujos, que permita simular el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones regulatorias y de mercado.

4.3. Formulación del modelo

Las ecuaciones del modelo de DS, tal como lo plantea Sterman (2010), representan las relaciones cuantitativas entre las variables dentro de un sistema. Estas ecuaciones proporcionan una visión consolidada del sistema, lo que permite determinar trayectorias potenciales de comportamiento dentro de un horizonte temporal determinado. El modelo incluye tres tipos de variables: niveles (que representan existencias y acumulaciones), variables auxiliares (que apoyan los cálculos) y constantes/parámetros (que permanecen inalterados a lo largo del horizonte temporal seleccionado) (Sterman, 2010). La Tabla 1 presenta los niveles, variables y parámetros utilizados en el modelo dinámico del sistema.

Tabla 1. Niveles, variables y parámetros del modelo de dinámica de sistemas

Niveles	
C	Gestores
T	Transformadores
PRO	Organizaciones de responsabilidad del productor
ACC	Capacidad promedio por Gestor
TC	Capacidad promedio de transformación
CC	Capacidad de certificación por PRO
PMG	Material de empaque generado
Variables auxiliares	
OP	Oferta de capacidad de recolección
PMC	Margen de utilidad gestores
CS	Tasa de salida de los gestores
OT	Oferta Capacidad de transformación
PMT	Margen de utilidad transformadores
OC	Oferta de certificación
CD	Demanda de certificados a PRO
PMO	Margen de utilidad PRO
CO	Tasa de PRO que desaparecen
G	Meta de recolección definida por la ley

EG	Efecto de la meta en el costo
PG	Porcentajes planes colectivos con cobertura
Parámetros	
tcPRO	Tiempo de cambio de las PRO (entrada y salida)
tcCC	Tiempo de cambio capacidad de certificación
tcT	Tiempo de cambio de transformadores (entrada y salida)
tcTC	Tiempo cambio capacidad de transformación innovación tecnológica
tcC	Tiempo de cambio de gestores (entrada y salida)
tcACC	Tiempo cambio capacidad recolección innovación tecnológica
gew	Efecto crecimiento anual de residuos
eh	Efecto de la cobertura en la salida PROs
PROCC	Proporción de ORPs que también actúan como gestores
ppc	Porcentaje de pago a gestor
gdr	Tasa de disminución de generación de residuos
GR	Tasa de crecimiento generación de residuos

Las ecuaciones del modelo representan un mercado REP que será simulado a lo largo de un horizonte temporal de 17 años (período 2023–2040). Este horizonte incluye la situación actual, las metas de recolección que se implementarán hasta el año 2030, y contempla además 10 años adicionales para observar el impacto de las políticas. El paso de simulación seleccionado corresponde a una semana, que es el período más común para la recolección y consolidación de materiales.

La formulación del modelo comienza con la definición de las ecuaciones para los tres principales actores del mercado y sus respectivas capacidades de producción. La Ecuación (1) modela el número de ORPs en el mercado. Este número se ve afectado positivamente por la cantidad de ORPs que ingresan, atraídas por el margen de utilidad de esta actividad, y negativamente por aquellas que salen del mercado por no lograr cumplir con las metas de cobertura de recolección. La atracción de nuevas ORPs se modela como el número actual de ORPs multiplicado por el margen de utilidad. Esta representación es similar a la utilizada por Sterman (2010). Tanto el número de entradas como de salidas de ORPs se divide por el tiempo requerido para ingresar o salir del mercado (tcPRO), el cual representa las barreras de entrada y salida del sistema.

$$PRO_{(t)} = \int_{t_0}^t \left(\frac{PRO * PMO - CO}{tcPRO} \right) dt + PRO_{(0)} \quad Firms \quad (1)$$

La Ecuación (2) modela la capacidad promedio de producción del servicio de certificación por parte de las ORPs, denotada como CC. El cambio en esta variable se expresa mediante la diferencia promedio entre la demanda y la oferta de servicios de certificación, dividida por un tiempo de ajuste de dicha capacidad.

$$CC_{(t)} = \int_{t_0}^t \left(\frac{CD - OC}{PRO * tcCC} \right) dt + CC_{(0)} \quad Tn/wk \quad (2)$$

El número de transformadores se modela mediante el nivel T a través de la Ecuación (3). El incremento en el número de transformadores se representa considerando el margen de utilidad de esta actividad, dividido por un tiempo de ajuste, el cual también modela las barreras de entrada y salida del mercado.

$$T_{(t)} = \int_{t_0}^t \left(\frac{T * PMT}{tcT} \right) dt + T_{(0)} \quad Firms \quad (3)$$

La capacidad promedio de transformación, TC, está dada por la Ecuación (4). Al igual que en la Ecuación (2), TC se determina a partir de la diferencia promedio entre la demanda y la oferta de servicios de transformación, dividida por un tiempo de ajuste.

$$TC_{(t)} = \int_{t_0}^t \left(\frac{CD-OT}{T * tcTC} \right) dt + TC_{(0)} \quad Tn/wk \quad (4)$$

El número de gestores en el modelo está representado por el nivel G, el cual se modela mediante la Ecuación (5). La estructura de esta ecuación es similar a la de la Ecuación (1).

$$G_{(t)} = \int_{t_0}^t \left(\frac{G*(PMC-CS)}{tcG} \right) dt + G_{(0)} \quad Firms \quad (5)$$

La capacidad promedio de recolección, ACC, se modela mediante la Ecuación (6), y su estructura es igual a la de las Ecuaciones (2) y (4).

$$ACC_{(t)} = \int_{t_0}^t \left(\frac{CD-OP}{G * tcACC} \right) dt + ACC_{(0)} \quad Tn/wk \quad (6)$$

La Ecuación (7) modela la cantidad de residuos generados, PM. Esta depende de la cantidad actual de residuos multiplicada por una tasa de generación de residuos.

$$PMG_{(t)} = \int_{t_0}^t (PMG * GR) dt + PMG_{(0)} \quad Tn \quad (7)$$

La modelación de los precios de certificación, recolección, procesamiento y los márgenes de utilidad es similar para los tres actores. La Ecuación (8) muestra que la determinación de los precios se presenta como una relación entre la demanda y la oferta, multiplicada por el precio base. La ecuación del margen de utilidad se expresa mediante la Ecuación (9).

$$Price = Baseprice * \left(\frac{Demand}{Supply} \right) \quad \$/Tn \quad (8)$$

$$ProfitMargin = \left(\frac{Revenue-Expense}{Revenue} \right) \quad Adimensional \quad (9)$$

La meta de recolección G, descrita en la Ecuación (10), representa el objetivo que, según la normativa colombiana, variará año tras año, tal como se indica en el vector, pasando del 14% en el año actual al 30%.

$$G = GRAPH(Time; \Delta t; t_0; \{0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24; 0,27; 0,3; 0,30\}) \quad (10)$$

El impacto esperado en los costos que tendrán los requerimientos de cobertura sobre las ORPs, denotado como EG, se describe mediante la Ecuación (11). La función graph modela el porcentaje de ORPs que se estima saldrán del sistema a medida que se imponen niveles más altos de cobertura. La función $Y(G)$ representa una aproximación sigmoide que captura el incremento en los costos resultante del aumento en los requerimientos de cobertura geográfica establecidos por la normativa vigente. Esta función inicia con un valor constante de 1, luego desciende rápidamente y se estabiliza gradualmente hasta alcanzar un valor mínimo de 0.3. Su comportamiento es similar al de un ajuste logístico, manteniéndose siempre entre los valores de 1 y 0.3, que representan sus límites.

$$EG = GRAPH(G; 0,14; 0,01; \{Y(G)\}) \quad (11)$$

El porcentaje de ORPs que cumplen con las condiciones de cobertura está representado por la variable PG, calculada mediante la Ecuación (12).

$$PG = (1 - EG) \quad (12)$$

4.4. Datos usados en el modelo

La información utilizada para ejecutar el modelo proviene de diversas fuentes. El número actual de ORPs y transformadores, así como sus características, fue proporcionado por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). El número inicial de gestores se calcula de manera aproximada a partir de la revisión de los censos de recicladores en varias ciudades de Colombia. Este valor, si bien busca aproximarse a la realidad, se ve afectado por el alto nivel de informalidad presente en el sector.

El nivel de generación de residuos se obtiene de World Wide Fund for Nature (WWF), una organización independiente dedicada a la conservación ambiental, que en febrero de 2023 reportó que en Colombia se generan anualmente 700.500 toneladas de envases y empaques plásticos (World Wildlife Fund, 2023). A partir de este valor, se calcularon las capacidades promedio de gestores, transformadores y ORPs con base en la información previamente mencionada.

Los experimentos consideran cinco escenarios diferentes. El primer escenario, **S1: Escenario base**, se construye a partir de la información y los valores actuales de los parámetros utilizados para generar la instancia del modelo. El segundo escenario, **S2: Disminución en la generación**, corresponde al caso en el que el costo de la recolección de material aumenta a medida que se implementa la política, debido a los requerimientos adicionales de cobertura que esta impone de manera gradual, así como a la presión ejercida por la necesidad de alcanzar mayores tasas de recolección. El tercer escenario, **S3: Aumento en la función de costo**, modela la reducción esperada en la generación de material de empaque como consecuencia de la introducción de la política REP. Esta reducción se prevé como resultado de la adopción por parte de los productores de estrategias de ecodiseño o prácticas propias de la economía circular, como la retornabilidad y la reutilización. El cuarto escenario, **S4: Aumento en la meta de recolección**, representa una posible intensificación de la normativa, en la que la meta de recolección continúa incrementándose más allá del plazo estipulado por la regulación vigente. Finalmente, el escenario **S5: Disminución en la generación y aumento en la recolección** representa una de las posibilidades más relevantes al considerar una caída en la generación de residuos debido al surgimiento de tecnologías de ecodiseño, junto con un incremento en la tasa de recolección provocado por una regulación más estricta.

4.5. Reporte de simulación

Software: Powersim Studio 10 Expert® (10.14.5555.6) versión de 64 bits. Hardware: OS Windows 10 Home. Procesador Intel (R) Core(TM) i3-23-10M CPU @ 2.10 GHz 2.10 GHz. RAM 4.00 GB. Tipo de sistema: Sistema operativo de 64 bits, procesador basado en x64. Simulación: Integración de Euler con paso de 1 semana y horizonte temporal de 17 años, utilizando el calendario gregoriano.

4.6. Validación y pruebas del modelo

El proceso de validación y verificación se llevó a cabo considerando pruebas de estructura, comportamiento y políticas (Sterman, 2010; Ford, 2020). La estructura fue validada con el apoyo de un grupo de expertos en el campo de la recolección de residuos y los esquemas de mercado de ORPs. Su participación fue crucial para la realización de la Prueba de adecuación de fronteras *Boundary Adequacy Test*, diseñada para evaluar si el modelo incluye todas las variables relevantes y los bucles de retroalimentación necesarios para explicar el problema o el comportamiento que se está estudiando. Adicionalmente, se aplicó la Prueba de evaluación de estructura para verificar si la estructura del modelo representa con precisión el sistema real que se pretende simular.

Se identificaron variables clave y se establecieron los límites del modelo, asegurando la consistencia dimensional y realizando una Prueba de evaluación de parámetros (*Parameter Assessment Test*) con el fin de evaluar si los valores de los parámetros utilizados en el modelo son apropiados, realistas y están fundamentados en datos empíricos o en teorías ampliamente reconocidas (Sterman, 2010).

El comportamiento del modelo se evaluó mediante diversos métodos, incluyendo el análisis de sensibilidad, que permite examinar cómo afectan los cambios en los parámetros de entrada al resultado del modelo. También se realizaron pruebas bajo condiciones extremas, pruebas de anomalía de comportamiento y pruebas de comportamiento inesperado, para evaluar si el modelo presenta un comportamiento plausible cuando se expone a valores de entrada extremos o poco realistas.

El grupo de expertos también brindó aportes para el análisis de políticas y validó los resultados obtenidos. Sin embargo, no se realizó la prueba de reproducción de comportamiento, dado que el sistema REP de envases y empaques en Colombia fue establecido recientemente, por lo cual no existe información histórica disponible sobre su comportamiento. Además, este estudio adopta un enfoque prospectivo, orientado a predecir el comportamiento futuro (a mediano y largo plazo) del sistema.

Adicionalmente, se llevó a cabo el análisis de statistical screening utilizando la metodología propuesta por Ford & Flynn (2005), con el objetivo de identificar las variables de entrada clave en el modelo de dinámica de sistemas.

5. RESULTADOS

Las simulaciones presentadas a continuación corresponden a la posible evolución del mercado REP en Colombia, considerando incrementos en las metas de recolección y transformación de residuos para los tres escenarios definidos.

5.1. Análisis de escenarios

Escenario S1: corresponde al escenario base, en el cual se consideran los objetivos principales establecidos por la normativa.

Número de empresas: El escenario base (S1) muestra que, bajo las condiciones actuales, se proyecta que estas organizaciones aumenten de 56 a aproximadamente 80, lo que convierte a este escenario, junto con el escenario 3 (aumento en los costos), en aquel con mayor número de ORPs en el mercado (Figura 3). El aumento escalonado en el número de ORPs refleja el efecto de la demanda generado por el

incremento progresivo en las metas de recolección hasta el año 2030. Una vez que la meta de recolección alcanza el 30%, el número de ORPs comienza a disminuir de forma sostenida, principalmente debido a los efectos de la competencia y a la falta de cobertura regional por parte de algunas ORPs. El número de gestores (Figura 5) y transformadores (Figura 7) también incrementa de manera escalonada (como respuesta al aumento progresivo de la demanda) hasta el año 2030, tras lo cual comienza a disminuir como resultado de la competencia y de la salida de ORPs del sistema.

Costo de certificación de las ORPs: El costo de recolección y transformación aumenta de forma escalonada hasta el año 2030, momento en el cual se alcanza la meta máxima de recolección (Figura 4). A partir de ese punto, el costo se mantiene constante, alineándose eventualmente con el precio observado en el escenario 4 (aumento en las metas de recolección) en el largo plazo. El precio permanece estable después de 2030 debido al valor constante de la meta de recolección del 30%. La naturaleza dinámica del precio antes de 2030, caracterizada por una disminución temporal posterior a cada incremento escalonado en la meta de recolección, está impulsada por el efecto competitivo de la entrada de nuevas empresas al mercado, como respuesta al crecimiento en la demanda derivado de las metas regulatorias.

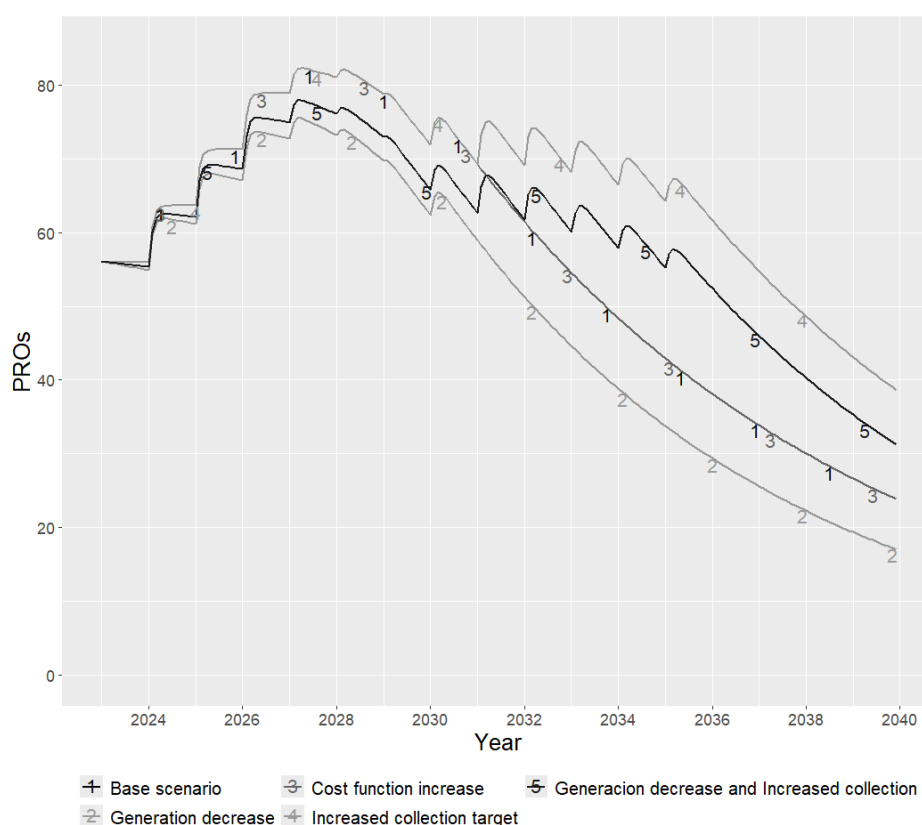


Figura 3. Número de ORPs.

S2. Disminución en la generación: Este escenario considera una reducción del 20% en la generación de residuos por parte de los productores a lo largo del horizonte temporal de la simulación, debido a uno o más factores como medidas de reducción de costos, mejoras en los productos o consideraciones ambientales. También incluye el aumento progresivo en las metas de recolección establecidas por la regulación hasta el año 2030.

Número de empresas: En este escenario, a medida que disminuye la generación de residuos, también se reduce el número de ORPs (Figura 3), gestores (Figura 5) y transformadores (Figura 7). De manera similar al escenario S1 (escenario base), los incrementos escalonados y las reducciones de precios posteriores a 2030 están impulsados por el aumento progresivo de las metas de recolección y los efectos competitivos que se producen una vez alcanzada la meta máxima.

Costo de certificación de las ORPs: Este es el escenario menos costoso (Figura 4), ya que la disminución constante en la demanda provoca una caída en los precios. Los costos de certificación corresponden a la suma de los costos de recolección y transformación. La reducción en el costo de certificación está impulsada principalmente por la disminución en el costo de transformación (Figura 8), dado que los transformadores enfrentan mayores barreras de salida en comparación con los gestores, lo que genera un excedente de servicios de transformación respecto a la demanda. Los costos de recolección se mantienen estables después del pico de 2030 (Figura 6), ya que la disminución de la demanda se equilibra con la salida de gestores del sector. Esto es posible porque los gestores enfrentan menores barreras de salida.

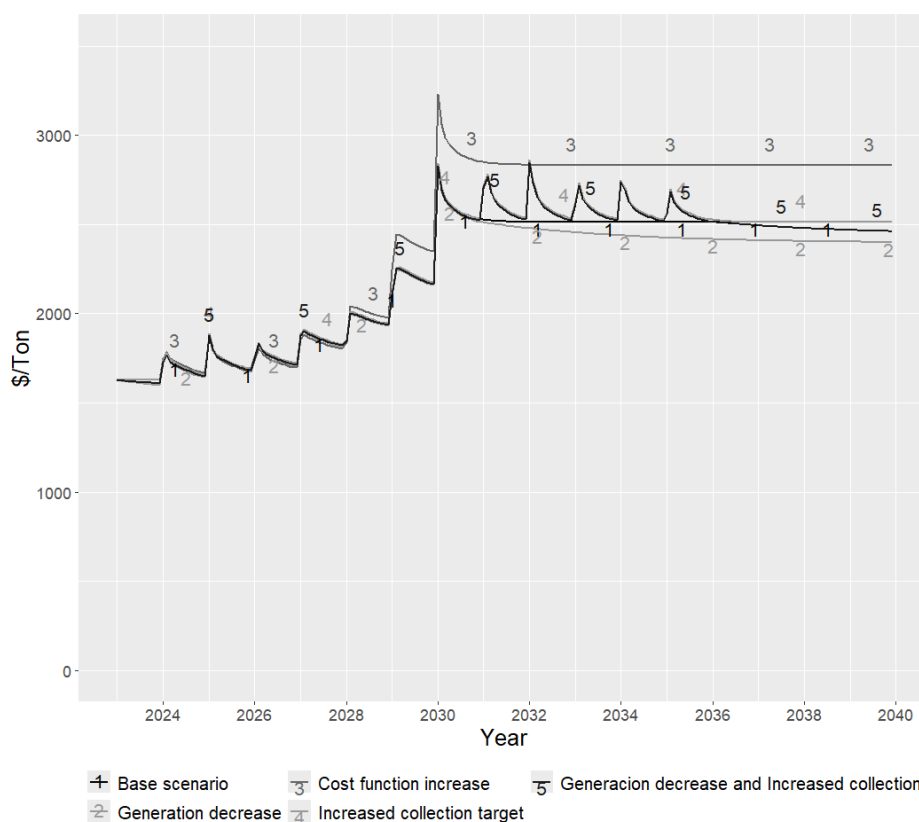


Figura 4. Costo de certificación.

S3. Aumento en la función de costo: Este escenario contempla el impacto del aumento en los costos de recolección sobre el número de empresas y los costos de certificación, impulsado por la creciente demanda de recolección de residuos en zonas rurales, remotas y también en áreas metropolitanas.

Número de empresas: Este escenario alcanza el mismo número de ORPs, gestores y transformadores que el escenario base (S1). Dado que la demanda de recolección y transformación es similar a la del escenario base, se espera que el número de empresas se mantenga aproximadamente constante.

Precio de certificación de las ORPs: La Figura 4 muestra que este es el escenario más costoso. El precio está determinado principalmente por el costo de recolección (Figura 6), que aumenta significativamente al alcanzar la meta máxima de recolección en 2030. Posteriormente, el costo de recolección disminuye y se estabiliza a medida que la oferta y la demanda alcanzan un equilibrio. El precio del servicio de transformación sigue el mismo patrón observado en el escenario base (S1) después del periodo pico de recolección en 2030.

Según la simulación, dado que los costos de recolección son asumidos por los productores, esto no afecta directamente las dinámicas de las ORPs, gestores o transformadores. Sin embargo, este incremento en los costos para los productores podría motivar una menor generación de residuos, efecto que fue considerado en los escenarios 2 y 5.

S4. Aumento en la meta de recolección: Este escenario considera que el pico máximo de residuos recolectados no es del 30% en el año 2030, sino del 50% en el año 2035.

Número de empresas: Este escenario alcanza el mismo número de ORPs, gestores y transformadores que el escenario base (S1) y el escenario de aumento de costos (S3). Sin embargo, después de 2030, el número de ORPs no disminuye en la misma medida que en S1 y S3, debido a los incrementos exógenos en la demanda hasta alcanzar la meta de recolección del 50% (Figura 3). La disminución posterior a 2030 está impulsada por la competencia entre las empresas y el mandato regulatorio de ampliar la cobertura de recolección en zonas rurales. Esta dinámica también se observa entre los gestores (Figura 5) y transformadores (Figura 7), aunque con diferentes intensidades. El número de transformadores tiende a estabilizarse una vez que se alcanza la meta de recolección en 2035.

Precio de certificación de las ORPs: El costo de certificación en este escenario es el segundo más alto, debido a que la meta de recolección es mayor (Figura 4). El costo de recolección (Figura 6) sigue un patrón similar al de los escenarios S1, S2 y S5, presentando incrementos escalonados, especialmente en el S5, donde las metas de recolección se elevan hasta el 50%. Los costos de transformación (Figura 8) tienden a fluctuar a medida que las metas de recolección aumentan progresivamente. Una vez alcanzada la meta máxima de recolección, el costo se mantiene prácticamente constante, ya que la oferta logra satisfacer la demanda.

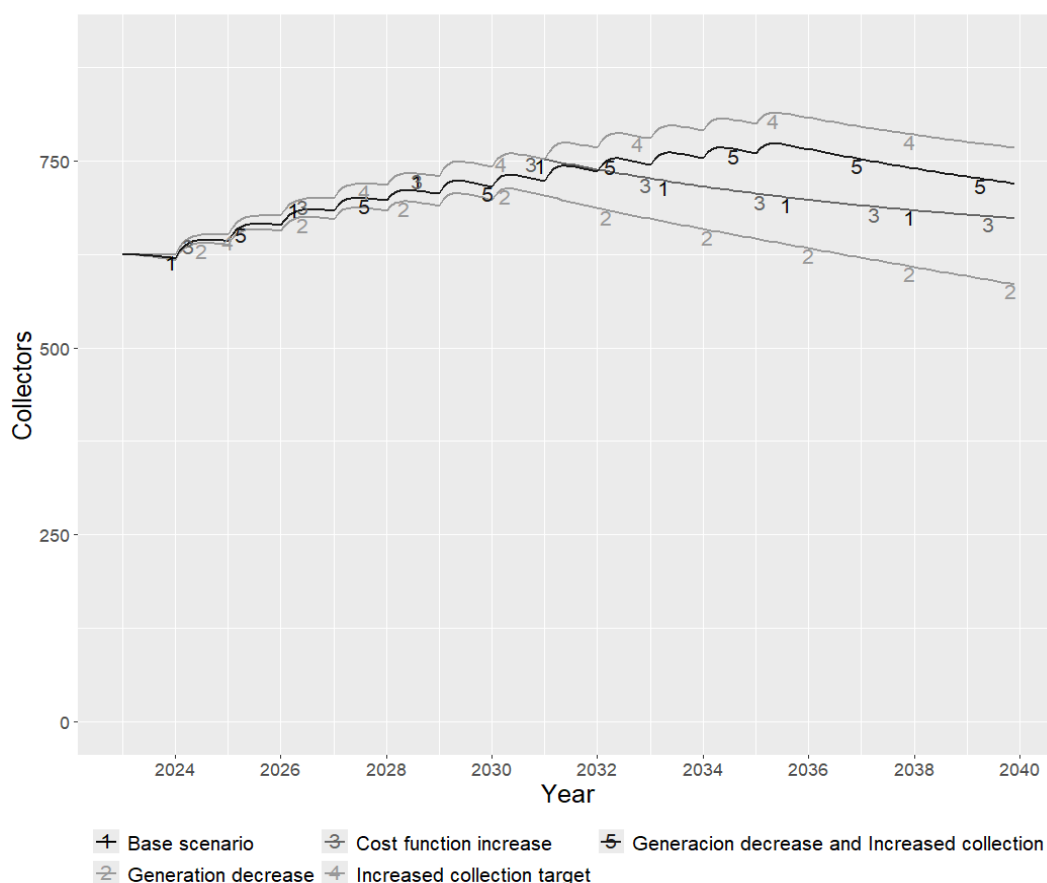


Figura 5. Número de gestores.

S5. Aumento en la meta de recolección y disminución de la demanda (S2 + S4): Este escenario representa el enfoque ideal, ya que integra dos objetivos fundamentales de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP): la reducción en la generación de residuos y el aumento en la recuperación de materiales. El primer objetivo se logra mediante estrategias de prevención como el ecodiseño y la extensión de la vida útil de los productos, mientras que el segundo se enfoca en maximizar la tasa de recuperación (Compagnoni, 2022; Mallick et al., 2024; Massarutto, 2014; OECD, 2016). Ambos objetivos están intrínsecamente interrelacionados. Una disminución en la generación de residuos reduce el volumen total de material que requiere gestión, lo que a su vez puede mejorar la tasa de recuperación, siempre que la cantidad de material recuperado se mantenga constante. Sin embargo, a medida que la generación de residuos disminuye y la disponibilidad de material para recuperar se reduce, los esfuerzos de recolección deben intensificarse, lo cual ejerce mayor presión sobre la tasa de recuperación. En consecuencia, es necesario un aumento gradual pero controlado en las metas de recuperación para garantizar la estabilidad y efectividad del sistema.

Estos enfoques han demostrado resultados positivos en la Unión Europea para diversos tipos de materiales, aunque con diferentes niveles de efectividad. Se ha observado que el aumento en la cantidad de material recuperado ha sido más exitoso (Mallick et al., 2024) en comparación con la reducción del material introducido al mercado mediante estrategias de ecodiseño. Este último requiere políticas de control de diseño más estrictas y la implementación de mecanismos REP más eficaces (Corsini et al., 2017; Mallick et al., 2024).

Número de empresas: En este escenario, el número de empresas comienza a disminuir de forma sostenida después del año 2030. El comportamiento es similar al observado en el escenario S4 (aumento en las metas de recolección), aunque en menor magnitud debido a la reducción en la generación de residuos. Una vez alcanzada la meta del 50% en recolección y transformación, el número de ORPs, gestores y transformadores experimenta una caída pronunciada, debido al estado constante de sobreoferta en el sistema para recolectar y transformar una cantidad decreciente de residuos.

Costo de certificación de las ORPs: El costo de certificación disminuye (Figura 4) a medida que se reduce el costo de transformación (Figura 8), como resultado de la menor demanda de servicios de transformación. El costo de recolección se estabiliza (Figura 6) porque la tasa de salida de gestores compensa la reducción en la demanda de servicios de recolección.

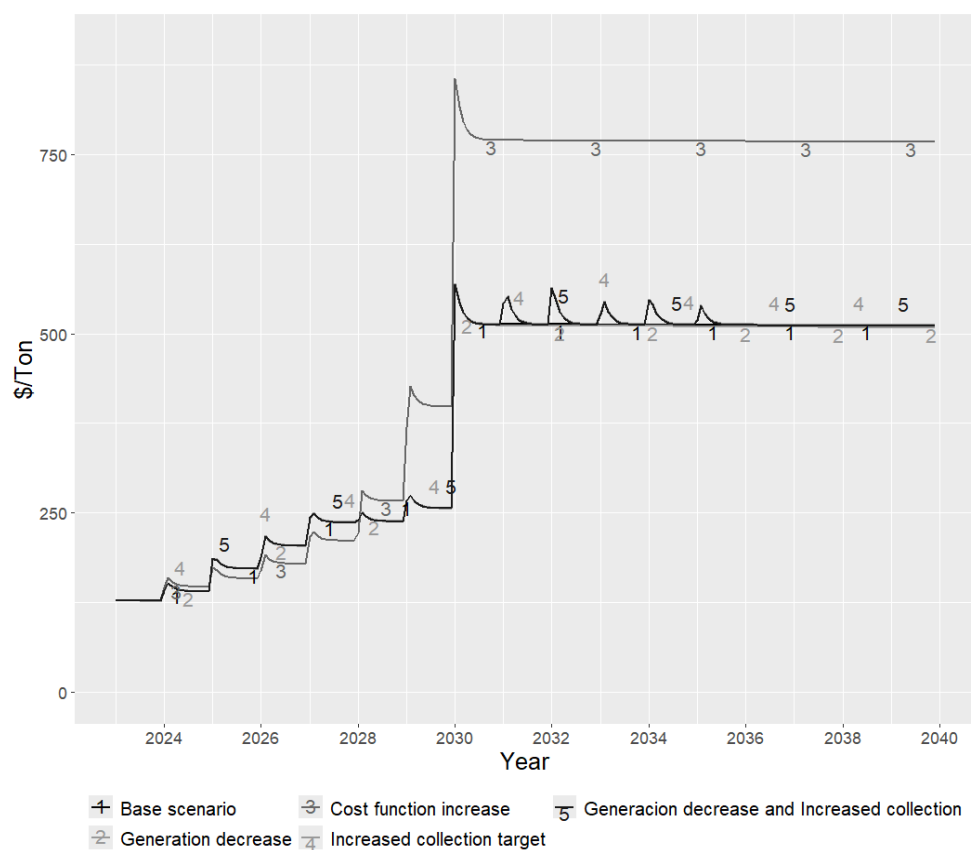


Figura 6. Precio de recolección

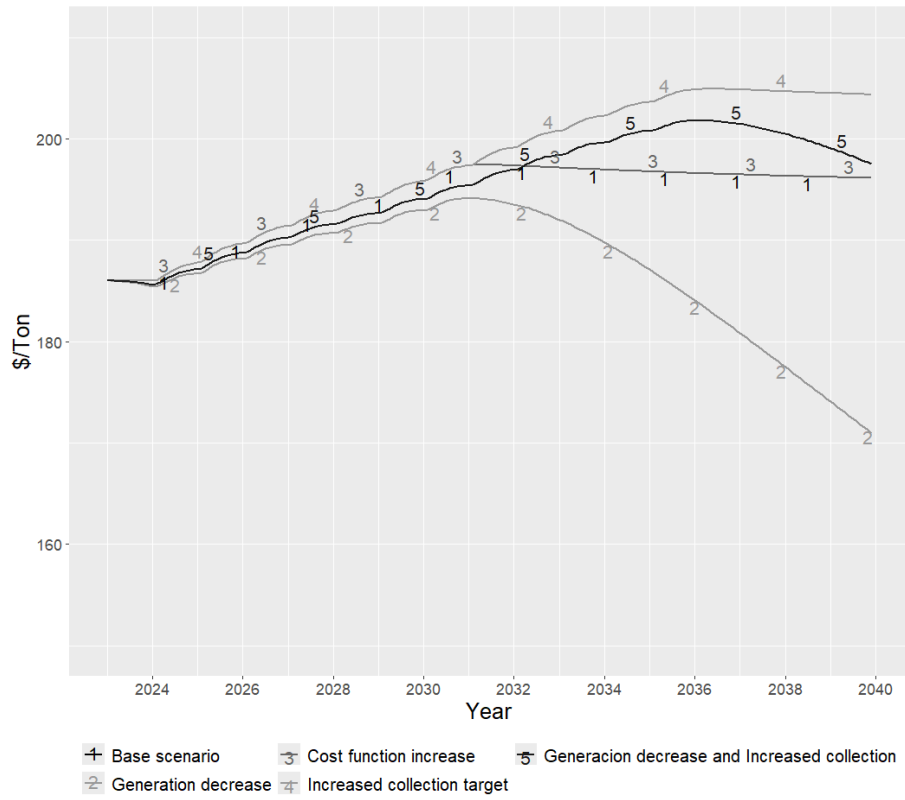


Figura 7. Numero de transformadores

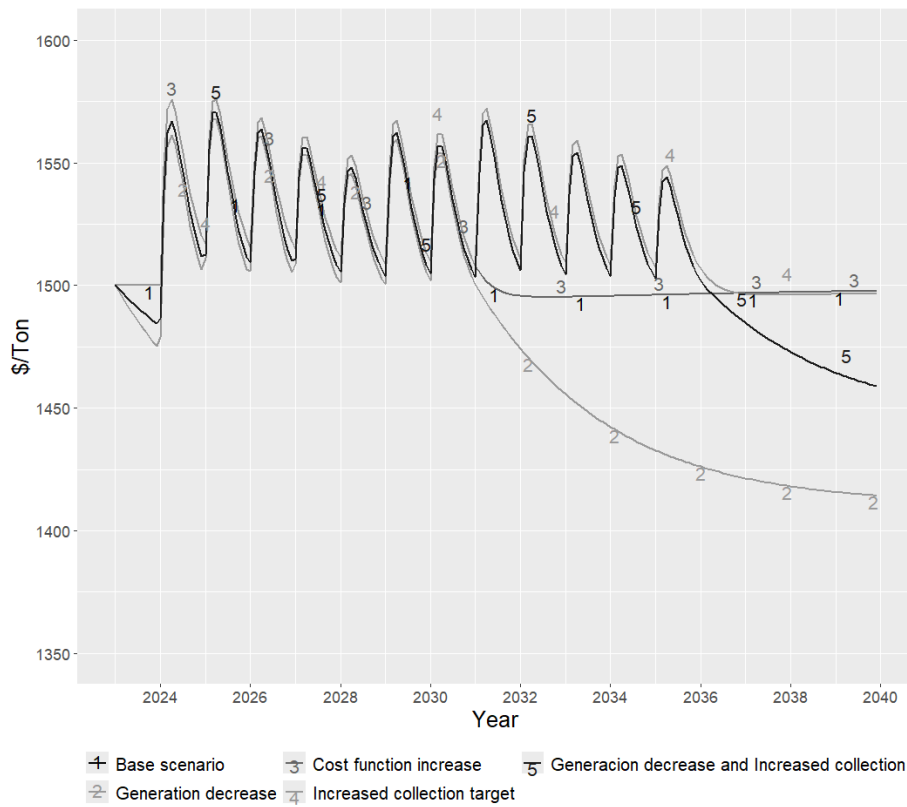


Figura 8. Precio de transformación.

5.2. Statistical Screening (Análisis de parámetros)

El Statistical screening es una técnica utilizada en dinámica de sistemas para identificar los parámetros que más influyen en un modelo. Este método se basa en el análisis del coeficiente de correlación entre los parámetros de entrada y la variable de salida de interés dentro del horizonte temporal de la simulación (Ford & Flynn, 2005). Para cada parámetro o constante, se busca analizar su impacto sobre la variable de respuesta. Con este fin, se definen rangos de incertidumbre que representan los posibles valores que dichos parámetros podrían adoptar en un momento dado, los cuales se presentan en la Tabla 2. La variable de respuesta seleccionada corresponde al número de ORPs, y el propósito final del análisis es identificar cuáles son los parámetros que tienen el mayor impacto sobre dicha variable.

Table 2. Parámetros y rangos de incertidumbre

Escenario base	Unidades	Rangos de incertidumbre
tcPRO = 4	Week	Uniform (4; 26)
tcCC = 108	Week	Uniform (86; 129)
tcT = 156	Week	Uniform (126; 186)
tcTC = 24	Week	Uniform (12; 48)
tcC = 24	Week	Uniform (12; 48)
tcACC = 12	Week	Uniform (6; 24)
eh = 0,3	adimensional	Uniform (0,2; 0,6)
ppc = 1	adimensional	Uniform (0,8; 1,2)
gdr = 1	adimensional	Uniform (0,8; 1,2)
PROCc = 0,7	adimensional	Uniform (0,3; 0,7)

La Figura 9 presenta el resultado del análisis estadístico de cribado, el cual se compone de los gráficos de variación de los coeficientes de correlación con la variable de respuesta, considerando el escenario base (S1). En dicho análisis se omitieron aquellos parámetros cuyo coeficiente de correlación se mantiene constante dentro del rango de -0.5 a 0.5. Los valores de los parámetros cuyo coeficiente de correlación es superior a 0.5 y cercano a 1 tienen un impacto positivo sobre el número de ORPs. Lo contrario ocurre con aquellos cuyos valores se encuentran por debajo de -0.5, acercándose a -1. A continuación, se explican los efectos de los parámetros que tienen el mayor impacto sobre el número de ORPs.

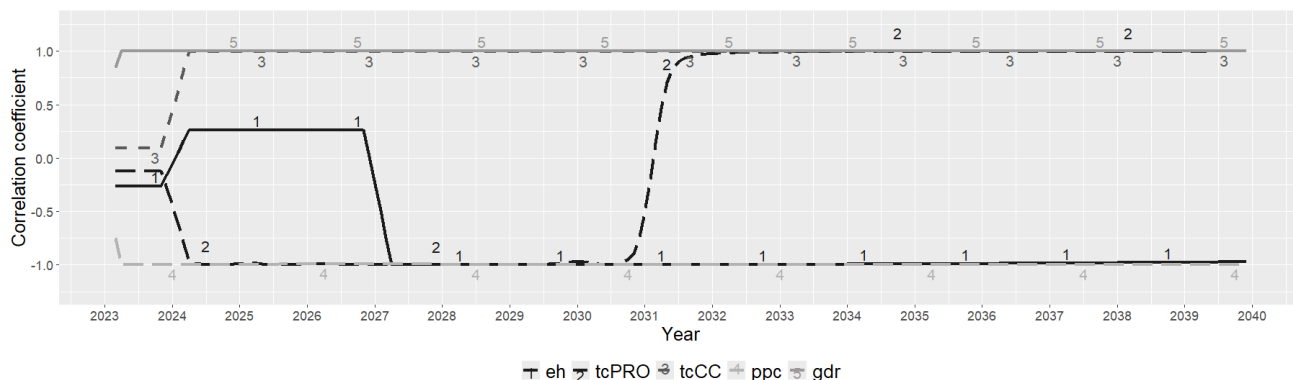


Figura 9. Resultados del Statistical Screening.

Efecto de la cobertura sobre la salida de ORPs (eh): Este parámetro modela el impacto que tiene sobre las ORPs la presión regulatoria para ampliar la cobertura. De acuerdo con el análisis del statistical screening, este parámetro tiene una fuerte influencia sobre el número de ORPs cuando las metas de recolección y transformación alcanzan su valor máximo.

Tiempo de cambio de las ORPs (entrada y salida) barrera de entrada (tcPRO): Este parámetro representa la barrera que enfrenta una ORP para ingresar o salir del mercado. Es un parámetro crítico, ya que determina la facilidad de entrada y salida del sistema y, según el análisis, tiene un impacto significativo sobre el número de ORPs. Inicialmente actúa como barrera de entrada y, una vez alcanzadas las metas máximas de recolección y transformación, como barrera de salida.

Tiempo requerido para cambiar la capacidad de certificación (tcCC): Este parámetro representa el tiempo que tardan las ORPs existentes en aumentar su capacidad de certificación. Un incremento en dicha capacidad se traduce en mayores ganancias para las ORPs, lo que a su vez atrae la entrada de nuevas organizaciones al mercado.

Porcentaje de pago a los gestores (ppc): Este parámetro representa el nivel de integración vertical o colusión existente entre las ORPs y los gestores. Un valor de 1 en este parámetro indica una colusión del 0%, mientras que un valor de 0 indica una colusión del 100%. Si ambas partes están integradas de forma que comparten costos, esto impacta positivamente en el aumento del margen de ganancia y, por ende, en la creación de más ORPs. Un valor bajo de este parámetro afecta negativamente el número de ORPs.

Tasa de generación de residuos (gdr): Este resultado implica que, a mayor demanda de material para ser recuperado, mayor es el incentivo para la creación de nuevas ORPs.

6. DISCUSIÓN

Tal como se plantea en la hipótesis dinámica, la variable endógena asociada a la meta de recolección y transformación tiene un efecto marcado sobre el número de ORPs, gestores, precios de recolección y transformación, así como sobre los costos y la demanda de certificación. En todos los casos, se observan cambios significativos en la tendencia que pueden explicarse por los incrementos en la meta, de acuerdo con la demanda impuesta por la regulación. Este resultado es similar al encontrado por Kuo et al. (2021), quien concluyó que, al establecer tasas de recolección y reciclaje, los picos de reciclaje alcanzados en los sistemas REP se ven modificados. Además, encontraron que la disminución de costos está asociada con una reducción en el número de ORPs que aumentan su capacidad de producción. En el presente trabajo, el incremento en la capacidad de recolección por parte de los gestores para llegar a zonas de

difícil acceso está relacionado con un aumento en los costos. Sin embargo, al tratarse de un mercado competitivo, este es un factor que elimina a los proveedores (ORPs) que no pueden competir en términos de costos, lo cual indicaría indirectamente una situación similar a la descrita por Kuo et al. (2021).

De acuerdo con los análisis realizados a partir del modelo de dinámica de sistemas, el elevado número de ORPs creadas en Colombia en el marco de la política REP para envases y empaques se debe a tres factores fundamentales: En primer lugar, la meta establecida por la regulación no es particularmente ambiciosa en relación con el nivel actual de recuperación de ciertos materiales de envases y empaques, como el cartón y el PET. La meta propuesta inicia en un 10% en 2021 y aumenta gradualmente hasta un 30% en 2030, mientras que en el año en que se introdujo el sistema, las tasas de recuperación de algunos materiales, como ciertos tipos de plásticos, ya rondaban el 30%. Esto genera una percepción de oportunidad de negocio en el mercado, ya que se espera un flujo de recursos por parte de los productores para llevar a cabo las tareas de recolección y transformación de manera integrada. Sin embargo, dichas tareas ya estaban siendo realizadas en gran medida por diferentes actores dentro del sistema. En segundo lugar, no existen barreras fuertes de entrada para la creación de nuevas ORPs. Este hecho ha llevado a que un gran número de gestores constituyan ORPs, integrando a actores que realizan las tareas de transformación. La regulación colombiana actualmente no establece restricciones sobre el porcentaje de integración permitido entre ORPs y gestores. Esta integración vertical permite que los costos de la ORP sean asumidos, en gran medida, por el propio gestor, lo que hace que la actividad de la ORP sea más rentable, ya que recibe del productor un pago adicional por un servicio que puede transferir al gestor. El tercer factor es la alta rentabilidad, ya que las dos condiciones anteriores resultan en márgenes de ganancia elevados que han atraído a más gestores, quienes no enfrentan barreras significativas de entrada. El pago del productor se ha convertido, en cierto sentido, en un subsidio que permite la conformación de un mercado competitivo.

Los resultados obtenidos en la simulación también muestran que, a medida que aumentan las metas de cobertura de recolección y procesamiento de residuos, la rentabilidad disminuye, al igual que el ingreso de nuevas ORPs. De hecho, es posible que el escenario más probable sea una disminución de los planes colectivos en el mediano plazo. Sin embargo, el elevado número de ORPs creadas implica que, aun después de la salida de muchas de ellas, el mercado seguirá siendo competitivo y los precios de los servicios de certificación, recolección y transformación no aumentarán con la salida de ORPs, gestores y transformadores. También es importante destacar que, cuando disminuyen los niveles de generación de residuos de envases y empaques —lo cual podría ser consecuencia de la adopción de prácticas de economía circular y ecodiseño fomentadas por la política REP—, la salida de gestores, transformadores y ORPs del mercado se acelera. Esto se explica principalmente porque la oferta supera a la demanda, lo que reduce los márgenes de ganancia e incrementa la subutilización de la capacidad instalada.

El análisis general indica que, para evitar la concentración del mercado en unas pocas empresas tras el cumplimiento de las metas, deben desarrollarse dos estrategias principales. La primera consiste en mantener el incremento progresivo de las metas de recolección. Al implementar esta política, aumentará la demanda, incentivando la entrada de nuevas empresas al mercado. La segunda estrategia se enfoca en fortalecer las prácticas de ecodiseño para reducir la generación de residuos, lo cual disminuirá la demanda y reducirá los precios. Incluso si el mercado se concentra en pocas empresas, el impacto de precios elevados será menos pronunciado.

En resumen, los escenarios y estrategias planteados sugieren que, si bien la política REP logra mejorar las prácticas del sistema, también puede generar desventajas para los actores de la industria.

7. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

El análisis prospectivo muestra que la evolución del sistema REP puede describirse en dos etapas: antes y después de alcanzar la meta máxima de recolección y certificación. Antes de alcanzar dicha meta, el análisis por simulación ilustra un “boom” en la creación de nuevas ORPs, gestores y transformadores, impulsado por el aumento en la demanda. La magnitud de este auge depende de la meta de recolección y transformación, los incrementos escalonados, y el nivel de integración vertical entre ORPs y gestores, lo cual hace que la actividad sea más rentable. Existen dos mecanismos que frenan este auge: las barreras de entrada a la industria y la salida del mercado de ORPs y gestores que no logran cubrir la recolección regional de residuos. El costo de los servicios de certificación tiende a aumentar en la medida en que las bajas barreras de entrada estimulan la competencia y, en consecuencia, reducen los costos. Después de alcanzada la meta, en todos los escenarios, el mercado tiende a experimentar la salida de empresas y una reducción de los costos desde su punto máximo hasta llegar a un punto de equilibrio. La salida de empresas contribuye a mantener constantes los costos, a medida que el mercado se vuelve más concentrado. La barrera de salida de las empresas es el único mecanismo capaz de ralentizar dicho proceso de salida.

La disminución en el número de empresas tras alcanzar la meta máxima de recolección y transformación se vuelve más aguda si los productores reducen la generación de residuos, lo cual es un resultado esperable, ya que los costos de certificación podrían incentivar la innovación y el rediseño de productos. Una disminución progresiva de los residuos concentrará aún más el mercado, afectando especialmente el número de transformadores. Dado que estos enfrentan mayores barreras de salida, se generaría una sobreoferta de servicios de transformación, lo que empujaría los costos de transformación a la baja. Para mantener la competitividad del mercado, incluso en un escenario de disminución de residuos, las metas de recolección y transformación deben seguir aumentando; de lo contrario, el mercado será dominado por unas pocas empresas, manteniendo los costos estables pero elevados.

El diseño e implementación de políticas como la REP es un proceso complejo que involucra múltiples variables y actores. Las condiciones propias de cada país o región tienen un impacto importante sobre el desempeño de la política. En el caso de la política REP de envases y empaques en Colombia, se hace evidente cómo los parámetros normativos y las condiciones básicas del mercado propician la creación de múltiples organizaciones de productores, algo que no es tan frecuente en los sistemas REP implementados en otros países.

Herramientas analíticas como la dinámica de sistemas resultan útiles para generar información que apoye la toma de decisiones y el diseño de políticas. Estas herramientas permiten modelar las condiciones particulares del contexto, así como simular escenarios sobre el comportamiento futuro del sistema, con el fin de delimitar mejor los elementos clave de la política, como las metas de desempeño, la definición de roles de los actores y las interacciones entre ellos. Existen diversos aspectos en los cuales este tipo de análisis puede ser ampliado mediante el uso de herramientas de apoyo a la decisión. En primer lugar, es importante comprender mejor el impacto que tiene la REP en relación con su propósito de incentivar a los productores a adoptar prácticas de ecodiseño y economía circular, y cómo

estas prácticas impactan a los actores aguas abajo de la cadena, como los gestores y los transformadores. En segundo lugar, resulta de interés evaluar cómo el nivel de adopción de la REP por parte de los productores incide en el desempeño del sistema. Tanto, Peng et al. (2019) and Tu et al. (2020), encuentran que una mayor supervisión por parte del Estado incrementa el cumplimiento regulatorio por parte de los productores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen sinceramente el apoyo del Sistema General de Regalías de Colombia en el marco del proyecto BPIN 2020000100497 “Alianza Circular, Mejoramiento de la gestión de empaques y envases a través de estrategias de economía circular en la industria de Antioquia”. Asimismo, los autores desean agradecer los valiosos aportes de la Dra. Gloria Lucía Ramírez-Córdoba durante la revisión de este artículo. Finalmente, los autores reconocen el uso de ChatGPT, un modelo de lenguaje basado en inteligencia artificial desarrollado por OpenAI, por su asistencia en aspectos de gramática, ortografía y estilo de redacción en la preparación de este manuscrito.

REFERENCIAS

- Acoplásticos. (2022). Crecimiento del reciclaje de residuos plásticos en Colombia 2019-2021. https://www.plas-tic.org/files/informes/encuesta_crecimiento_reciclaje_plasticos-2022.pdf
- Alianza Circular (2023). Empácalo Para Que Vuelva. Retrieved December 12, 2023, from <https://www.alianzacircular.com/productos/publicaciones>
- ANLA. (2020). Plan Gestión Ambiental Residuos Envases y Empaques. https://www.anla.gov.co/01_anla/allcategories-es-es/261-tramites-y-servicios/tramites/permisos-y-autorizaciones/plan-gestion-ambiental-residuos-envaces-y-empaques
- Apriadi, B. F., Setiawan, R. P., & Firmansyah, I. (2024). Policy scenario of plastic waste mitigation in Indonesia using system dynamics. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. <https://doi.org/10.1177/0734242X241231396>
- Castro, C. G., Trevisan, A. H., Pigosso, D. C. A., & Mascarenhas, J. (2022). The rebound effect of circular economy: Definitions, mechanisms and a research agenda. *Journal of Cleaner Production*, 345, 131136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.13113>
- Cempre. (2018). El ABC de la resolución 1407 de 2018. <https://repository.cempre.org.co/bitstreams/74f73707-5215-46fe-aa91-bb3fdddf5f97/download>
- Chaudhary, S., Jain, A. Organizational Sustainability: Extended Producer Responsibility Implementation in India. *JGBC* 18 (Suppl 1), 19–27 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42943-023-00085-z>
- Compagnoni, M. (2022). Is Extended Producer Responsibility living up to expectations? A systematic literature review focusing on electronic waste. *Journal of Cleaner Production*, 367, 133101. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133101>
- Corsini, F., Rizzi, F., & Frey, M. (2017). Extended producer responsibility: The impact of organizational dimensions on WEEE collection from households. *Waste Management*, 59, 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.046>

- Chu, T., Zhong, Y., & Jia, W. (2023). Incorporating self-employed maintainers into WEEE formal recycling system: A system dynamic approach. *Journal of Environmental Management*, 345. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118777>
- Destyanto, A. R., Kirana, P. S., & Ardi, R. (2019). Model conceptualization of system dynamics for evaluating extended producer responsibility strategy in plastic waste management policy in Indonesia. *ACM International Conference Proceeding Series*, 106–109. <https://doi.org/10.1145/3364335.3364344>
- Dey, A., Dhumal, C. V., Sengupta, P., Kumar, A., Pramanik, N. K., & Alam, T. (2021). Challenges and possible solutions to mitigate the problems of single-use plastics used for packaging food items: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 58(9), 3251–3269. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04885-6>
- Ellen MacArthur Foundation. (2020). *What is a circular economy?* | Ellen MacArthur Foundation. Retrieved December 12, 2023, from <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/temas/presentacion-economia-circular/vision-general>
- Favot, M., Grasseti, L., Massarutto, A., & Veit, R. (2022). Regulation and competition in the extended producer responsibility models: Results in the WEEE sector in Europe. *Waste Management*, 145, 60–71.
- Ford, A., & Flynn, H. (2005). Statistical screening of system dynamics models. *System Dynamics Review*, 21(4), 273–303. <https://doi.org/10.1002/SDR.322>
- Ford, A. (2020). System dynamics models of environment, energy, and climate change. *System dynamics: Theory and applications*, 375–399.
- Gallego, C. J., David, J. C., Gomez-Miranda, I. N., & Jaén, S. (2023). Quantitative Analysis of Colombian Waste Picker's Profile. *Sustainability*, 15(12), 9397. <https://doi.org/10.3390/su15129397>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Ghosh, T., Avery, G., Bhatt, A., Uekert, T., Walzberg, J., & Carpenter, A. (2023). Towards a circular economy for PET bottle resin using a system dynamics inspired material flow model. *Journal of Cleaner Production*, 383, 135208.
- He, L., & Sun, B. (2022). Exploring the EPR system for power battery recycling from a supply-side perspective: An evolutionary game analysis. *Waste Management*, 140, 204–212. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.026>
- Johannes, H. P., Kojima, M., Iwasaki, F., & Edita, E. P. (2021). Applying the extended producer responsibility towards plastic waste in Asian developing countries for reducing marine plastic debris. *Waste Management & Research*, 39(5), 690–702. <https://doi.org/10.1177/0734242X211101341>
- Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Kunz, N., Mayers, K., & Van Wassenhove, L. N. (2018). Stakeholder Views on Extended Producer Responsibility and the Circular Economy. *California Management Review*, 60(3), 45–70. <https://doi.org/10.1177/0008125617752694>
- Kuo, T.-C., Hsu, N.-Y., Wattimena, R., Hong, I.-H., Chao, C.-J., & Herlianto, J. (2021). Toward a circular economy: A system dynamic model of recycling framework for aseptic paper packaging

- waste in Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126901>
- Lombardi, M., Rana, R., & Fellner, J. (2021). Material flow analysis and sustainability of the Italian plastic packaging management. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125573.
- Mohamad-Ali, N., Mat Saman, M. Z., & Ghazilla, R. A. R. (2024). A model for end-of-life recovery in the automotive sector in Malaysia. *Sustainable Production and Consumption*, 46, 180–194. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.020>
- Mallick, P. K., Salling, K. B., Pigosso, D. C. A., & McAloone, T. C. (2024). Designing and operationalising extended producer responsibility under the EU Green Deal. *Environmental Challenges*, 16, 100977. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100977>
- Massarutto, A. (2014). The long and winding road to resource efficiency – An interdisciplinary perspective on extended producer responsibility. *Resources, Conservation and Recycling*, 85, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.005>
- OECD. (2001). *Extended Producer Responsibility: A Guidance Manual for Governments*. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264189867-en>
- OECD. (2016). *Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264256385-en>
- Park, J., Díaz-Posada, N., & Mejía-Dugand, S. (2018). Challenges in implementing the extended producer responsibility in an emerging economy: The end-of-life tire management in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 189, 754–762. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.058>
- Peng, B., Wang, Y., Elahi, E., & Wei, G. (2019). Behavioral game and simulation analysis of extended producer responsibility system's implementation under environmental regulations. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(17), 17644–17654. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05215-w>
- Pruess, J. T. (2023). Unraveling the complexity of extended producer responsibility policy mix design, implementation, and transfer dynamics in the European Union. *Journal of Industrial Ecology*, 27(6), 1500–1520. <https://doi.org/10.1111/jiec.13429>
- Ramasubramanian, B., Tan, J., Chellappan, V., & Ramakrishna, S. (2023). Recent Advances in Extended Producer Responsibility Initiatives for Plastic Waste Management in Germany and UK. *Materials Circular Economy*, 5(1), 6.
- Rebs, T., Brandenburg, M., & Seuring, S. (2019). System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1265–1280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.100>
- Rojas, T. (2023). Pacto por los Plásticos en Colombia: acelerando la economía circular del plástico. <https://www.plastico.com/es/noticias/pacto-por-los-plasticos-en-colombia-acelerando-la-economia-circular-del-plastico>
- Salhofer, S., Steuer, B., Ramusch, R., & Beigl, P. (2016). WEEE management in Europe and China—A comparison. *Waste Management*, 57, 27–35.
- Sterman, J. (2010). *Business dynamics*. Irwin/McGraw-Hill c2000.
- Sterman, J. D. (2001). System Dynamics Modeling: Tools for Learning in a Complex World. *California Management Review*, 43(4), 8–25. <https://doi.org/10.2307/41166098>

- Tian, G., Liu, X., Zhang, M., Yang, Y., Zhang, H., Lin, Y., Ma, F., Wang, X., Qu, T., & Li, Z. (2019). Selection of take-back pattern of vehicle reverse logistics in China via Grey-DEMATEL and Fuzzy-VIKOR combined method. *Journal of Cleaner Production*, 220, 1088–1100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.086>
- Tu, Y., Peng, B., Wei, G., & Wu, W. (2020). EPR system participants' behavior: Evolutionary game and strategy simulation. *Journal of Cleaner Production*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122659>
- World Wildlife Fund. (2023). *WWF se une al Pacto por los Plásticos en Colombia* | WWF. Retrieved December 13, 2023, from <https://www.wwf.org.co/en/?381452/WWF-se-une-al-Pacto-por-los-Plasticos-en-Colombia>
- Xu, Z. (2010). System dynamics model of the third party take-back system for e-waste. *2010 7th International Conference on Service Systems and Service Management, Proceedings of ICSSSM' 10*, 332–337. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2010.5530220>
- Zheng, X.-X., Chang, C.-T., Li, D.-F., Liu, Z., & Lev, B. (2022). Designing an incentive scheme for producer responsibility organization of waste tires: A MCGP cooperative game approach. *Computers and Industrial Engineering*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108009>