



Diseño de un modelo de apoyo a la toma de decisiones en el marco del sistema de reembolso de depósito como herramienta de responsabilidad extendida en empaques y envases

Jesús David Galarcio Noguera

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería

Directores

Pablo Andrés Maya Duque, Doctor (PhD) en Investigación de Operaciones

Gloria Lucía Ramírez Córdoba, Doctor (PhD) en Contabilidad y Finanzas

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita

(Galarcio-Noguera, 2022)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Galarcio-Noguera, J. D. (2022). *Diseño de un modelo de apoyo a la toma de decisiones en el marco del sistema de reembolso de depósito como herramienta de responsabilidad extendida en empaques y envases* [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Maestría en Ingeniería, Cohorte XXX.

Grupo de Investigación Analítica e Investigación para la Toma de Decisiones (ALIADO).



Centro de Documentación Ingeniería (CEDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe programa: Sara Cristina Vieira Agudelo

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

A Dios

A mis padres Elver y Ruth

A mis angelitos, que partieron en medio de este proyecto: Olga y Avelina

Agradecimiento especial a:

Pablo Andrés Maya Duque y Gloria Lucía Ramírez Córdoba

Directores de esta investigación

Por creer en mí, comprenderme y orientarme más allá de lo académico

Agradecimientos:

A mi familia, por su apoyo incondicional y su comprensión durante toda la vida y, especialmente, durante el desarrollo de esta investigación

A mi esposa, por su comprensión y sus palabras que me alentaron a no rendirme hasta cumplir mis objetivos

A los profesores del Grupo ALIADO, Sebastián Jaén, Carmen Patiño, Olga Úsuga, Juan G Villegas, por su calidez humana y acompañamiento que trasciende las aulas

A mis compañeros de programa, Cata, Ronald, Aleja, Brigitte, Lucas, Leo, por ser siempre mucho más que compañeros

A Dios, que me dio las fuerzas para continuar pese a la adversidad

Resumen

La producción de residuos de envases y empaques se ha convertido en una problemática global. En este sentido, las empresas se han visto obligadas a asumir el reto de tomar decisiones estratégicas para el cumplimiento de sus requerimientos de responsabilidad extendida del productor (REP) en empaques y envases. Existen diversos estudios relacionados, sin embargo, las condiciones estudiadas son particulares y se asocian a las políticas de REP de cada país. La presente investigación se centra en el diseño de un modelo orientado a pequeñas y medianas empresas (pymes) en Colombia, que permite evaluar distintas variables en los sistemas de reembolso de depósito desde el punto de vista económico y ambiental, para hacer frente a los requerimientos de REP. Para su construcción, se asume que las pymes están asociadas en una organización de responsabilidad del productor (ORP), teniendo como referencia la herramienta de reembolso de depósito para la gestión de envases de vidrio del sector de bebidas. El modelo propuesto fue validado utilizando un caso de estudio de envases no retornables en la zona “MEDIO SINÚ” del departamento de Córdoba, Colombia. Como resultado, se obtiene un modelo simplificado para el sistema de reembolso de depósito, que, además, permite incluir a los recicladores de oficio como entes activos del mismo. Este estudio pone en relieve el valor del material en el mercado como parámetro que condiciona el valor del depósito, encontrando que un resultado óptimo en términos económicos y ambientales se logra fijando el valor del depósito por debajo de un porcentaje del valor del material en el mercado que se encuentra entre 80% y 120%. Finalmente, los resultados de este estudio permiten concluir que la estrategia del Gobierno de Colombia de imponer una meta de aprovechamiento para el vidrio mediante la Resolución 1407 de 2018 es acertada.

Palabras clave: Economía circular, responsabilidad extendida del productor, envases y empaques, reembolso de depósito, vidrio

Tabla de Contenido

Capítulo 1	6
1.1 Economía lineal: ineficiencia y generación de residuos	7
1.2 Economía circular: una alternativa sostenible	8
1.3 Responsabilidad extendida del productor	9
1.3.1 Marco normativo: REP en Colombia	12
1.3.2 Resolución 1407: Requerimientos de REP en envases y empaques	15
1.4 Logística y gestión de la cadena de suministros	17
1.5 Problemática en contexto	20
Capítulo 2	22
2.1 Antecedes sobre REP en envases y empaques	23
2.2 Aspectos logísticos de la gestión de envases y empaques	26
2.3 Herramientas de REP: Reembolso de depósito	28
2.4 Estudio de métodos de modelación	30
Capítulo 3	32
3.1 Consideraciones para la construcción del modelo	33
3.2 Modelo de optimización	38
Capítulo 4	46
4.1 Caso de estudio: Envases no retornables en la zona MEDIO SINÚ	47
4.2 Validación del modelo	59
4.3 Diseño de experimentos	63
4.3.1 Experimento 1: Análisis de utilidad y capacidad instalada	63
4.3.2 Experimento 2: Evolución del escenario base 2021-2030	64
4.4 Análisis de resultados	66
4.4.1 Experimento 1: Análisis de utilidad y capacidad instalada	66
4.4.2 Experimento 2: Evolución del escenario base 2021-2030	76
Capítulo 5	82
Referencias	89

Lista de tablas

Tabla 1. Descripción preliminar de los nodos del modelo.....	35
Tabla 2. Descripción de los conjuntos del modelo de optimización.....	38
Tabla 3. Descripción de los parámetros del modelo de optimización.....	38
Tabla 4. Descripción de las variables del modelo de optimización.....	39
Tabla 5. Centroides de las zonas de influencia de la ORP.....	48
Tabla 6. Puntos de sitios potenciales para la ubicación de acopios.....	49
Tabla 7. Puntos de sitios potenciales para la ubicación de transformadores.....	49
Tabla 8. Estimación de la capacidad de una instalación de tamaño m	50
Tabla 9. Resultados del censo para estimar el peso de envases puestos en el mercado por los productores de la ORP.....	53
Tabla 10. Estimación del peso total de envases puestos en el mercado por los productores de la ORP a partir del censo realizado y de los datos obtenidos de la literatura.....	53
Tabla 11. Estimación del peso máximo recuperable por zona.....	54
Tabla 12. Costo de transporte de residuos de envases y empaques desde el Acopio j hasta el Transformador k	57
Tabla 13. Parámetros binarios que establecen la pertenencia de las instalaciones.....	57
Tabla 14. Criterios de validación para el modelo propuesto.....	59
Tabla 15. Resumen de resultados de la solución del caso de estudio.....	61
Tabla 16. Resumen de factores y niveles para el experimento.....	63
Tabla 17. Resumen de factores y niveles para el experimento.....	65
Tabla 18. Conclusiones para el modelo principal.....	71
Tabla 19. Conclusiones para el modelo alternativo.....	73
Tabla 20. Resumen de resultados para el experimento usando el escenario base – modelo principal	76
Tabla 21. Resumen de resultados para el experimento modificando «vd» – modelo principal.....	78

Lista de figuras

Figura 1. Instrumentos de política de REP en el ciclo de vida del producto	12
Figura 2. Marco normativo asociado a responsabilidad extendida del productor en Colombia	14
Figura 3. Diagrama de flujo de materiales y residuos sólidos contenidos por la resolución de envases y empaques	16
Figura 4. Disposición general de una cadena de suministros inversa que incluye residuos	19
Figura 5. Progreso de estudios en empaques sostenibles para la gestión de la cadena de suministros a lo largo del mundo	27
Figura 6. Etapas de estudio de la cadena de suministros con enfoque en recuperación y logística aguas abajo	27
Figura 7. Mecanismo de operación de un sistema de reembolso de depósito	29
Figura 8. Estudio de métodos de modelación	30
Figura 9. Descripción de nodos según la etapa en la que se encuentran	36
Figura 10. Sistema de reembolso de depósito propuesto para el esquema de REP de envases en Colombia y simplificación para efectos de modelación.....	37
Figura 11. Localización de la subregión MEDIO SINÚ como zona de influencia de la ORP	48
Figura 12. Localización de centroides de las zonas de influencia de la ORP y de los acopios existentes y potenciales para la subregión MEDIO SINÚ.....	50
Figura 13. Localización de ubicaciones potenciales para la ubicación de transformadores en la subregión MEDIO SINÚ	51
Figura 14. Cantidad de cajas en una tonelada para el cálculo del costo de transporte de residuos de envases.....	56
Figura 15. Solución del modelo para el caso de estudio planteado	60
Figura 16. Metas de aprovechamiento entre el 2021 y el 2030	64
Figura 17. Descripción gráfica de la utilidad	67
Figura 18. Experimentos para el análisis de la utilidad - modelo principal.....	68
Figura 19. Experimentos para el análisis de la capacidad instalada - modelo principal	70
Figura 20. Experimentos para el análisis de la utilidad - modelo alternativo	72
Figura 21. Experimentos para el análisis de la capacidad instalada - modelo alternativo.....	73
Figura 22. Experimentos para el análisis de factibilidad para la instancia - modelo principal.....	79
Figura 23. Resumen del experimento - modelo principal	80
Figura 24. Resumen del experimento - modelo alternativo.....	81

Capítulo 1

Diagnóstico y contextualización del problema

1.1 Economía lineal: ineficiencia y generación de residuos

Según datos del Banco Mundial, la población global creció en más de 700 millones en la última década (The World Bank, 2019). Por su parte, se espera que la generación anual de residuos globales pase de 2,01 mil millones de toneladas en 2016 a 3,40 mil millones en 2050 (Kaza et al., 2018). En Colombia, se generaron cerca de 11,5 millones de toneladas de residuos sólidos en 2019, con un incremento del 11,7% con respecto a 2017; lo anterior contrasta con las cifras de residuos sólidos aprovechados en el mismo periodo, las cuales no superaron el valor de 1,40 millones de toneladas (Superservicios, 2018a, 2018b, 2019a, 2020). Lo anterior, sumado a la poca capacidad remanente de los sitios de disposición final (DNP, 2016), ha contribuido a la construcción de un panorama desfavorable para la sociedad en términos de sostenibilidad.

Es importante señalar que la forma tradicional de entender la fabricación, uso y disposición de los productos es una parte fundamental del problema. Lo anterior se resume en un modelo económico conocido como economía lineal, que consiste en la transformación de materia prima a través de procesos que agregan valor a los productos; luego de la venta, la propiedad y la responsabilidad por el desperdicio pasan a ser del consumidor; este último decide si reutilizar, reciclar, o desechar el producto cuando su vida útil ha terminado (Stahel, 2016). En principio, ha sido un elemento clave para el desarrollo industrial y ha generado un crecimiento económico sin precedentes (Macarthur, 2013), sin embargo, con la premisa de “tomar, hacer y desechar”, la economía lineal ha dejado ver problemas de eficiencia en el uso de recursos (Ameli et al., 2019). En términos generales, este modelo presenta dificultades asociadas a la escasez de las materias primas que se utilizan en la producción y al incremento en la demanda de suelos necesarios para ubicar sitios de disposición final (DNP, 2016).

En este sentido, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha definido la producción y el consumo responsable como uno de los objetivos de desarrollo sostenible (Naciones-Unidas, 2015), promoviendo el diseño y desarrollo de procesos, productos y servicios eficientes en términos de reducción de residuos y minimización de impactos ambientales negativos (Ameli et al., 2019).

1.2 Economía circular: una alternativa sostenible

La economía circular (EC) es considerada una solución en potencia, que busca proteger el medio ambiente sin convertirse en un obstáculo para el crecimiento económico (Lieder & Rashid, 2016; Stahel, 2016). Esta alternativa está fundamentada en tres principios: (1) preservación y mejora del capital natural a partir del control de reservas finitas y el equilibrio en el flujo de recursos renovables; (2) optimización en el uso de recursos para la recirculación y contribución económica de los productos, componentes y materiales; y (3) enfoque en la eficacia del sistema desde el diseño en aras de detectar y eliminar factores externos negativos (Macarthur, 2013).

Recientemente, se ha intensificado la conceptualización de la economía circular (Babbitt et al., 2018; Bocken et al., 2017), y aunque muchos académicos han propuesto distintas definiciones (Blomsma & Brennan, 2017; Geissdoerfer et al., 2017; Homrich et al., 2018; Kalmykova et al., 2018; Kirchherr et al., 2017; Korhonen et al., 2018; Standard, 2017), aun no existe un consenso al respecto (Niero & Kalbar, 2019). Una definición ampliamente aceptada es la de Macarthur (2013): *“la economía circular es, a propósito, restaurativa y regenerativa, y busca mantener el valor de los productos, materiales y componentes en todo momento para el cumplimiento de su objetivo intrínseco de desasociar el crecimiento económico de la explotación y consumo de recursos finitos”*.

Según Albaladejo et al. (2021), la implementación de EC combate directamente el cambio climático y previene el desperdicio. Actualmente, existen estimaciones que dan cuenta del enorme potencial de la economía circular, entre ellas: sólo modificando la forma de producción y uso del acero, el cemento, el aluminio y el plástico, se podrían reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 40% para 2050 (Foundation, 2019); si se reduce la producción y el consumo de plástico, es posible prevenir un tercio del total global de residuos de plásticos generados para 2040 (Trusts & others, 2020); a partir de la adopción del enfoque de EC, se estima la creación de 4,8 millones de empleos sólo en Latinoamérica y el Caribe (CEPAL & others, 2018).

Finalmente, la EC *“se ha convertido en un paradigma que busca el desarrollo sostenible, proponiendo diferentes estrategias en toda la cadena de producción y uso de productos y servicios”* (Prieto Sandoval et al., 2017). Algunas de las estrategias más importantes son: (1) el diseño cuna a cuna o “Cradle to Cradle”, que promueve el desarrollo de productos que puedan ser recuperados mediante ciclos técnicos o biológicos (Peterson, 2004; Prieto-Sandoval et al., 2016); (2) la biomímesis, que se basa en estudiar e imitar procesos de la naturaleza para dar soluciones

innovadoras a situaciones técnicas (Prieto Sandoval et al., 2017); (3) el producto como servicio, que implica que las compañías puedan ofrecer productos y servicios físicos para mantener el uso de los productos mediante el diseño, uso, mantenimiento, remanufactura y reciclaje, convirtiendo al consumidor en un usuario del producto (Lacy & Rutqvist, 2015); y (4) la responsabilidad extendida del productor (REP), que hace referencia a la responsabilidad que tienen las empresas sobre los impactos ambientales generados por sus productos durante todo su ciclo de vida (Nnorom & Osibanjo, 2008). Cabe resaltar que la REP es objeto de estudio en este trabajo.

1.3 Responsabilidad extendida del productor

Según Lindhqvist (2000), la REP se define como un principio de política que promueve mejoras ambientales en todo el ciclo de vida de los sistemas productivos mediante la extensión de las responsabilidades del fabricante a varias etapas de ciclo de vida del producto, en especial, a la recogida, al reciclaje y a la disposición final. Esta estrategia es implementada con el fin de promover mejoras ambientales en ciclos de vida complejos de sistemas productivos a través de instrumentos políticos, administrativos, económicos e informativos (Lindhqvist, 2000). De esta forma, la REP se convierte en una pieza fundamental para la minimización de los residuos generados por las empresas (Bourguignon, 2016).

La responsabilidad extendida puede entenderse de forma individual o colectiva. Bajo la responsabilidad individual del productor (RIP), cada productor asume de forma independiente los costos asociados al tratamiento de sus productos de marca propia al final de su vida útil, mientras que en responsabilidad colectiva del productor (RCP), los costos de administrar los productos al final de su vida útil son compartidos de manera cooperativa (Massarutto, 2014).

Con relación a RCP, Tian et al. (2019) resalta la importancia de definir una estrategia adecuada para la recolección y se sugiere el uso de una estructura de responsabilidad conjunta entre empresas con productos similares. Esta estructura permite establecer redes de colaboración que van desde la participación en el proyecto, hasta la combinación de recursos humanos, materiales y financieros de sus integrantes (Spicer & Johnson, 2004; Tian et al., 2017). Es menester mencionar que, en RCP, no existen incentivos suficientes para que los productores, de forma individual, se esfuercen por invertir en el diseño de productos más sostenibles y fáciles de reciclar, ya que los demás productores podrían beneficiarse de las mejoras realizadas por este

en la etapa final de los productos sin tener que compartir la inversión requerida (Lindhqvist & Lifset, 2003). Además, si todos los productores en RCP pagan la misma tarifa de reciclaje en función de su participación en el mercado, no hay incentivo para diseñar productos con mejores características de reciclaje (Nnorom & Osibanjo, 2008), lo cual pone a la RIP en ventaja si se trata de integrar la toma de decisiones con la gestión de los productos al final de su vida útil (Ameli et al., 2019). Finalmente, tanto para RIP como para RCP, se debe tener en cuenta la presencia de incertidumbre sobre lo que ocurrirá con los productos en su etapa final o etapa End-of-Life (EoL), por lo cual, el estado de los productos en su etapa EoL dependerá de factores como el comportamiento de consumo de los clientes y su decisión de devolver o no el producto a las instalaciones de EoL (Ameli et al., 2019).

Para su implementación, los sistemas de REP usualmente incluyen la participación de organizaciones creadas con el fin de hacer frente a los requerimientos normativos de REP de colectivos de empresas. A este tipo de organismos se les denomina *Organizaciones para la responsabilidad extendida del productor (ORP)*, y sus actividades pueden incluir: coordinación del sistema, rendición de cuentas a las autoridades, gestión de campañas informativas, administración de sistemas de pago por adelantado para la disposición final de productos y desarrollo de contactos empresariales para recolección, transporte, tratamiento y reciclaje. Más aún, en los sistemas de RCP, *“las ORP pueden asumir total responsabilidad por la contratación de empresas externas y actuar como entidades financieras, utilizando las tarifas que pagan los productores y los ingresos procedentes de las ventas de productos y del material para reciclaje como ingreso”* (Lindhqvist et al., 2008). En efecto, las actividades asociadas a una ORP están ligadas a las herramientas de REP que se apliquen al interior de esta.

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico - OCDE (2016), los esquemas de REP cuentan con una serie de instrumentos para su implementación que pueden resumirse en cuatro grandes categorías, no necesariamente excluyentes:

- Requerimientos de devolución (*product take-back requirements*): enmarcan la asignación de responsabilidades a los productores y la imposición de metas de recolección de productos o materiales.
- Regulaciones y estándares de rendimiento (*regulations and performance standards*): se refieren a la definición de estándares en diferentes etapas de la cadena con el fin de

minimizar la cantidad de materia prima virgen utilizada y/o aumentar el aprovechamiento. Su aplicación puede ser opcional u obligatoria. (i.e. contenido mínimo reciclado o aprovechado).

- Instrumentos basados en información (*information-based instruments*): buscan dar soporte de forma indirecta a los esquemas de REP mediante la sensibilización de la población para aumentar la conciencia pública (i.e. etiquetado de productos y componentes, e información a los consumidores sobre separación de residuos).
- Instrumentos económicos basados en el mercado (*economic and market-based instruments*): se enfocan en la provisión de incentivos económicos para las políticas de REP. En contraste con los demás instrumentos de REP, los económicos basados en el mercado tienen cuatro aplicaciones bien definidas: (1) impuestos al material (*material taxes*); (2) tarifas anticipadas por disposición (*Advanced disposal fees - ADF*); (3) combinación de impuesto y subsidio de cara al productor (*Upstream combination tax/subsidy - UCTS*); y (4) reembolso de depósito (*Deposit-refund*).

Las etapas del ciclo de vida de los productos que se ven afectadas por la política de REP dependerán en gran medida de la combinación de instrumentos adoptados en dicha política (figura 1). En cuanto a frecuencia de uso, se destacan los requerimientos de devolución (70,0%) y dos tipos de instrumentos económicos basados en el mercado: *ADF* (17,0%) y reembolso de depósito (11,0%).

En general, cada gobierno, empresa u ORP, está en la tarea de adoptar un instrumento o una combinación de ellos según su rol dentro de la REP. Desde la óptica gubernamental, se deberá afrontar la planificación de políticas de REP efectivas para cada sector o segmento de productos. Por su parte, las empresas deberán asumir su rol frente a la política planteada: la REP no sólo implica una decisión de asociación o trabajo individual, sino que pone a las organizaciones de cara al estudio de alternativas que les permitan satisfacer las metas normativas propuestas por su gobierno e impactar de forma positiva en su imagen corporativa y en el medio ambiente.

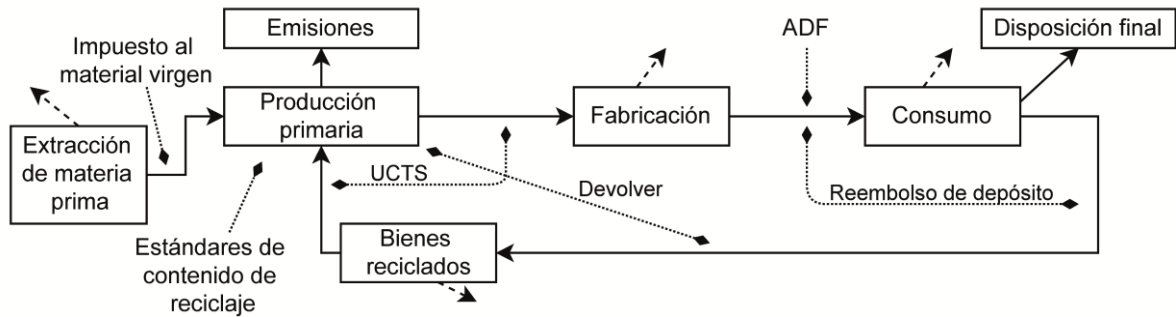


Figura 1. Instrumentos de política de REP en el ciclo de vida del producto. Adaptado de "Extended producer responsibility: Updated guidance for efficient waste management" (p. 17), por OECD, 2016, OECD Publishing.

1.3.1 Marco normativo: REP en Colombia

El Gobierno de Colombia ha mostrado interés por la preservación de los recursos naturales renovables, considerándolos como de utilidad pública e interés social (Decreto 2811, 1974). Lo anterior, ha impulsado aspectos como la reglamentación del servicio público de aseo dentro del marco de gestión integral de residuos sólidos (Decreto 1140, 2003; Decreto 1505, 2003; Decreto 1713, 2002; Decreto 838, 2005), la prevención en la generación y la regulación en el manejo de residuos o desechos peligrosos (Decreto 4741, 2005). También, se ha venido formalizando un mecanismo de penalización mediante comparendos ambientales ante conductas inadecuadas frente al manejo de residuos sólidos y escombros (Ley 1259, 2008) y se ha definido un procedimiento sancionatorio ambiental (Ley 1333, 2009).

Desde el enfoque de responsabilidad extendida, se han tratado temas como la gestión de devolución de productos posconsumo de fármacos y medicamentos vencidos (Resolución 371, 2009), y de baterías usadas de plomo ácido (Resolución 372, 2009). Además, se ha elaborado un documento que integra la política de producción más limpia y el plan de mercados verdes en aras de reorientar esfuerzos empresariales hacia la producción y consumo sostenibles (MAVDT, 2010).

A partir del año 2010, las normas relacionadas con REP en Colombia han venido en aumento. Son prueba de esto, el establecimiento de sistemas de recolección selectiva y la gestión ambiental de residuos de elementos como computadores y/o periféricos (Resolución 1512, 2010), pilas y/o acumuladores (Resolución 1297, 2010), llantas usadas (Resolución 1326, 2017; Resolución 1457, 2010), bombillas (Resolución 1511, 2010), y plaguicidas (Resolución 1675, 2013). Uno de los

sectores que ha tomado gran relevancia en Colombia es el de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), para el cual se han creado lineamientos que posibiliten la adopción de una política pública de gestión integral (Ley 1672, 2013). De acuerdo con la evaluación del desempeño ambiental de Colombia realizada por la OCDE en 2014, se advierte que, aunque el marco regulatorio en Colombia es adecuado, aún presenta muchas deficiencias, entre ellas: (i) falta de coherencia entre los planes de acción que se desarrollan de forma paralela en las esferas nacional, regional y municipal; (ii) datos poco fiables sobre residuos sólidos municipales, lo que dificulta la evaluación de iniciativas y el diseño de políticas de base empírica; e (iii) incentivos perversos creados por las políticas vigentes a 2014 para que los residuos se dirijan a los rellenos sanitarios, manifestando la necesidad de crear instrumentos para aumentar la tasa de reciclaje y reducir la generación de desechos (OECD/ECLAC, 2014). Por último, es importante resaltar los esfuerzos del Gobierno de Colombia en pro de la racionalización y el ordenamiento jurídico, el cual se ve reflejado en la integración de la normatividad relacionada con ambiente y desarrollo sostenible en un decreto único reglamentario (Decreto 1076, 2015).

Otro documento importante es el presentado por el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) en el año 2016: la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos. En esta política, se manifiesta de forma explícita la voluntad del gobierno de avanzar, desde el sector de residuos sólidos, hacia una economía circular (DNP, 2016). A grandes rasgos, el documento pone en relieve los retos que enfrenta el servicio público de aseo en Colombia, entre ellos: generar un aumento en la transformación formal de los residuos sólidos para el mejoramiento de su desempeño ambiental, aliviar la presión soportada por los rellenos sanitarios existentes, fomentar la adecuada separación en la fuente y realizar una correcta articulación con sectores estratégicos para aumentar el tiempo de permanencia de los productos en el ciclo económico (DNP, 2016).

Con relación a envases y empaques, y la REP, existen antecedentes como la definición de instrumentos vinculantes en materia de residuos sólidos para la entrada de Colombia a la OCDE, entre ellos: la reutilización y aprovechamiento de envases de bebidas, y el incremento en la recuperación de residuos de papel (DNP, 2016; OECD/ECLAC, 2014). Aunado a lo anterior, está la ejecución de un proyecto de análisis de impacto normativo en el que se contempla la formulación de una normativa REP como alternativa de solución al problema de gestión de envases y empaques (MADS, 2015). Adicionalmente, el Departamento Nacional de Planeación (DNP)

recomendó desarrollar estudios y ajustes normativos en la REP en envases y empaques (DNP, 2016), a lo cual el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) responde en 2018 con la publicación de una resolución para la gestión ambiental de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio y metal, actualizada en 2020 (Resolución 1342, 2020; Resolución 1407, 2018). En la figura 2 se resumen las leyes, decretos y otros documentos relacionados.

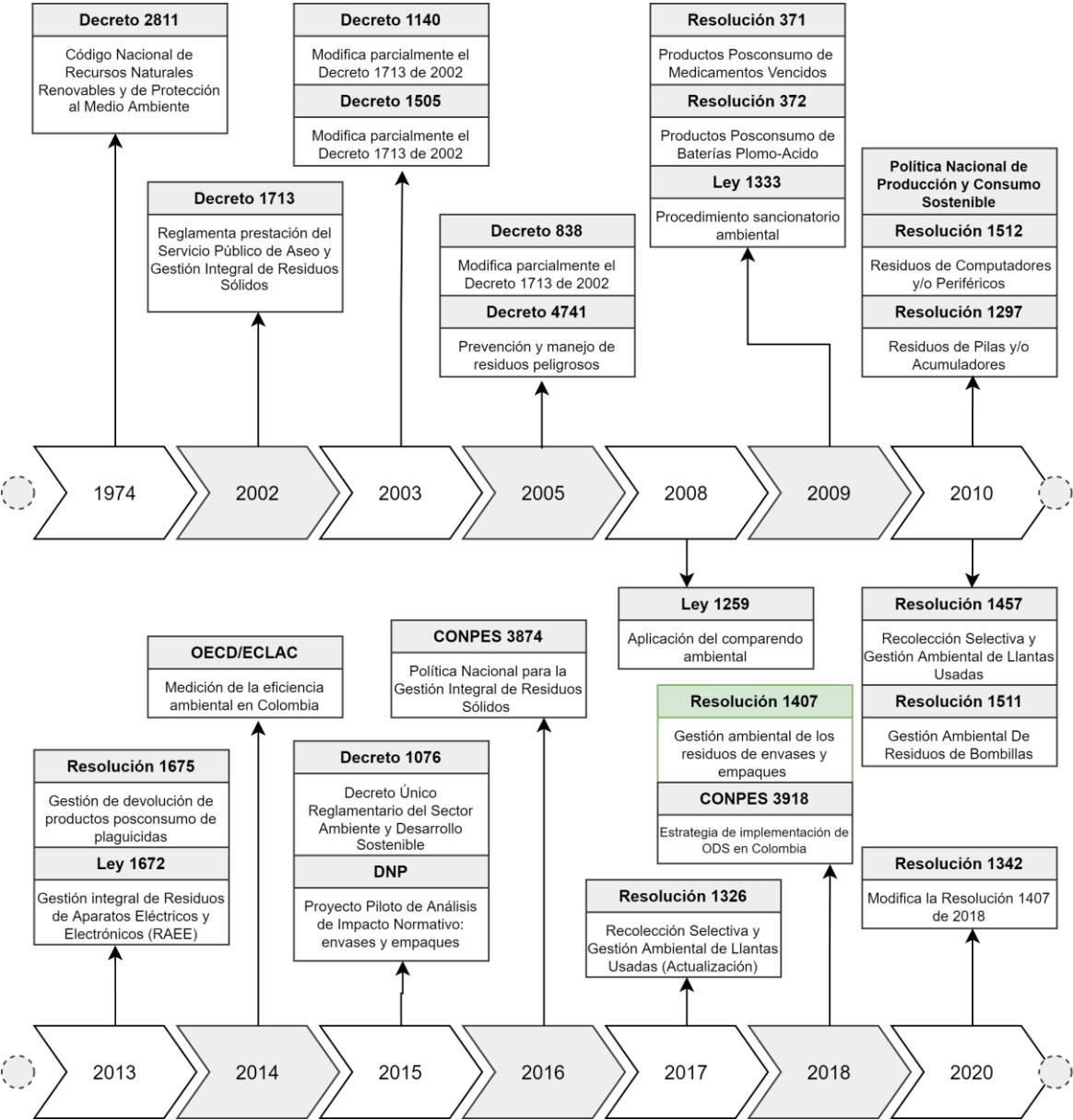


Figura 2. Marco normativo asociado a responsabilidad extendida del productor en Colombia. Elaboración propia.

A nivel macro, los retos a los que se enfrenta Colombia no sólo enmarcan la dimensión ambiental, sino también los ámbitos económico y social, en este sentido, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) proponen metas concretas que el gobierno ha asumido, al punto de desarrollar una estrategia para su implementación (DNP, 2018a). En general, existen aún grandes retos por asumir, sin embargo, el gobierno ha sentado algunas bases legislativas para favorecer la transición de las empresas hacia una economía circular y fomentar el diseño de ciclos cerrados de flujo de materiales. Esto representa una oportunidad histórica para atacar la problemática de residuos de envases y empaques de consumo masivo, en la que el gobierno, el sector productivo y la academia, deben asumir sus roles en la sociedad y aunar esfuerzos para seguir fomentando, diseñando e implementando soluciones cada vez más efectivas.

1.3.2 Resolución 1407: Requerimientos de REP en envases y empaques

La Resolución 1407 de 2018 supone grandes retos para las empresas del país, específicamente, para aquellas que estén enmarcadas en la definición de productor propuesta por la misma: *“persona natural o jurídica, que independiente de la técnica de venta usada, (1) fabrica, ensambla o manufactura bienes de su propia marca para ser comercializados en el territorio nacional, con destino al consumidor final y contenidos en envases y empaques; (2) importa bienes al mercado nacional, con destino al consumidor final y contenidos en envases y empaques; (3) pone en el mercado como titular de la marca exhibida en los envases y empaques de diferentes productos, (4) pone en el mercado envases y empaques diseñados para ser usados una sola vez”*. En este sentido, los productores deberán diseñar, implementar y mantener actualizado un “Plan de Gestión Ambiental de Residuos de Empaques y Envases”, el cual implica fomentar el aprovechamiento a través del reciclaje, valorización energética y/o el coprocesamiento de residuos de envases y empaques de venta primarios, secundarios o de único uso. Cabe resaltar que, con la actualización de esta norma a través de la Resolución 1342 (2020), se excluye la reutilización del concepto de aprovechamiento.

Según la Resolución 1407 (2018), existen actores que deben apoyar al productor para llevar a cabo el plan formulado. Los actores iniciales en el esquema de aprovechamiento son: el fabricante/importador; el productor/importador; el comercializador/distribuidor; y el consumidor. A partir de este punto, existen actores potenciales que pueden estar dentro o fuera del servicio público de aseo. Para el primer caso, el cargo por la gestión de los residuos de empaques y envases corre por cuenta de los consumidores y se cobra dentro del servicio público

de aseo (Resolución CRA 720, 2015), sus actores son los prestadores de servicios de la actividad de aprovechamiento¹, y pueden ser: las organizaciones de recicladores en proceso de formalización; las empresas de servicio público de aseo; los prestadores marginales; y los propios municipios. En segunda instancia, se tienen actores potenciales que están fuera del servicio público de aseo, entre los que se incluyen los gestores independientes (i.e., las ORPs) y los recicladores informales. A continuación, aparece un actor obligatorio para el funcionamiento del esquema, ya que es quien recibe los residuos aprovechables recolectados en la etapa anterior: un acopio o conjunto de acopios que pueden ser públicos (i.e., Estaciones de Clasificación y Aprovechamiento - ECAs) o privados (i.e., Bodegas Especializadas – Be). Por último, es necesaria la participación de un transformador (i.e., ECAs transformadoras, Bodegas especializadas transformadoras, y Plantas de reciclaje) para garantizar el cierre del ciclo y la reincorporación del material al proceso productivo. Este proceso puede observarse en la figura 3.

Así pues, bajo la figura de Gestor Independiente, los esquemas de aprovechamiento en Colombia permiten la creación de ORPs en las que las empresas de todos los tamaños pueden verse representadas de forma directa, ya sea como copropietarias o como afiliadas. Para lograr sus objetivos, algunas ORPs podrán contar con actores como las ECAs y las organizaciones de recicladores en la configuración de su sistema logístico, sin embargo, esto dependerá de las características y de la infraestructura propia de cada zona o región.

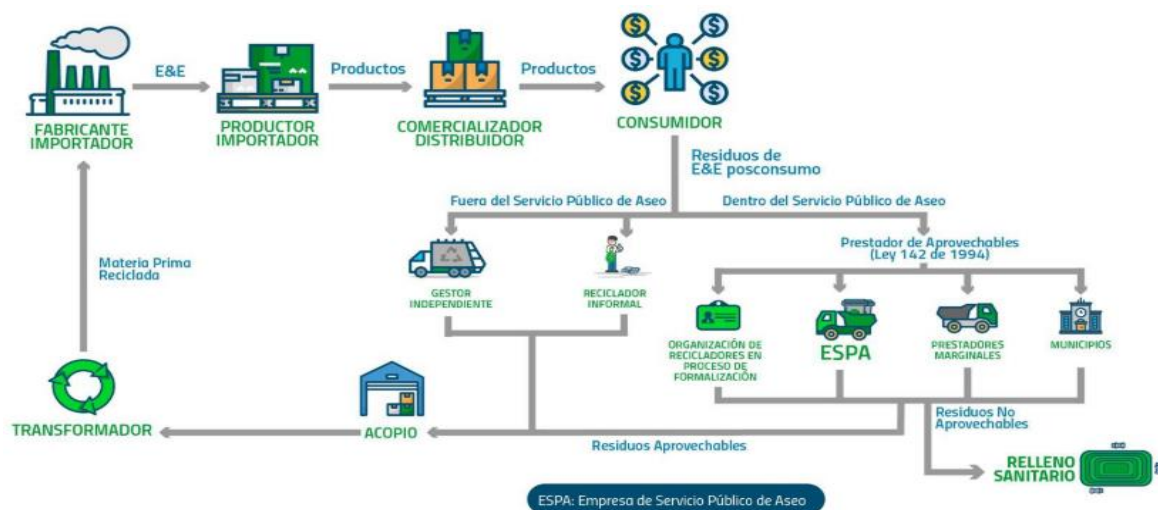


Figura 3. Diagrama de flujo de materiales y residuos sólidos contenidos por la resolución de envases y empaques. Tomado de "El ABC de la Resolución 1407 de 2018" (p. 11), por Cempre Colombia (2018).

¹ En Colombia, el Aprovechamiento es una actividad complementaria del servicio público de aseo (Ley 142, 1994; Ley 689, 2001)

Entre las metas impuestas en esta resolución, se encuentra aprovechar, como mínimo, el 10,0% de los envases y empaques puestos en el mercado, teniendo como base el tercer año previo a la implementación del plan; el porcentaje se incrementa de forma gradual desde el año 2021, hasta llegar a un 30,0% en 2030. Para llevar a cabo esta tarea, los productores podrán asociarse o actuar de forma individual, encontrando condiciones más favorables en un entorno colaborativo que se brindan desde la misma resolución: les permite cumplir, en conjunto, con un 70,0% de la meta propuesta, y complementarla con puntos obtenidos a partir de un sistema de parámetros multicriterio que favorece la investigación aplicada, la cobertura geográfica, la cultura ciudadana, y la implementación de mecanismos de sensibilización hacia la gestión de empaques envases y al consumo sostenible (Cempre Colombia, 2018; Resolución 1342, 2020; Resolución 1407, 2018).

Así, los nuevos retos impuestos a las empresas en términos de REP implican cambios profundos en la forma de planificar y gestionar la logística de sus productos, la cual, tradicionalmente, ha sido entendida desde la economía lineal. En este sentido, la puesta en marcha de esquemas de REP de acuerdo con la legislación presentada, requiere de la implementación de sistemas logísticos fundamentados en el concepto de economía circular que soporten actividades como la disposición de residuos, la gestión de materiales peligrosos, la reducción en la fuente, el reciclaje, la sustitución, la reutilización y la eliminación de materiales. En consecuencia, la implementación de REP y la gestión logística están íntimamente relacionadas, ya que la eficacia de implementación de la primera está ligada a la planeación eficiente de la segunda.

1.4 Logística y gestión de la cadena de suministros

La logística es entendida como el *“proceso de planear, implementar y controlar la eficiencia, flujo rentable y almacenamiento de materia prima, inventario en proceso, bienes terminados, y el flujo de información relacionada desde el origen hasta el punto de consumo para cumplir con los requerimientos de los clientes”* (Cooper et al., 1997). Por su parte, la gestión de la cadena de suministros integra los procesos de negocios desde los proveedores originales hasta los consumidores finales, incluyendo productos, servicios e información que agrega valor para los clientes (Cooper et al., 1997). Teniendo en cuenta la relevancia del ámbito logístico para los costos y el medio ambiente, hablaremos de logística hacia adelante, logística inversa y cadena de suministros de ciclo cerrado.

Existen diversas formas de abordar el concepto de logística hacia adelante (en inglés, Forward Logistics - FL), cuyo eje central es la economía lineal. Según Stevens (1989), la FL es un sistema compuesto por proveedores de materiales, tareas de producción y distribución, y clientes. Estos elementos se encuentran relacionados por medio del flujo de materiales y el flujo de información. Por su parte, la logística inversa (en inglés, Reverse Logistics - RL), se refiere a la disposición de residuos y la gestión de materiales peligrosos, incluyendo actividades como la reducción en la fuente, el reciclaje, la sustitución, la reutilización y la eliminación de materiales (Subramanian et al., 2013). En este contexto, las actividades de RL se asocian de forma directa con la gestión de los productos al final de su vida útil y, consecuentemente, con estrategias de economía circular (Islam & Huda, 2018). Ahora bien, las actividades de FL y RL demandan múltiples esfuerzos por parte de las empresas. Al considerar FL y RL de forma integrada, surge el concepto de gestión de la cadena de suministros de ciclo cerrado (en inglés, Closed-Loop Supply Chain – CLSC) (Islam & Huda, 2018), el cual es definido por Guide & Van Wassenhove (2009) como el “diseño, control y operación de un sistema para maximizar la generación de valor a lo largo del ciclo de vida de un producto con la recuperación dinámica de valor de distintos tipos y volúmenes de devoluciones a través del tiempo”.

En términos generales, los conceptos de FL y RL componen la CLSC, y representan la gestión integral de materiales que debe realizar un productor que se encuentre bajo directrices internacionales o locales de responsabilidad extendida. En este orden de ideas, una buena gestión de la CLSC contribuirá a una efectiva transición a la EC y al cumplimiento de metas normativas como las establecidas en la Resolución 1407 (2018), sin embargo, esto implicará repensar cada una de las etapas de la FL para que estén relacionadas de forma armónica con los objetivos de la RL y viceversa. Además, hace necesaria la evaluación y selección de alternativas que le permitan a las empresas tomar decisiones según sus características.

Ahora bien, existe una definición de cadena de suministros inversa de residuos que vincula RL y gestión de residuos: *“consiste en una red que se compone de todas las entidades involucradas en el flujo de productos desechados que salen del punto de consumo. Esto incluye recolección, transporte, recuperación y disposición de residuos. Su propósito es recapturar o crear valor y/o una correcta disposición”* (Van Engeland et al., 2020). En este orden de ideas, es necesario definir las opciones de generación y mantenimiento de valor para poder realizar la configuración de la red, dichas opciones determinarán qué tipo de residuos se tratarán. Van Engeland et al. (2020)

considera las siguientes opciones: (1) *reúso y reparación*, que generalmente hacen referencia al nivel final del producto, e incluye modificaciones menores a los productos (limpieza, reparación, restauración), después de la cual, pueden venderse u ofrecerse a su dueño inicial; (2) *reacondicionamientos*, que enmarcan el aseo, capas de pintura, componentes nuevos o reparaciones, y pueden implicar la reventa del producto como reacondicionado; (3) *remanufactura*, que representa la adopción de partes recuperadas, componentes o modelos de productos desensamblados en el proceso de producción; (4) *reciclaje*, asociado a productos recuperados al nivel de materiales, es decir, que no se retienen partes o productos: sólo se recupera el material del producto original; (5) *tratamiento*, que indica si se somete el flujo de productos a un proceso; y (6) *disposición final*, que constituye el fin del ciclo de vida de todo producto o material. Las relaciones entre estas opciones y algunas de las interacciones posibles pueden observarse en la figura 4.

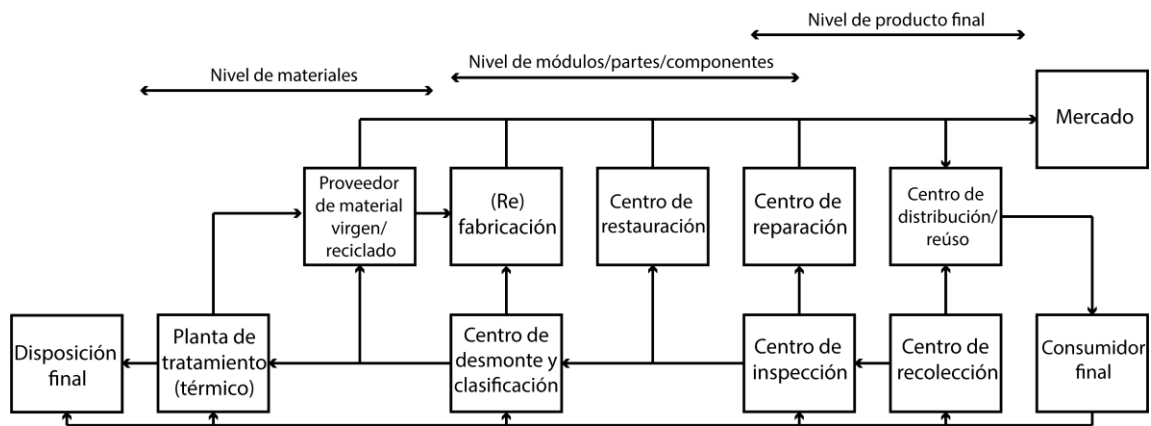


Figura 4. Disposición general de una cadena de suministros inversa que incluye residuos. Adaptado de “Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains” (p. 8), por J. Van Engeland et. al, 2020, Omega 91 (2020).

1.5 Problemática en contexto

Este trabajo se centra en el tema de responsabilidad extendida del productor para empaques y envases. Partiendo de una cifra de 2,01 mil millones de toneladas de residuos globales sólo en el año 2016, es importante reconocer que nos encontramos en una crisis global de residuos (Kaza et al., 2018; O'Brien, 2012). En este aspecto, al contrastar los datos de residuos sólidos generados versus aprovechados en Colombia para 2019, encontramos que se disponen aproximadamente 8,20 toneladas de residuos por cada tonelada aprovechada (Superservicios, 2018a, 2018b, 2019a, 2020, 2019b). Por último, cabe resaltar que la distribución de residuos aprovechados por tipo de material muestra predominancia en papel y cartón (55,0%), metales (22,3%) y plásticos (15,1%), frente a las cifras de vidrio (5,20%), madera (1,93%) y textiles (0,57%) (Superservicios, 2019b).

Tal como se había mencionado anteriormente, la estrategia gubernamental en materia de envases y empaques de papel, plástico, vidrio, cartón y metal es la Resolución 1407 de 2018. Esta normativa establece los criterios para que una empresa pueda denominarse “productora”; lo cual implica que deba asumir el reto de reconfigurar su sistema logístico para cumplir con la normatividad en los plazos establecidos, evitar multas y sanciones, y responsabilizarse de los envases y empaques de sus productos durante todo su ciclo de vida (Resolución 1407, 2018).

Para realizar una implementación eficaz de un esquema de REP es importante resaltar el rol de las pequeñas y medianas empresas (pymes), las cuales ofrecen la mayoría de los empleos en países desarrollados y son responsables del 45,0% de la empleabilidad en economías emergentes (Ayyagari et al., 2014; Prieto-Sandoval et al., 2019). En Colombia, se reportan cerca de 1.532.290 empresas para el año 2017, de las cuales, el 92,7% y 6,8% son microempresas y pymes, respectivamente (Confecámaras, 2018). Tomando como referencia los sectores *Industria* y *Comercio*, se estima un total de 44.000 pymes susceptibles al cumplimiento de estos requerimientos normativos de REP.

En general, existen oportunidades para las pymes al implementar estrategias de EC, como aumento del prestigio, reducción de costos y rentabilidad financiera, sostenibilidad a largo plazo o recuperación de su ambiente local (Del Río et al., 2016; Ellen MacArthur Foundation, 2015; Moore & Manring, 2009; Noci & Verganti, 1999; Rizo et al., 2016); sin embargo, generalmente cuentan con recursos técnicos y financieros limitados, no son conscientes de los beneficios potenciales y cuentan con muy poco soporte gubernamental (Ormazabal et al., 2016; Rizo et al.,

2016). Según Prieto-Sandoval et al. (2019), lo anterior pone en relieve el riesgo de que las pymes puedan entrar en un círculo vicioso de estrategias ambientales reactivas y poco sostenibles, limitándose, por ejemplo, al cumplimiento de requerimientos de tipo normativo. A partir del trabajo de Rizos et al. (2016), es posible identificar barreras concretas para las pymes a la hora de implementar estrategias circulares, entre ellas: falta de soporte en la red de oferta y demanda, falta de capital, falta de soporte gubernamental, carga administrativa, falta de conocimientos técnicos y falta de información.

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo responde a la pregunta de investigación: ¿Cómo debe configurarse el sistema logístico que permita a las pymes satisfacer los requerimientos de REP en empaques y envases, optimizando factores ambientales y económicos? En consecuencia, esta investigación tiene como objetivo el desarrollo de un modelo de apoyo a la toma de decisiones desde el punto de vista de la administración de operaciones y la cadena de suministros considerando aspectos ambientales y económicos para pymes en torno a los requisitos de REP en envases y empaques en Colombia.

Este trabajo busca aportar en términos de generación de lineamientos para la toma de decisiones desde la administración de operaciones y la gestión de la cadena de suministros, lo que puede influir en la cantidad de material aprovechado. Específicamente, la investigación contribuye con: (1) un modelo de optimización enmarcado en la herramienta de reembolso de depósito, para la generación de alternativas de REP desde el punto de vista logístico y de administración de operaciones, que responde a factores ambientales y económicos; (2) la solución de un caso de estudio para el modelo propuesto desde un enfoque colaborativo (RCP), partiendo de la conformación de una ORP y considerando restricciones asociadas a la legislación colombiana, lo cual no tiene antecedentes en la literatura; y (3) la generación de lineamientos de apoyo a la toma de decisiones para pymes orientados a una adecuada gestión de sus requisitos de REP en envases y empaques.

En el capítulo 2, se presenta el estado actual de esta temática y consideraciones preliminares para el desarrollo del modelo. Seguidamente, en el capítulo 3 se describen aspectos relacionados con el modelo propuesto. En el capítulo 4, se presenta la implementación y el análisis de los resultados. Por último, se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1 Antecedes sobre REP en envases y empaques

En el sector de envases y empaques se han realizado diversas investigaciones relacionadas con el tema de REP. En esta sección, no se incluye específicamente la aplicación de modelos para hacer frente a requerimientos de REP en envases y empaques enfocado en pymes debido a que no se encontraron trabajos con estas características en la revisión realizada, sin embargo, se citan aquellos que se consideran relevantes, bien sea porque representan un hito en la temática o porque permiten identificar el impacto de la aplicación de políticas de responsabilidad extendida del productor en distintos países. Las investigaciones se presentan de forma cronológica.

En el trabajo de González-Torre et. al (2004), se analizan las relaciones entre empresas emparadoras/embotelladoras del sector de comidas y bebidas, sus proveedores, y los clientes finales en Bélgica y España, encontrando que la preocupación por el medio ambiente condiciona la cooperación entre clientes y empresas emparadoras/embotelladoras, sin embargo, no pasa lo mismo aguas arriba de la cadena de valor; esto último resalta la importancia de la implementación de esquemas de REP incluyendo a los dueños del producto envasado. También, se ha indagado sobre el efecto de las políticas de REP en el cambio tecnológico y la innovación para el sector de empaques plásticos y el sector electrónico en Noruega, encontrando que, a pesar de que existe correlación entre estas variables, la causalidad es bastante débil, concluyendo que los tomadores de decisiones deben establecer medidas más específicas en aras de inducir el desarrollo tecnológico y la innovación desde políticas de REP (Røine & Lee, 2006).

Por su parte, Quinn & Sinclair (2006) investigaron sobre los retos asociados a la implementación de las políticas de REP en Canadá y Estados Unidos, encontrando poco interés por parte de las empresas para asumir la responsabilidad física (i.e. recolección) o fiscal (i.e. pago de impuestos) de los empaques asociados a los productos que fabrican, lo que sustenta la necesidad de políticas que respalden la devolución obligatoria y el diseño de empaques ecológicos; esta conclusión coincide con la normativa de REP para empaques y envases definida en Colombia. Más adelante, Ko, Noh, & Hwang (2012) investigaron sobre los efectos de la estandarización de botellas de vidrio en dos empresas cerveceras competidoras, obteniendo resultados favorables en términos de reducción de costos; este enfoque podría ser atractivo para empresas con limitaciones financieras, como las pymes.

En otra investigación, Pires et. al (2015) desarrollaron un modelo para el cálculo de una tarifa diferencial que varía de acuerdo con el diseño del empaque y al contenido de material reciclable del mismo, en aras de incentivar la producción de empaques sostenibles. Por otro lado, se destaca el trabajo de Kim & Mori (2015), el cual expone los efectos de la política de exención del requisito de reciclaje obligatorio dentro de la implementación de REP para empaques en Corea del Sur: esto incidió negativamente en la tasa de reciclaje y en el beneficio social neto, en consecuencia, recomienda la existencia de un requisito de reciclaje obligatorio.

Con relación a las políticas de REP, Tencati et. al (2016) realizaron un estudio que incluye once países, hallando tres tendencias principales: (1) fomento del diseño y producción de envases con base en la evaluación del ciclo de vida, (2) sensibilización de los consumidores finales, y (3) promoción de esfuerzos de colaboración en la cadena de suministros de envases. En cuanto a la eficiencia de la REP para ofrecer opciones óptimas de envases, Arnaud (2017) encontró que una política adecuada implica la combinación de los esquemas de REP con el desarrollo de tarifas por empaque para cubrir el costo social de disposición (costos de clasificación más costos de vertimiento de residuos), y la adopción de sistemas de bonificación/penalización para ajustar cuotas a los productores según el costo total de empaquetado. Finalmente, Rubio et. al (2019) estudiaron la implementación de políticas de REP para residuos de empaques en Portugal y España, en aras de evaluar la eficacia de estas para cumplir con sus objetivos básicos: la reducción de desperdicio y el incremento de actividades de reciclaje; concluyendo que, pese a que aún no ha sido posible separar producción de desperdicios de empaques y crecimiento económico, las actividades de reciclaje han aumentado.

En Colombia, se han diseñado y publicado normas relacionadas con responsabilidad extendida en distintos sectores con el ánimo de hacer una transición hacia una economía circular. Al respecto, han surgido iniciativas públicas y privadas enfocadas a la gestión de residuos de envases y empaques. Una de las más importantes es la Estrategia Nacional de Economía Circular – ENEC, liderada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible del Gobierno de Colombia, que busca activar y dinamizar la transición hacia una economía circular en diversos sectores, teniendo entre sus líneas priorizadas el tema de materiales de envases y empaques (MADS, 2019). Por otro lado, existen iniciativas privadas como el programa Visión 30/30 lanzado por la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI), con el objetivo de “*aprovechar un 30,0% del material utilizado en envases y empaques para 2030, respondiendo a las estrategias de*

sostenibilidad del sector empresarial y a las expectativas de los ciudadanos” (ANDI, 2019). Un caso pionero en materia de REP es el del Grupo Retorna, enfocado a gestionar la logística inversa de productos de diferentes sectores mediante la alianza de las corporaciones “Cierra el ciclo”, “EcoComputo”, “Pilas con el ambiente”, “Red Verde”, “RecoEnergy” y “Rueda verde”; la cual se basa en la promoción de esfuerzos colectivos en materia de responsabilidad extendida del productor (Grupo Retorna, 2020).

En general, es posible enumerar algunas organizaciones que cuentan con planes individuales o colectivos, que pueden verse como iniciativas relevantes en torno al cumplimiento de los requisitos de REP de envases y empaques en Colombia: (1) Corporación Punto Azul, orientada a brindar soluciones de gestión de empaques y envases para empresas de distintos sectores (alimentos y bebidas, aseo personal e industrial, cosméticos, suplementos dietarios, dispositivos médicos, tecnología, entre otros) (Punto Azul, 2020); (2) Colectivo de Responsabilidad Ambiental – CORA, que busca brindar a sus afiliados una solución integral a los requerimientos de la Resolución 1407 (CORA, 2020); (3) Compromiso Empresarial Para el Reciclaje – CEMPRE, con su iniciativa RED RECICLO de cara al cumplimiento de la Resolución 1407 de 2018 (Cempre Colombia, 2020); (4) Corporación Campo Limpio, enfocada en la gestión de envases de la industria agropecuaria (Campo Limpio 2020); (5) Asociación Colombiana de Empresas Licoreras - ACIL, cuya finalidad en este contexto es gestionar envases del sector licorero a través de su programa ReLic (Suversión, 2020); (6) Ecologista SAS ESP, que pone en marcha un plan colectivo de REP de empaques y envases en alianza con la empresa Teca SAS (Tecnologías en Economía Circular Aplicada) (Ecologista, 2020); (7) Alianza Soyca – ASEI, con el plan colectivo REPACK de cara a la reincorporación de envases al ciclo productivo a través de la integración de los diferentes actores de la cadena (Soyca, 2020); (8) Kaptar, una empresa con antecedentes de implementación efectiva de estrategias de cierre de ciclo de vida de envases plásticos (Kaptar, 2020); entre otras.

Cabe destacar que estas iniciativas se encuentran en etapas preliminares y reconocen la necesidad y la importancia de contribuciones desde la academia para el logro de sus objetivos. En consecuencia, este trabajo busca servir como referente teórico para la configuración de esquemas de REP en Colombia desde el punto de vista de administración de operaciones y la cadena de suministros, considerando principalmente las decisiones que deben tomarse desde una ORP, lo cual aplica para la mayoría de las iniciativas mencionadas. Para tal fin, se hace

indispensable conocer aspectos relacionados con el esquema de aprovechamiento en Colombia, incluyendo los actores que podrían considerarse, las funciones que estos podrían desempeñar dentro del sistema y su posible influencia sobre las decisiones estratégicas a cargo de las ORPs; esta información se detalla en la sección 1.3.2.

2.2 Aspectos logísticos de la gestión de envases y empaques

En el contexto de la gestión de la cadena de suministros para empaques con un enfoque circular, se han realizado diversas investigaciones, no necesariamente ligadas al cumplimiento de una política de REP en específico, las cuales han abordado el problema desde múltiples perspectivas en todo el mundo. En el trabajo de Meherishi et al. (2019), encontramos una revisión sistemática de literatura que incluye los estudios realizados desde el año 2000 hasta su fecha de publicación e incluye el análisis de 139 investigaciones. En la revisión anterior, se mencionan los ejes temáticos principales en los que se han enmarcado estos estudios: (1) Comparación de alternativas y sistemas eco-amigables, que incluye materiales, sistemas y el diseño de empaques; (2) Reúso / Reciclaje / Remanufactura / Retorno; (3) Adopción de empaques sostenibles; y (4) Gestión de residuos de empaques. Teniendo en cuenta esta clasificación, nos permitimos ubicar nuestra investigación en: gestión de residuos de empaques; comparación de alternativas y sistemas eco-amigables, reciclaje, retorno y reúso.

El mismo trabajo realiza la categorización de los estudios relacionados con la gestión sostenible de empaques y envases para diversos ámbitos, entre ellos: (1) las dimensiones de la sostenibilidad que se incluyen en cada caso (i.e., económica, ambiental y social), encontrando que la mayoría de los artículos revisados integran metas ambientales y económicas, al igual que esta investigación; (2) el nivel de empaquetado (i.e., primero, segundo y tercer nivel), cuya frecuencia de estudio es mayor para el primer nivel, es decir, para aquellos empaques que tienen contacto directo con el producto, siendo este nivel en el que nos enfocaremos en este trabajo; y (3) la industria o sector en la que se enfocan las investigaciones, resaltando que el sector de bebidas y alimentos concentra el mayor número de trabajos (Meherishi et al., 2019).

Adicionalmente, a nivel geográfico, la figura 5 muestra una alta concentración de estudios en Europa y Norteamérica, mientras que Sudamérica se encuentra un poco rezagado, mostrando una participación menor al 12,0% del total de trabajos revisados (Meherishi et al., 2019). Esto se relaciona con los tiempos de puesta en marcha de esquemas de REP en cada continente y con la legislación.

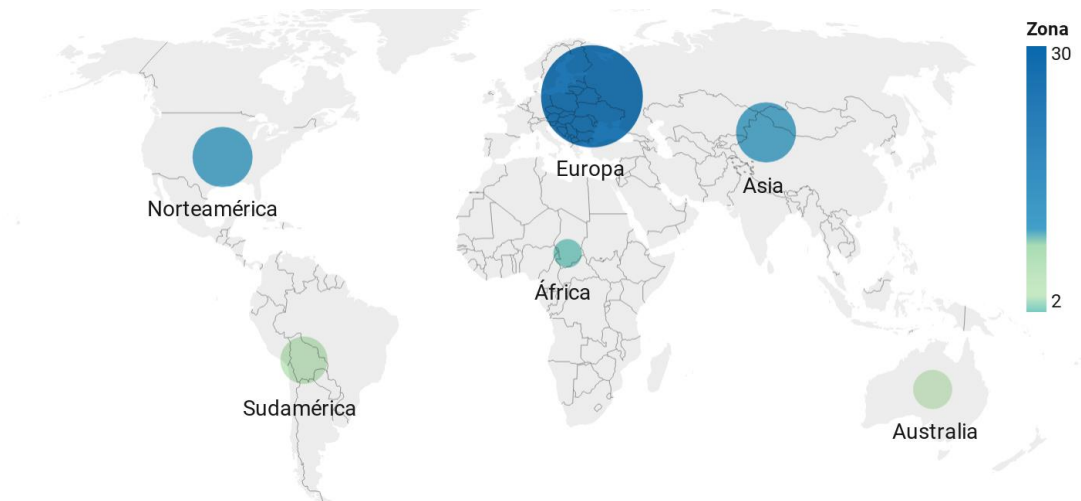


Figura 5. Progreso de estudios en empaques sostenibles para la gestión de la cadena de suministros a lo largo del mundo. Adaptado de “Sustainable packaging for supply chain management in the circular economy: A review” (p. 13), por L. Meherishi et. al, 2019, Journal of Cleaner Production 237 (2019).

Por último, encontramos una segregación de acuerdo con la forma en que han sido estudiadas las etapas de la cadena de suministros en el ámbito de empaques y envases sostenibles: de forma integrada, mixta, o en la estructura logística y de recuperación “aguas abajo”. Esto último ha permitido ubicar nuestro problema objeto de investigación como parte de los estudios de “recuperación y logística aguas abajo”, acotado en las actividades de disposición y recuperación, logística inversa, reciclaje, reúso, y remanufactura, como se muestra en la figura 6 (Meherishi et al., 2019).

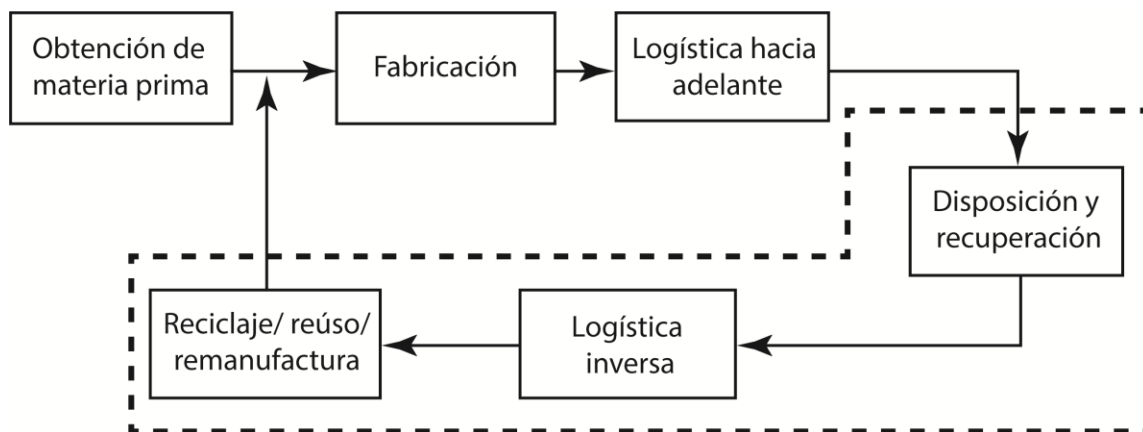


Figura 6. Etapas de estudio de la cadena de suministros con enfoque en recuperación y logística aguas abajo. Adaptado de “Sustainable packaging for supply chain management in the circular economy: A review” (p. 4), por L. Meherishi et. al, 2019, Journal of Cleaner Production 237 (2019).

2.3 Herramientas de REP: Reembolso de depósito

Para abordar el problema de REP en envases y empaques, se hace necesario definir en qué herramienta de REP se centrará la investigación. A partir de lo anterior, se hará posible establecer cuáles son los parámetros que se deben estudiar y ajustar en la configuración logística y administrativa del sistema.

Como se ha mencionado anteriormente, se destacan cuatro categorías: (1) *requerimientos de devolución*, (2) *regulaciones y estándares de rendimiento*, (3) *instrumentos basados en información* e (4) *instrumentos económicos basados en el mercado* (OCDE 2016). En este sentido, se ha seleccionado el *reembolso de depósito*: una alternativa de tipo económico asociada a la cuarta categoría de instrumentos de REP que, a pesar de ser la tercera más usada a nivel internacional (OCDE 2016), presenta tasas de recuperación cercanas a 90,0% en la mayoría de los países que la implementan (Zhou et al., 2020).

En términos generales, un sistema de reembolso de depósito se define como un recargo a los productos potencialmente contaminantes; al retornar el producto o sus residuos, se garantiza el reembolso del recargo (OECD, 2001). Este tipo de sistemas son usados frecuentemente para bebidas y combinan dos tipos de incentivos económicos (Dăce et al., 2013). Por una parte, se aplica un recargo a la compra del empaque sustentado en la alta probabilidad de una eliminación ineficiente o contaminante (i.e., entierro de los residuos en vertederos); por otra, se aplica un descuento que cubre parte del recargo a quien devuelve el empaque al sistema en perfectas condiciones para ser identificado y reciclado (Abejón et al., 2020; Lavee, 2010). Según Lavee (2010), el monto del depósito es clave para el sistema: cuanto mayor sea, mayores serán las tasas de reciclaje, sin embargo, si se aumenta en exceso, podría reducirse el consumo de los productos.

Como se menciona en Zhou et al. (2020), podría hablarse de este sistema en términos de una combinación de un cargo al producto (recargo en el precio) y un subsidio en principio (incentivo por la devolución del material), y un sistema de ciclo cerrado que siempre permanece viable y busca internalizar la externalidad negativa (los costos externos de contaminación) (Kulshreshtha & Sarangi, 2001; Numata, 2009). En otras palabras, es un sistema que busca internalizar los costos de la contaminación derivada de los envases de los productos con los que opera, implementando un aumento en el precio del producto cuya magnitud es equivalente al incentivo que ofrece por la devolución del envase al sistema para su aprovechamiento.

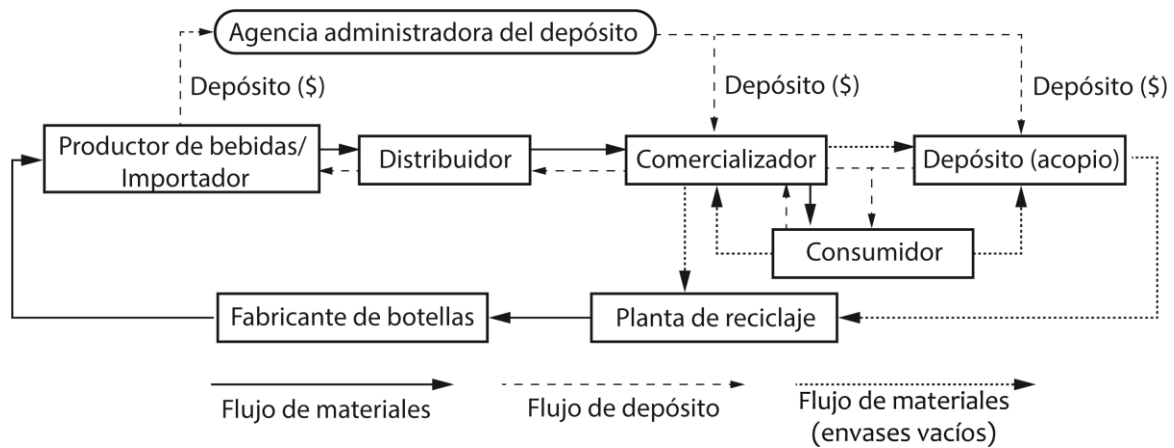


Figura 7. Mecanismo de operación de un sistema de reembolso de depósito. Adaptado de "A systematic review of the deposit-refund system for beverage packaging: Operating mode, key parameter and development trend" (p. 4), por G. Zhou et. al, 2020, Journal of Cleaner Production 251 (2020).

Los sistemas de este tipo que se enfocan en bebidas, suelen ser integrales e involucran ciertas partes, entre ellas: productor/importador, distribuidor, comercializador (*retailer*), consumidor y gobierno (Zhong & Zhao, 2012). Estas partes comparten dos flujos: dinero (flujo de depósito) y materiales, tal como se muestra en la figura 7. Inicialmente, observamos que el flujo de materiales empieza en el productor o importador de bebidas (envases con producto), pasando por el distribuidor y el comercializador hasta llegar al consumidor final. Así, los envases con producto pasan a estar vacíos y podrán ir desde el consumidor de vuelta al comercializador o directamente hasta un acopio, luego del cual, serán conducidos a una planta de reciclaje para ser transformados y reintegrados al proceso productivo en forma de envase. Con respecto al flujo de dinero, el proceso se realiza de forma inversa: el depósito sale del consumidor hasta el comercializador, luego fluye a lo largo de la cadena de manera inversa hasta llegar al productor de bebidas representado en el precio del producto. En este punto, puede existir una agencia administradora del depósito (i.e., una ORP) que reciba el depósito y lo distribuya al comercializador y/o al acopio para que pueda ser devuelto al cliente cuando retorna el envase. Cabe destacar que, en la práctica, estos sistemas pueden ser muy diferentes a lo mostrado en la figura 7. A propósito, el trabajo de Zhou et al. (2020) presenta una revisión sistemática con una descripción de sistemas de reembolso de depósito para empaques de bebidas de 40 países/regiones, donde se evidencia una gran diferencia entre los mecanismos de operación de cada país, especialmente en los principales parámetros de este tipo de sistemas: instituciones administradoras, monto del depósito, depósitos no redimidos y propietarios del material. Finalmente, en la revisión se recomienda incluir al reciclaje informal en la implementación de estos sistemas.

2.4 Estudio de métodos de modelación

Existen diversos métodos y herramientas en la literatura que podrían utilizarse para abordar la configuración del sistema logístico para envases y empaques en el contexto de REP. Al respecto, Meherishi et al. (2019) presenta una revisión que incluye un total de 59 estudios clasificados en una o varias de las siguientes categorías: casos de estudio, técnicas de optimización, herramientas de medición, simulación, estudios conceptuales, y encuestas. De acuerdo con este trabajo, la mayoría de las investigaciones realizadas en logística de empaques sostenibles han usado casos de estudio, seguido por las técnicas de optimización, las herramientas de medición y la simulación (Ver figura 8). Lo anterior permite concluir que, para logística inversa de empaques y envases, los modelos desarrollados varían según su alcance y el método utilizado para abordar el problema; siendo predominantes dos enfoques: optimización y simulación.

En el contexto del problema, una condición es el porcentaje de material recuperado (Resolución 1407, 2018), lo que hace prioritaria la selección de una herramienta que permita plantear restricciones. Por lo tanto, la presente investigación es validada a partir de un estudio de caso. En este sentido, se optará por el desarrollo de un modelo de optimización, en el que se busca satisfacer un objetivo económico y otro ambiental.

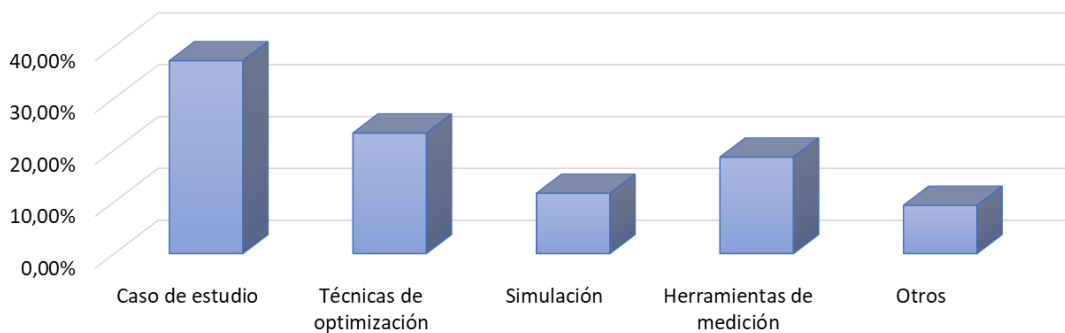


Figura 8. Estudio de métodos de modelación. *Adaptado de "Sustainable packaging for supply chain management in the circular economy: A review" (p. 7), por Meherishi et. al, 2019, Journal of Cleaner Production 237 (2019).*

A propósito de modelos de optimización, Van Engeland et al. (2020) presenta una revisión de 207 investigaciones sobre modelos de optimización de redes estratégicas en cadenas de suministros inversa de residuos. En su revisión, los modelos son clasificados de acuerdo con el tipo de decisiones abordadas, conformando tres grandes grupos no necesariamente excluyentes: estratégicas, tácticas y operativas. El modelo propuesto en nuestro trabajo se enfoca en decisiones a nivel táctico y estratégico, orientado a un único periodo, para varios productos (envases de vidrio), y contando con restricciones relacionadas con la conservación del flujo, satisfacción de la demanda, almacenamiento y procesamiento, e imposición de un número mínimo o máximo de instalaciones.

En términos de funciones a optimizar, se presentan modelos mono - objetivo y multi – objetivo, siendo el primero nuestro caso sin dejar de lado que nuestro enfoque está en dos aspectos: económico y ambiental. Otras distinciones se relacionan con la perspectiva del modelo, diferenciando entre compañías públicas y privadas: nuestro modelo para pymes pertenece al segundo grupo. Por otra parte, se indaga sobre los estudios realizados de acuerdo con las etapas incluidas en la cadena de suministros inversa de residuos, encontrando que las opciones de recuperación que más se aplican son la remanufactura, el reciclaje y la disposición final, dejando en un último plano el reuso y la reparación (Van Engeland et al., 2020).

Capítulo 3

Modelo de evaluación de alternativas de REP para Pymes

3.1 Consideraciones para la construcción del modelo

Como ya se ha mencionado previamente, el objetivo de este trabajo es diseñar un modelo de apoyo a la toma de decisiones desde el punto de vista de la administración de operaciones y la cadena de suministros considerando aspectos ambientales y económicos para pymes en torno a los requisitos de REP en envases y empaques en Colombia. Específicamente, se pretende (i) diseñar un modelo de optimización basado en la herramienta de reembolso de depósito enfocado en pymes que se ajuste al contexto de REP para envases y empaques en Colombia; (ii) construir y solucionar un caso de estudio desde un enfoque colaborativo para validar el modelo propuesto y analizar el comportamiento del sistema; y (iii) generar lineamientos de apoyo a la toma de decisiones para pymes encaminadas a la correcta gestión de sus requisitos de REP en envases y empaques.

El trabajo se centra en la construcción de alternativas para envases de vidrio del sector de bebidas, considerando su alto impacto ambiental y la reducción en la demanda de material virgen derivada del retorno del envase (Simon et al., 2016). Además, se parte de que las pymes productoras se encuentran limitadas desde el punto de vista económico, logístico y técnico para la implementación de estrategias circulares (Prieto-Sandoval et al., 2019), por lo que se considera el trabajo conjunto entre ellas mediante la conformación de organizaciones de responsabilidad del productor (ORP). Por su parte, las alternativas diseñadas están enmarcadas dentro del instrumento de REP de reembolso de depósito, ya que es la tercera más usada a nivel internacional (OCDE, 2016) y presenta altas tasas de recuperación en la mayoría de los países que la implementan (Zhou et al., 2020). Bajo este instrumento, se incluyen actividades como: reciclaje, convirtiendo las botellas en material apto para procesos productivos; remanufactura, transformado material en botellas nuevas; y disposición final, la última opción en actividades de economía circular (Van Engeland et al., 2020).

De acuerdo con las actividades requeridas, se han considerado algunas etapas que dan lugar a distintos esquemas de recolección. Sumado a lo anterior, existen factores asociados al reembolso de depósito que podrán analizarse, como la responsabilidad de transporte entre etapas, la pertenencia y administración de depósitos no redimidos, y la configuración del mecanismo de financiación para el sistema (i.e. cuota administrativa, depósitos no redimidos, y/o ingresos por material) (Zhou et al., 2020). En este sentido, la generación de diferentes alternativas dependerá de aspectos como la configuración logística y la forma de financiación del sistema.

En términos generales, el problema a modelar consiste en la configuración de un sistema logístico que permita a pequeñas y medianas empresas asociadas en una Organización de Responsabilidad Extendida (ORP), satisfacer los requerimientos de Responsabilidad Extendida del productor (REP) en empaques y envases en Colombia, considerando aspectos ambientales y económicos. Esto implica la recuperación de cierta cantidad de material (porcentajes definidos en la legislación colombiana) de los envases puestos en el mercado en el tercer periodo anterior al periodo de recuperación (Resolución 1407, 2018). La configuración del sistema logístico no sólo involucra decisiones asociadas a los actores que deben componer la red, también implica evaluar cómo estructurar el sistema administrativa y financieramente, lo que hace necesaria la adopción de una alternativa de REP, que en este caso será el sistema de depósito y reembolso. En cuanto a la parte administrativa y financiera, se deberá definir cómo se financiará el sistema, qué pasará con los depósitos no redimidos, y si habrá o no un ingreso por venta de material al final de la cadena.

En este trabajo, se parte de la definición de nodos que corresponden a los actores obligatorios y potenciales del sistema, y la etapa de la cadena en la que se encuentra cada uno de ellos, como se resume en la tabla 1. Teniendo como base estos nodos, es posible establecer los flujos potenciales en términos económicos y de materiales. Con respecto a los materiales, el flujo inicia en la fábrica de botellas y finaliza con el envase convertido en materia prima aprovechable por uno de los nodos que admite transformación (i.e., *Eca*, PA o *Be*), pasando por el productor, los comercializadores, los clientes, y, eventualmente, por algún punto intermedio previo a su transformación (i.e., *Eca* o *Be*), tal como se muestra en la figura 9(a).

Por su parte, para los sistemas de reembolso de depósito el flujo de dinero funciona de forma inversa, tal y como se describió en la sección 2.3. Los productores deberán hacer una inversión inicial para el alistamiento y puesta en marcha del sistema. En este punto, cabe aclarar que los nodos que no son propiedad de la ORP no cancelan un depósito a los clientes y/o comercializadores por los residuos de empaques que reciben (i.e. Estaciones de Clasificación y Aprovechamiento - *Eca*), sin embargo, sí reciben dinero de parte de la ORP por concepto de recuperación y/o aprovechamiento del material. El flujo del depósito a lo largo del sistema puede evidenciarse en la figura 9(b).

Ahora bien, en aras de simplificar nuestro análisis, es posible reemplazar los actores de la cadena asociados a producción y logística hacia adelante (i.e., *Fb* y *P*) por una demanda de recolección del sistema asociada a los clientes y/o comercializadores. A su vez, los clientes y/o consumidores con demanda asociada pueden agruparse en clústeres según la ubicación geográfica, y verse como generadores de materia prima aprovechable en un conjunto de *Zonas*. Seguidamente, los actores que se encuentran en el área donde es posible recibir el material, pero no transformarlo (i.e., *Eca* y *Be*), pueden generalizarse como depósitos de clasificación y almacenamiento sin transformación que conforman un conjunto de *Acopios*. De manera análoga, los nodos que cuentan con la posibilidad de realizar transformación (i.e., *Eca*, *Be* y *PA*) pueden modelarse como depósitos de clasificación, almacenamiento y transformación. Estos últimos conforman el conjunto de *Transformadores*. Algunos residuos no ingresan al sistema o son rechazados en el proceso de clasificación; estos pasan a ser parte de los rellenos sanitarios (*Rs*). La representación gráfica del sistema planteado y su simplificación pueden observarse en la figura 10(a). Con esto en mente, procedemos a construir el modelo empleando la simplificación de la figura 10(b).

Tabla 1. Descripción preliminar de los nodos del modelo

NODO	TIPO	DESCRIPCIÓN	ETAPA DE LA CADENA
Fb	OBLIGATORIO	Fábrica de botellas ²	Producción y logística hacia adelante
P	OBLIGATORIO	Productores de bebidas de la ORP ²	Producción y logística hacia adelante
Rs	OBLIGATORIO	Relleno sanitario ²	Fin de la vida útil de los productos
Co	OBLIGATORIO	Clústeres de comercializadores ²	Consumo
Cl	OBLIGATORIO	Clústeres de clientes ²	Consumo
Eca	POTENCIAL	Estación de clasificación y Aprovechamiento ³	Clasificación, almacenamiento y transformación*
Be	POTENCIAL	Bodega especializada ⁴	Clasificación, almacenamiento y transformación*
PA	POTENCIAL	Planta de reciclaje (Transformación)	Clasificación, almacenamiento y transformación

* Algunos nodos de tipo Eca y Be no admiten el proceso de transformación.

² Los nodos definidos como obligatorios se basan en la cadena de valor preexistente centrado en economía lineal. En este caso, la ORP representa a los fabricantes de bebidas (Cempre Colombia, 2018; Resolución 1407, 2018)

³ Existe un Proyecto Tipo elaborado por el Departamento Nacional de Planeación, el cual establece lineamientos para la construcción de estaciones de clasificación y aprovechamiento de residuos sólidos. La inclusión de una trituradora, equipo necesario para procesar el vidrio, es de carácter opcional; esto soporta esta consideración para los nodos de tipo *Eca* en nuestro modelo (DNP, 2018b)

⁴ El informe de consultoría elaborado por el CONSORCIO NCU- UAESP (2018) sobre la actividad de aprovechamiento en la ciudad de Bogotá, evidencia la existencia de Bodegas especializadas, que corresponden a sitios privados no adscritos al sistema público de aseo que realizan procesos de clasificación, aprovechamiento, en algunos casos, transformación. Para efectos del modelo, se le dará esta connotación a las bodegas que sean propiedad de la ORP.

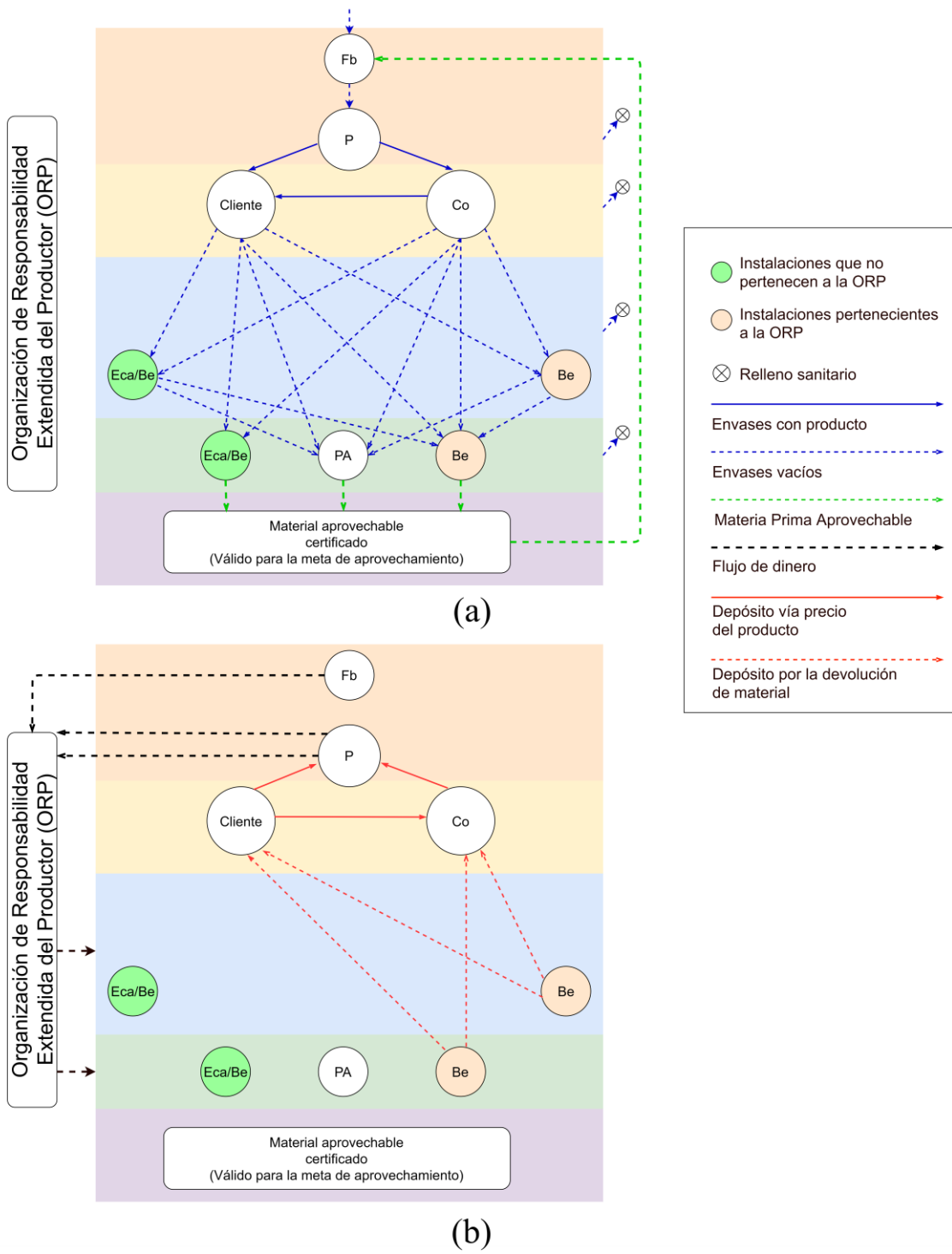
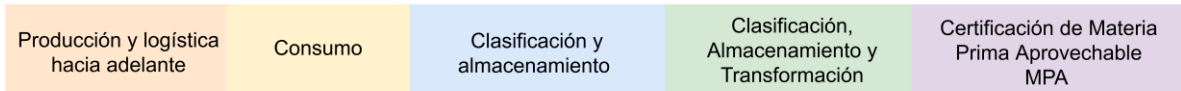


Figura 9. Descripción de nodos según la etapa en la que se encuentran. (a) Flujo de material y (b) Flujo de dinero en el sistema de reembolso de depósito para el esquema de REP de envases en Colombia. Elaboración propia.

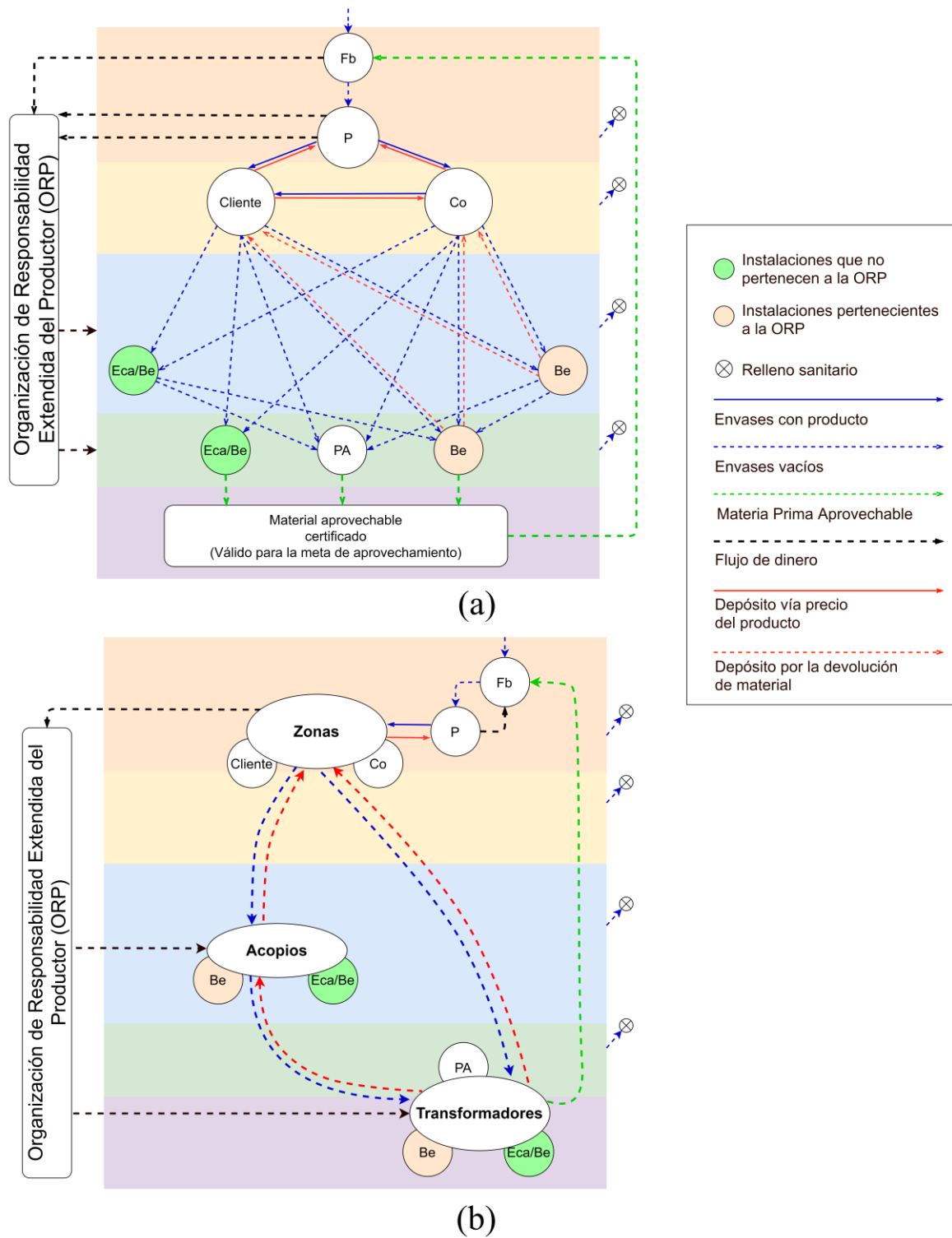
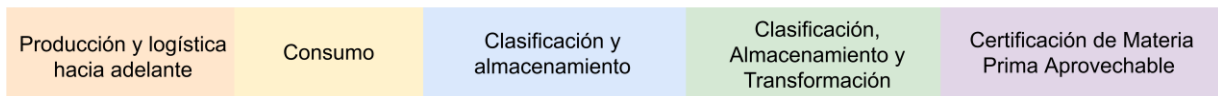


Figura 10. (a) Sistema de reembolso de depósito propuesto para el esquema de REP de envases en Colombia y (b) Simplificación del sistema para efectos de modelación. Elaboración propia.

3.2 Modelo de optimización

Para este modelo, se asume que los clientes y depósitos no pueden devolver envases directamente al productor (no se considera la actividad de reúso). Se utiliza la siguiente notación:

Tabla 2. Descripción de los conjuntos del modelo de optimización

Notación	Descripción	Índice
Z	Conjunto de zonas delimitadas geográficamente en las que se generan residuos de envases de productos de la ORP	i
A	Conjunto de sitios potenciales para la ubicación de Acopios	j
T	Conjunto de sitios potenciales para la ubicación de Transformadores	k
M	Conjunto de tamaños disponibles para la capacidad de las instalaciones ⁵	m

Tabla 3. Descripción de los parámetros del modelo de optimización

Notación	Descripción	Unidad
$QMPM_i$	Peso total de envases y empaques puestos en el mercado por los productores de la ORP en la Zona i	[Ton/Sem]
te_i	Tasa efectiva de recuperación en la Zona i	[%]
tr_i	Tasa de rechazo promedio de los materiales recuperados en la Zona i	[%]
QMR_i	Peso máximo recuperable de envases y empaques en la Zona i . $QMR_i = QMPM_i * te_i$	[Ton/Sem]
CAP_m	Capacidad de una instalación ⁵ de tamaño m	[Ton]
at_m	Área total de una instalación ⁵ de tamaño m	[m ²]
MA	Meta de aprovechamiento de residuos de envases y empaques respecto al peso total puesto en el mercado en el año base	[Ton/Sem]
ec	Costo de amortización semanal de los equipos de transformación	[COP/Sem]
rc_j^1	Costo de arrendamiento semanal por metro cuadrado en el sitio potencial para el Acopio j	[COP/m ² /Sem]
rc_k^2	Costo de arrendamiento semanal por metro cuadrado en el sitio potencial para el Transformador k	[COP/m ² /Sem]
ct_{jk}	Costo de transporte de residuos de envases y empaques desde el Acopio j hasta el Transformador k	[COP/Ton/Km]
TA_j	Parámetro binario que indica si un Acopio es propiedad de la ORP ($TA_j = 1$) o pertenece a un ente externo ($TA_j = 0$)	No aplica
TT_k	Parámetro binario que indica si un Transformador es propiedad de la ORP ($TT_k = 1$) o pertenece a un ente externo ($TT_k = 0$)	No aplica
vd	Valor del depósito para el sistema de reembolso	[COP/Ton]
vma	Precio del material aprovechable en el mercado sin transformar	[COP/Ton]
ft	Valor porcentual que representa la proporción en la que aumenta el valor del material en el mercado una vez es transformado	[%]
α	Valor porcentual que indica el diferencial máximo entre los porcentajes de material aprovechable recuperado por el sistema en cada una de las Zonas	[%]
ε	Valor cercano a cero que penaliza apertura y capacidad de entes externos	No aplica
P	Cantidad máxima de Acopios a abrir	No aplica
Q	Cantidad máxima de Transformadores a abrir	No aplica

⁵ Las instalaciones pueden ser Acopios o Transformadores

Tabla 4. Descripción de las variables del modelo de optimización

Variables	Descripción	Tipo de variable
y_{jm}	Variable binaria que indica si se ubica un Acopio de tamaño m en el sitio j ($y_{jm} = 1$) o no ($y_{jm} = 0$)	Localización
z_{km}	Variable binaria que indica si se ubica un Transformador de tamaño m en el sitio k ($z_{km} = 1$) o no ($z_{km} = 0$)	Localización
x_{ijk}	Variable continua que indica el porcentaje de la cantidad generada en la Zona i que fluye hasta el Transformador k pasando por el Acopio j	Asignación
w_{ik}	Variable continua que indica el porcentaje de la cantidad generada en la Zona i que fluye hasta el Transformador k	Asignación
R_i	Cantidad de material aprovechable recuperado en la zona i	Cobertura
R_{min}	Cantidad mínima recuperada de material aprovechable por el sistema en alguna zona de influencia de la ORP	Cobertura
R_{max}	Cantidad máxima recuperada de material aprovechable por el sistema en alguna zona de influencia de la ORP	Cobertura
f_j	Costo de apertura de un Acopio en el sitio potencial j	Costos
g_k	Costo de apertura de un Transformador en el sitio potencial k	Costos
CT	Costo total de transporte de material entre las instalaciones dentro del sistema.	Costos
CA	Costo total de apertura de las instalaciones en los sitios potenciales	Costos
ES	Egresos por concepto de operación del sistema de reembolso de depósito	Costos
IS	Ingresos por concepto de operación del sistema de reembolso de depósito	Costos
C	Variable de control de apertura y asignación de capacidad de instalaciones externas	Control

Función objetivo

$$\text{Maximizar}[IS - ES - C] \quad (1)$$

En esencia, esta función busca maximizar la utilidad del sistema, entendida como la diferencia entre los ingresos y los egresos de la ORP. Cabe mencionar que el modelo también incluye un aspecto ambiental, el cual puede estudiarse modificando la meta de aprovechamiento y gestionando diversos parámetros, y medirse calculando la cantidad total de material aprovechable recuperado por el sistema. Por su parte, el objetivo de la variable «C» es controlar la apertura y la asignación de capacidad a instalaciones de entes externos actuando como una penalización en la función objetivo.

Restricciones

A continuación, se calcula el costo total de transporte, teniendo en cuenta que el modelo incluye sólo aquellos costos en los que incurre la ORP. Con esta premisa en mente, la restricción hace referencia al costo de transporte desde los *Acopios* hasta los *Transformadores*, excluyendo los materiales catalogados como rechazos a partir del proceso de clasificación que se realiza en los *Acopios*. En este sentido, la primera parte de la restricción calcula el costo de transportar material sin transformar (envases vacíos) desde *Acopios* que son propiedad de la ORP hacia cualquier *Transformador*, ya sea de su propiedad o de un ente externo; la segunda parte incluye el transporte de materiales desde *Acopios* de entes externos hasta *Transformadores* de la ORP, lo que implica también un proceso de compra cuyo costo se incluye en la restricción de egresos del sistema.

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in Z} QMR_i(1 - tr_i) \left(\sum_{j \in A: TA_j=1} \sum_{k \in T} x_{ijk} ct_{jk} \right) + \\ & \sum_{i \in Z} QMR_i(1 - tr_i) \left(\sum_{j \in A: TA_j=0} \sum_{k \in T: TT_k=1} x_{ijk} ct_{jk} \right) = CT \end{aligned} \quad (2)$$

Además de lo anterior, se calcula el costo de apertura asociado a cada instalación: para los *Acopios*, corresponde a una estimación del valor del arriendo según el área total de la instalación; para el caso de los *Transformadores*, también se incluye la amortización de los equipos necesarios para su operación:

$$rc_j^1 \sum_{m \in M} at_m y_{jm} = f_j, \forall j \in A \quad (3)$$

$$ec + rc_k^2 \sum_{m \in M} at_m z_{km} = g_k, \forall k \in T \quad (4)$$

Seguidamente, se calcula el costo total de apertura de instalaciones. Este costo sólo se cuantifica para instalaciones que son propiedad de la ORP:

$$\sum_{j \in A} f_j TA_j \sum_{m \in M} y_{jm} + \sum_{k \in T} g_k TT_k \sum_{m \in M} z_{km} = CA \quad (5)$$

En la siguiente restricción se calculan los egresos operativos del sistema de reembolso de depósito para la ORP:

- Costo total de transporte.
- Costo total de apertura de instalaciones en los sitios potenciales
- Un conjunto de costos asociados a la ORP, que se dividen en:
 - Costo de adquisición de material recogido, clasificado y transformado por entes externos
 - Costo de utilizar *Transformadores* de entes externos para procesar material recogido en *Acopios* que pertenecen a la ORP
 - Costo de adquisición de material recogido y clasificado por entes externos sin transformar

$$\sum_{i \in Z} QMR_i(1 - tr_i) \left[\begin{array}{l} CT + CA + \\ vma(1 + ft) \left(\sum_{\substack{k \in T: \\ TT_k=0}} w_{ik} + \sum_{\substack{j \in A: \\ TA_j=0}} \sum_{\substack{k \in T: \\ TT_k=0}} x_{ijk} \right) + \\ vma * ft \left(\sum_{\substack{j \in A: \\ TA_j=1}} \sum_{\substack{k \in T: \\ TT_k=0}} x_{ijk} \right) + vma \left(\sum_{\substack{j \in A: \\ TA_j=0}} \sum_{\substack{k \in T: \\ TT_k=1}} x_{ijk} \right) \end{array} \right] = ES \quad (6)$$

A continuación, se calculan los ingresos operativos del sistema de reembolso de depósito para la ORP. Este cálculo incluye:

- Monto total percibido por la ORP por concepto de materia prima aprovechable recuperada. En otras palabras, los ingresos por venta de material recuperado y transformado por el sistema.
- Los depósitos no redimidos, que comprenden:
 - Los depósitos económicos asociados a envases reales puestos en el mercado por las empresas que hacen parte de la ORP, que no ingresan al sistema debido a la tasa efectiva de recuperación de la Zona.
 - Los depósitos económicos de los envases que, si bien están dentro de la tasa de recuperación, no ingresan al sistema debido a la configuración de la red y a las asignaciones generadas por el modelo de optimización.

$$\begin{aligned}
& vma(1 + ft) \left[\sum_{i \in Z} QMR_i(1 - tr_i) \left(\sum_{k \in T} w_{ik} + \sum_{j \in A} \sum_{k \in T} x_{ijk} \right) \right] \\
& + vd \left[\sum_{i \in Z} (QMPM_i - QMR_i) + \sum_{i \in Z} QMR_i \left(1 - \left(\sum_{k \in T} w_{ik} + \sum_{j \in A} \sum_{k \in T} x_{ijk} \right) \right) \right] = IS
\end{aligned} \tag{7}$$

La asignación de los residuos de empaques y envases que se producen en cada Zona puede distribuirse entre *Acopios* y *Transformadores*:

$$\sum_{k \in T} w_{ik} + \sum_{j \in A} \sum_{k \in T} x_{ijk} \leq 1, \forall i \in Z \tag{8}$$

Los residuos asignados a un *Acopio* no pueden exceder su capacidad:

$$\sum_{i \in Z} QMR_i(1 - tr_i) \sum_{k \in T} x_{ijk} \leq \sum_{m \in M} CAP_m * y_{jm}, \forall j \in A \tag{9}$$

Los residuos asignados a un *Transformador* no pueden exceder su capacidad:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i \in Z} QMR_i(1 - tr_i) w_{ik} + \sum_{i \in Z} QMR_i(1 - tr_i) \sum_{j \in A} x_{ijk} \\
& \leq \sum_{m \in M} CAP_m * z_{km}, \forall k \in T
\end{aligned} \tag{10}$$

Teniendo en cuenta el conjunto de posibles capacidades definidas en el parámetro « CAP_m », no se deben abrir instalaciones o asignar capacidades ociosas, aun cuando estas no generen un costo adicional para el sistema, como en el caso de instalaciones de entes externos. Para tal fin, el valor calculado en esta restricción penaliza esta situación directamente en la función objetivo:

$$C = \varepsilon \left(\sum_{j \in A} \sum_{m \in M} CAP_m y_{jm} + \sum_{k \in T} \sum_{m \in M} CAP_m z_{km} \right) \tag{11}$$

La cantidad de material que aprovecha el sistema debe ser, como mínimo, la que se establece en la legislación, es decir, MA:

$$\sum_{i \in Z} QMR_i(1 - tr_i) \left(\sum_{k \in T} w_{ik} + \sum_{j \in A} \sum_{k \in T} x_{ijk} \right) \geq MA \quad (12)$$

En cada ubicación posible puede abrirse, como máximo, un *Acopio* de alguna de las capacidades/tamaños posibles:

$$\sum_{m \in M} y_{jm} \leq 1, \forall j \in A \quad (13)$$

Así mismo, la apertura y la asignación de capacidad para los *Transformadores* es regulada mediante la siguiente restricción:

$$\sum_{m \in M} z_{km} \leq 1, \forall k \in T \quad (14)$$

Además, se limita el número de *Acopios* que pueden abrirse:

$$\sum_{j \in A} \sum_{m \in M} y_{jm} \leq P \quad (15)$$

De manera análoga, se tiene una restricción para la cantidad de *Transformadores* a abrir en el sistema:

$$\sum_{k \in T} \sum_{m \in M} z_{km} \leq Q \quad (16)$$

No se pueden asignar *Zonas* a *Acopios* cerrados:

$$x_{ijk} \leq \sum_{m \in M} y_{jm}, \forall i \in Z, \forall j \in A, \forall k \in T \quad (17)$$

No se pueden asignar Zonas a Transformadores cerrados, aunque el flujo de materiales pase por un Acopio abierto:

$$x_{ijk} \leq \sum_{m \in M} z_{km}, \forall i \in Z, \forall j \in A, \forall k \in T \quad (18)$$

No se pueden asignar Zonas directamente a Transformadores cerrados:

$$w_{ik} \leq \sum_{m \in M} z_{km}, \forall i \in Z, \forall k \in T \quad (19)$$

Para garantizar la cobertura del sistema en todas las zonas, se definen restricciones relacionadas con el valor porcentual de material aprovechable recuperado de cada zona sobre el total recuperado por el sistema:

$$R_i = QMR_i(1 - tr_i) \left(\sum_{k \in T} w_{ik} + \sum_{j \in A} \sum_{k \in T} x_{ijk} \right), \forall i \in Z \quad (20)$$

$$R_{min} \leq R_i, \forall i \in Z \quad (21)$$

$$R_{max} \geq R_i, \forall i \in Z \quad (22)$$

$$R_{max} - R_{min} \leq \alpha \sum_{i \in Z} R_i \quad (23)$$

Finalmente, se establecen los rangos para las variables:

$$x_{ijk} \in R: 0 \leq x_{ijk} \leq 1 \quad (24)$$

$$w_{ik} \in R: 0 \leq w_{ik} \leq 1 \quad (25)$$

$$y_{jm} \in \{0,1\} \quad (26)$$

$$z_{km} \in \{0,1\} \quad (27)$$

$$R_i \in R: 0 \leq R_i \quad (28)$$

$$R_{min} \in R: 0 \leq R_{min} \quad (29)$$

$$R_{max} \in R: 0 \leq R_{max} \quad (30)$$

$$CT \in R: 0 \leq CT \quad (31)$$

$$IS \in R: 0 \leq IS \quad (32)$$

$$ES \in R: 0 \leq ES \quad (33)$$

A partir de este modelo, es posible generar distintos escenarios que permitirán obtener lineamientos útiles con respecto a la configuración de sistemas de reembolso de depósito para la recolección, clasificación y aprovechamiento de material de envases y empaques de vidrio, utilizando instalaciones propias y de terceros, y teniendo como aliada imprescindible a la fábrica de envases para garantizar la demanda del material que fluye a través del sistema. Además de esto, será posible estudiar escenarios en los que los depósitos no redimidos no pertenecen a la ORP, lo que podría pensarse como un incentivo para recoger y aprovechar envases por encima de la meta establecida por ley. En términos generales, el modelo matemático propuesto nos permitirá estudiar escenarios que incluyen varias de las estrategias de Responsabilidad Extendida del Productor, como son: el sistema de reembolso de depósito, una estrategia económica de REP basada en el mercado; un requerimiento de devolución; y unas regulaciones sobre la cantidad mínima que debe aprovechar cada productor con respecto a la cantidad de material que pone en el mercado. Para este fin, es necesario contar con una instancia construida a partir de datos reales o simulados, que nos permita realizar análisis y generar conclusiones al respecto.

En el siguiente capítulo, se presenta un caso de estudio construido con datos reales, a partir del cual se realizarán experimentos considerando distintos escenarios y variando parámetros representativos del modelo para entender mejor el comportamiento del sistema.

Capítulo 4

Diseño y análisis de experimentos

4.1 Caso de estudio: Envases no retornables en la zona MEDIO SINÚ

Con el fin de validar el modelo propuesto y obtener conclusiones a partir del mismo, se plantea un caso de estudio relacionado con envases no retornables de cerveza en el departamento de Córdoba (Colombia). Córdoba se encuentra ubicada en la zona norte de Colombia, Región Caribe, con una superficie de 25.020 kilómetros cuadrados y una población de 1.856.496 habitantes proyectada a 2022, existiendo una proporción de población rural de 48,4%, y contando con un 17,1% de población étnica según datos consultados en el Sistema de Estadísticas Territoriales – Terridata. Su participación en el PIB nacional es de 1,81%, siendo las categorías de Comercio, Agricultura, e Industrias manufactureras, las que incluyen las actividades económicas con mayor contribución (DNP & DANE, 2022). Según la Corporación Autónoma de los Valles del Sinú y del San Jorge (CVS), Córdoba se divide en siete subregiones ambientales basadas en características físicas, entre ellas, la zona denominada “MEDIO SINÚ”, conformada por los municipios de Cereté, San Carlos, San Pelayo y Ciénaga de Oro. Esta subregión se destaca por la producción de algodón, los cultivos transitorios, y por ser un sector ganadero conocido por la producción de carne y leche (CVS, 2022).

Para este estudio, se seleccionaron cuatro referencias de cerveza con envases no retornables (no reutilizables), y se realizó una recolección directa de información con actores de la zona, principalmente licoreras, con el fin de estimar la demanda de los productos seleccionados en cada municipio. Además de esto, se consultaron fuentes secundarias para mejorar la calidad de los datos de la instancia, tal como se describe a lo largo de esta sección.

Es importante resaltar que los datos recolectados para esta instancia (demanda estimada, acopios y transformadores existentes y potenciales, costo de arrendamiento semanal por metro cuadrado, entre otros), se obtuvieron a corte de abril de 2021, por lo que podrían contrastar con datos más recientes. Finalmente, la razón principal para seleccionar el “MEDIO SINÚ” como objeto de estudio, obedece a la falta de información oficial que cumpliera con las características necesarias para construir la instancia, sumado a la posibilidad del autor de este trabajo de recolectar la información de forma directa en estos municipios dada a su cercanía con su lugar de residencia. A continuación, se relaciona el proceso de construcción de este escenario.

- **Z:** Conjunto de zonas delimitadas geográficamente en las que se generan residuos de envases de productos de la ORP

Para este escenario, se escogió la subregión denominada MEDIO SINÚ, la cual se encuentra ubicada en el departamento de Córdoba como se observa en la figura 11. Esta zona está conformada por cuatro municipios que constituyen las zonas de influencia de la ORP. Las coordenadas de los centroides de cada municipio se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5. Centroides de las zonas de influencia de la ORP

<i>i</i>	Nombre del municipio	Coordenadas (Centroide)
1	Cereté	(8,885189 N, -75,790695 W)
2	Ciénaga de Oro	(8,877775 N, -75,621914 W)
3	San Pelayo	(8,962466 N, -75,835348 W)
4	San Carlos	(8,799382 N, -75,698832 W)

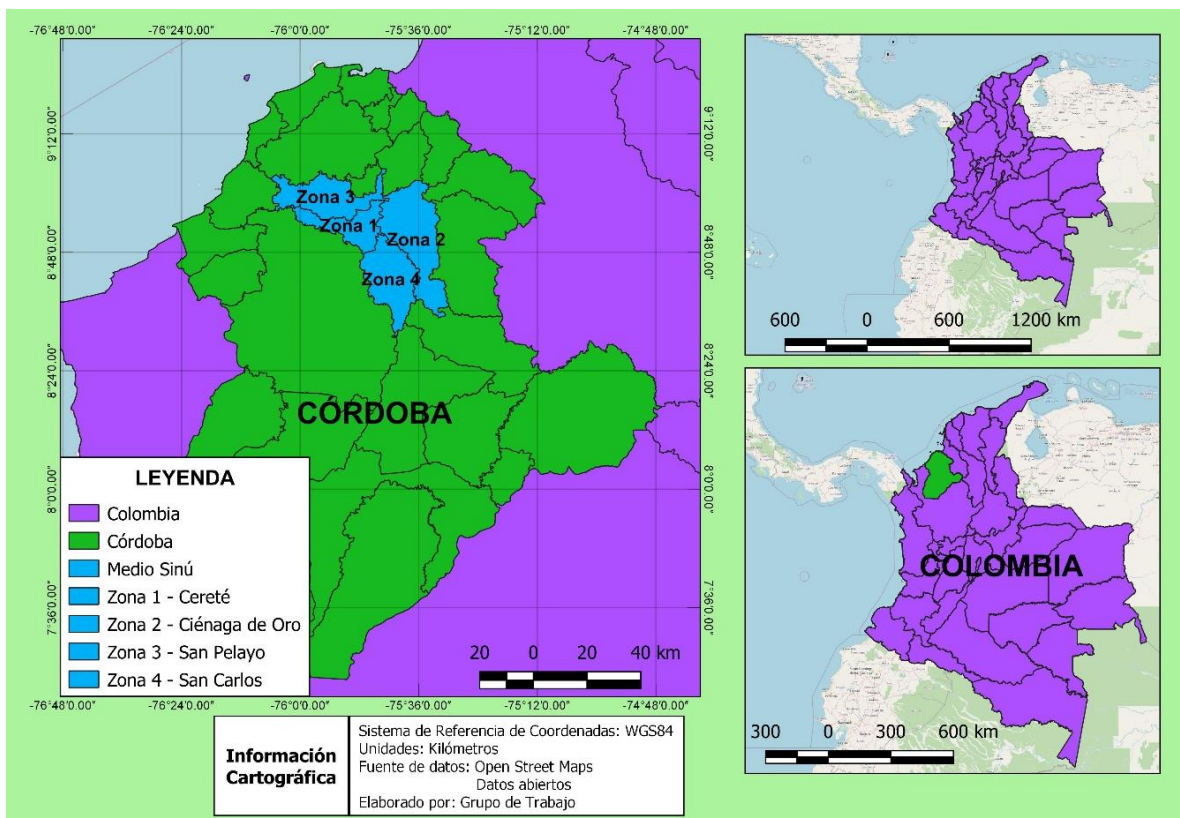


Figura 11. Localización de la subregión MEDIO SINÚ como zona de influencia de la ORP. Elaboración propia.

- **A: Conjunto de sitios potenciales para la ubicación de Acopios**

Dentro de la subregión seleccionada se escogieron siete sitios potenciales para la ubicación de acopios: dos de ellos hacen referencia a ECAs que operan actualmente, y que podrían tenerse en cuenta en la solución del sistema, mientras que los puntos restantes están determinados de acuerdo con las directrices del Plan Básico de Ordenamiento Territorial de cada municipio que comprende el MEDIO SINÚ (PBOT, 2018b, 2018a, 2018d, 2018c). Los sitios seleccionados se muestran a continuación:

Tabla 6. Puntos de sitios potenciales para la ubicación de acopios

j	Denominación del punto	Tipo	Coordenadas
1	Zona Industrial Ciénaga de Oro	Potencial	(8,870878 N, -75,615959 W)
2	ECA Areciclar Cereté	Existente	(8,845109 N, -75,828687 W)
3	ECA Asoreciclador de Córdoba y Sucre (Cereté)	Existente	(8,880206 N, -75,789719 W)
4	Acopio en Vía Cereté - Montería	Potencial	(8,853553 N, -75,802357 W)
5	Acopio en la vía Cereté – Ciénaga de Oro	Potencial	(8,881142 N, -75,700351 W)
6	Acopio en la vía Cotorra – San Pelayo	Potencial	(8,972415 N, -75,834800 W)
7	Acopio en la vía Cereté – San Carlos	Potencial	(8,808262 N, -75,699560 W)

Los puntos asociados a los sitios potenciales para la ubicación de acopios y los centroides de las zonas de influencia de la ORP se relacionan en la figura 12.

- **T: Conjunto de sitios potenciales para la ubicación de Transformadores**

Para la ubicación de sitios potenciales de transformadores se eligieron dos puntos, uno de ellos por fuera de la subregión MEDIO SINÚ, considerando los lineamientos dispuestos en el PBOT de cada municipio. Los sitios potenciales se muestran a continuación:

Tabla 7. Puntos de sitios potenciales para la ubicación de transformadores

K	Denominación del punto potencial	Tipo	Coordenadas
1	Transformador en la vía Montería – Planeta Rica	Potencial	(8,701936 N, -75,824690 W)
2	Transformador en la vía Cereté – Ciénaga de Oro	Potencial	(8,882776 N, -75,717796 W)

La ubicación geográfica de los puntos potenciales para la ubicación de transformadores se muestra en la figura 13.

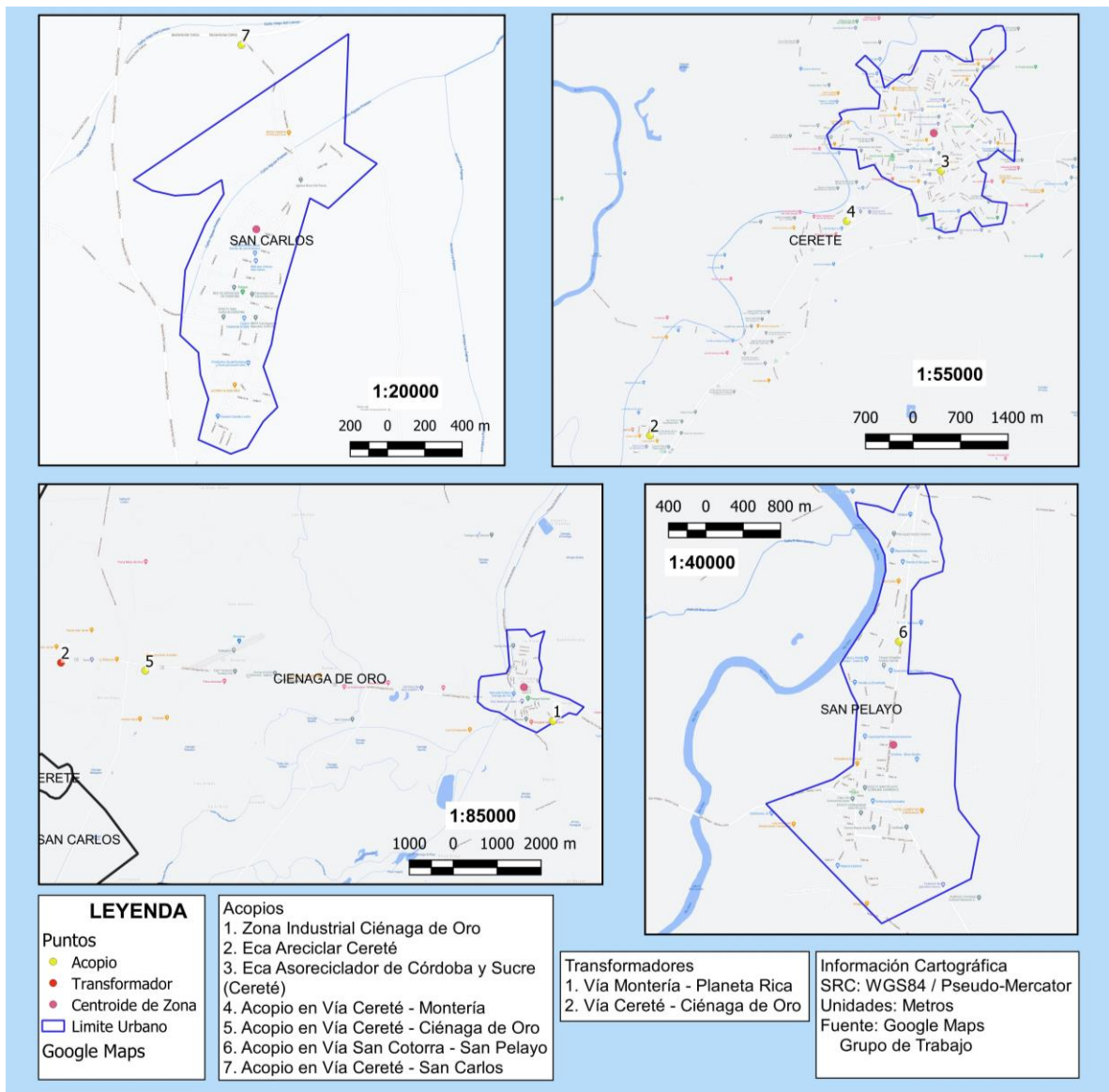


Figura 12. Localización de centroides de las zonas de influencia de la ORP y de los acopios existentes y potenciales para la subregión MEDIO SINÚ. Elaboración propia.

Tabla 8. Estimación de la capacidad de una instalación de tamaño m

m	Tipo de instalación	Área total (m ²)	% Dispuesto para envases de vidrio	Área dispuesta para almacenamiento de vidrio (m ²)	Unidades/m ²	CAP_m (Ton)
1	Pequeña	20,0	5,00%	1,00	2.000	0,38
2	Pequeña	30,0	10,0%	3,00	6.000	1,14
3	Pequeña	40,0	15,0%	6,00	12.000	2,28
4	Pequeña	50,0	20,0%	10,0	20.000	3,80
5	Pequeña	60,0	25,0%	15,0	30.000	5,70
6	Pequeña	70,0	30,0%	21,0	42.000	7,98

- **M: Conjunto de tamaños disponibles para la capacidad de las instalaciones**

Para este parámetro, las opciones planteadas se basan en la clasificación establecida en la Resolución 754 de 2014 (MVCT, 2014), la cual considera instalaciones de tres tamaños: (1) Pequeño (Área menor a 150 m²), (2) Mediano (Área entre 150 y 999 m²), y (3) Grande (Área igual o mayor a 1000 m²). Este tamaño incluye oficinas, zona de recepción y clasificación de material y, eventualmente, zonas de almacenamiento para otros materiales. En este caso, se incluyen seis tamaños potenciales para los acopios y transformadores, todos dentro de la categoría “Pequeño” debido a la demanda semanal estimada para el sistema. Además, para cada tamaño potencial, se propone un porcentaje para almacenamiento de envases de vidrio. La tabla 8 detalla el cálculo del área disponible para almacenamiento de vidrio.

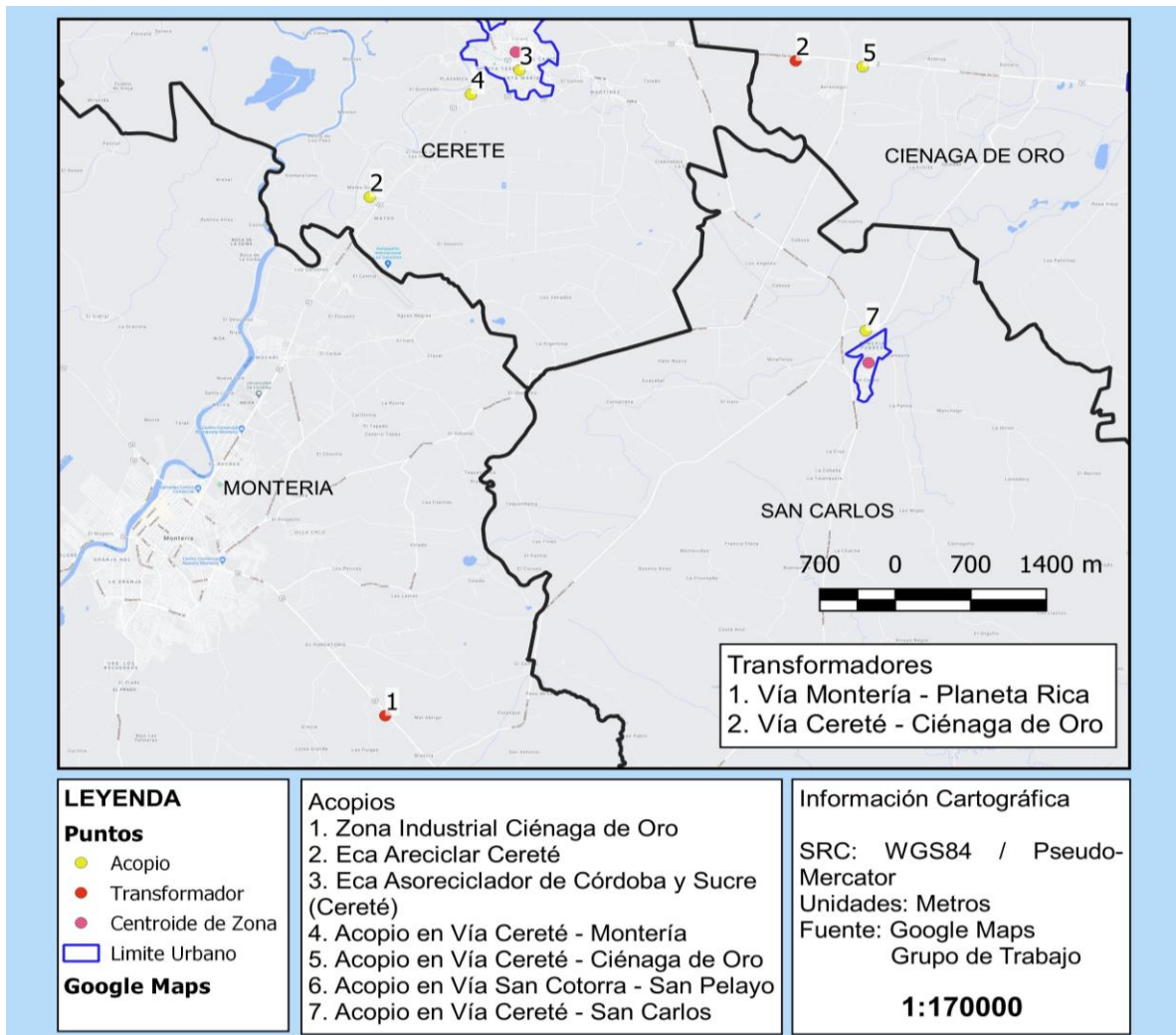


Figura 13. Localización de ubicaciones potenciales para la ubicación de transformadores en la subregión MEDIO SINÚ. Elaboración propia.

- **at_m : Área total de una instalación de tamaño m [m^2]**

Este parámetro constituye el área total de una instalación de tamaño m . Los valores para este escenario se resumen en la columna “Área total” de la tabla 8.

- **CAP_m : Capacidad de una instalación de tamaño m [Ton]**

Para esta variable, se tienen en cuenta los tamaños establecidos en el conjunto M . La capacidad en toneladas se calcula a partir de unidades de almacenamiento de 1 m^3 , en las cuales es posible almacenar aproximadamente 2.000 envases de vidrio no retornables. Cabe destacar que se tomó como referencia un peso promedio de 0,19 kg por envase almacenado. La tabla 8 resume la estimación de la capacidad en toneladas para cada opción según el área dispuesta para almacenamiento de vidrio.

- **te_i : Tasa efectiva de recuperación en la zona i [%]**

Debido a la inexistencia de un sistema para la recolección de este material con fines de aprovechamiento en la zona de estudio, no se tiene una tasa efectiva de recuperación para cada una de las zonas determinadas. Para efectos de este escenario, se tomará como referencia la tasa de aprovechamiento del servicio público de aseo estimada para la capital del departamento de Córdoba en 2019, la cual es del 11,0% (Superservicios, 2019b).

- **tr_i : Tasa de rechazo promedio de los materiales recuperados en la Zona i [%]**

Según datos obtenidos en una recolección piloto en la ECA Areciclar del municipio de Cereté (Córdoba), se tiene que la tasa de rechazo promedio del vidrio es del 23,6%. Considerando la falta de información en las demás zonas de influencia de la ORP, se opta por utilizar este dato para todas ellas basados en la premisa de que, al hacer parte de una misma subregión departamental, comparten dinámicas poblacionales similares.

- **$QMPM_i$: Peso total de envases y empaques puestos en el mercado por los productores de la ORP en la Zona i [Ton/Sem]**

En este punto, la estrategia utilizada para levantar los datos consistió en recolectar información de envases de vidrio no retornables para cuatro productos, los cuales, para efectos de este escenario, asumiremos que pertenecen a distintos productores. Además, se

calculó que el peso promedio de los envases para los cuatro productos es de 0,19 Kg/unidad, lo que permitió estimar el peso total censado y el valor semanal de este parámetro para todas las zonas. En la tabla 9 se resumen los datos recolectados por semana para los cuatro productos en las zonas de influencia de la ORP.

Tabla 9. Resultados del censo para estimar el peso de envases puestos en el mercado por los productores de la ORP

Zona	Unidades/Semana				Unidades totales por zona	Peso total censado por zona (Ton/Sem)
	Producto A	Producto B	Producto C	Producto D		
1	2042	1660	840	574	5116	0,95
2	420	0	0	48	468	0,087
3	3240	2424	144	0	5808	1,07
4	648	96	408	0	1152	0,21
TOTAL	6350	4180	1392	622	12544	2,32

Para obtener una estimación más precisa del volumen semanal generado por producto en cada zona, se calculó el volumen de vidrio que va a parar a los rellenos sanitarios a partir del promedio diario de residuos generados en cada municipio (Superservicios, 2020), y del porcentaje promedio de residuos de vidrio que se genera en los hogares (2,39%), cifra que se presenta en la caracterización de residuos sólidos de algunas ciudades de Colombia (DNP, 2016). Teniendo en cuenta que el resultado de esta estimación también incluye otros elementos, entre los cuales se encuentran envases de diversos productos que son elaborados con este material, decidimos calcular nuestro parámetro como un promedio simple entre los resultados derivados de esta estimación y los valores de la tabla 9. Los valores finales para el parámetro « $QMPM_i$ » se detallan en la tabla 10.

Tabla 10. Estimación del peso total de envases puestos en el mercado por los productores de la ORP a partir del censo realizado y de los datos obtenidos de la literatura

Zona	Peso total residuos generados en el municipio (Ton/día)	Peso estimado residuos de vidrio [2,39%] (Ton/Sem)	Peso total censado por zona [Tabla 9] (Ton/Sem)	$QMPM_i$ (Ton/Sem)
1	42,9	7,18	0,95	4,07
2	17,3	2,89	0,087	1,49
3	5,42	0,91	1,07	0,99
4	2,33	0,39	0,21	0,30
TOTAL	67,9	11,4	2,32	6,84

- **QMR_i : Peso máximo recuperable de envases y empaques en la Zona i [Ton/Sem]**

Para el cálculo de esta variable se utilizó la ecuación « $QMR_i = QMPM_i * te_i$ », la cual utiliza como valor de entrada el peso total de envases y empaques puestos en el mercado por los productores de la ORP en cada zona ($QMPM_i$), multiplicado por su respectiva tasa efectiva de recuperación (te_i). El resultado se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 11. Estimación del peso máximo recuperable por zona

Zona	$QMPM_i$ (Ton/Sem)	te_i	QMR_i (Ton/Sem)
1	4,07	11,0%	0,45
2	1,49	11,0%	0,16
3	0,99	11,0%	0,11
4	0,30	11,0%	0,03

- **MA : Meta de aprovechamiento de residuos de envases y empaques respecto al peso total puesto en el mercado en el año base [Ton/Sem]**

De acuerdo con la Resolución 1407 de 2018, la meta de aprovechamiento de residuos de envases de vidrio se calcula a partir de un año base que corresponde a tres años anteriores al año objeto del cálculo. Para este escenario, al no contar con la información específica para el periodo requerido, se decidió partir de los datos recolectados en el primer trimestre de 2021 y homologarlos con la meta de aprovechamiento que debía tenerse para este periodo. En otras palabras, el año base para el cálculo de la meta de 2021 debe ser 2018; sin embargo, al no contar con el peso total de residuos puestos en el mercado en 2018, se optó por utilizar datos estimados en 2021 para calcular la meta utilizada en el caso de estudio.

En este punto, se tiene en cuenta que el modelo matemático está diseñado para trabajar con demandas estimadas semanalmente, por lo cual, se establece una meta de aprovechamiento semanal a partir de la meta anual considerando un año de 52 semanas. En este sentido, cada solución del modelo debe superar la meta semanal de aprovechamiento que se establece en este parámetro para contribuir al cumplimiento de la meta anual.

Finalmente, el peso total de los residuos de vidrio generados en este escenario es de 356 toneladas anuales ($QMPM_i \times 52$ semanas). Así, dado que la meta de aprovechamiento proyectada es del 10,0% para el primer año, se tiene una meta de recolección anual de 35,6 toneladas, y semanal de 0,68 toneladas para 2021.

- **ec : Costo de amortización semanal de los equipos de transformación [COP/Sem]**

Para incluir los costos semanales de los puntos de transformación dentro del modelo, fue necesario definir un parámetro asociado partiendo del costo de una trituradora de vidrio. Para este escenario, se tiene un equipo por valor total de 7.000.000 COP, que se divide con una base de 10 años de depreciación y el valor anual se distribuye en 52 semanas. El valor usado para este parámetro es de 13.500 COP/Semana.

- **rc_j^1 : Costo de arrendamiento semanal por metro cuadrado en el sitio potencial para el Acopio j [COP/m²/Sem]**

Para obtener estos valores, se indagó sobre el costo de arrendamiento de bodegas en contraste con el área total de las mismas dentro de la subregión BAJO SINÚ. A partir de este ejercicio, se estimó un costo de 4.000 COP/m²/Semana, aplicable a las cuatro zonas.

- **rc_k^2 : Costo de arrendamiento semanal por metro cuadrado en el sitio potencial para el Transformador k [COP/m²/Sem]**

Teniendo en cuenta el ejercicio realizado en el punto anterior, el costo de arrendamiento semanal aproximado se estimó en 4.000 COP/m². Cabe destacar que, a partir de este parámetro, es posible establecer un costo diferente para cada punto si el escenario lo amerita, sin embargo, para este caso, los costos de arrendamiento por metro cuadrado son muy similares.

- **ct_{jk} : Costo de transporte de residuos desde Acopios hacia Transformadores [COP/Ton/Km]**

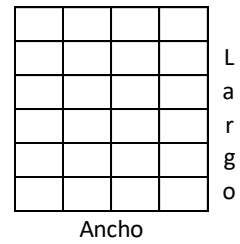
Dentro del sistema, el flujo de residuos está dado en términos de peso (Ton). En este sentido, es necesario que las unidades de las matrices de costo de transporte estén dadas en pesos colombianos por tonelada (COP/Ton). Como paso inicial, se calcula el costo por kilómetro de transportar una tonelada de residuos al interior del sistema. Para este fin, es necesario identificar qué constituye un paquete y cuántos paquetes se requieren para completar una tonelada: por una parte, los productos asociados a este escenario son comercializados en cajas de 24 unidades; con respecto a la cantidad de cajas necesarias para completar una tonelada, se toma como referencia el peso promedio de los envases (0,19 Kg/Unidad). Este procedimiento se resume en la figura 14.

Dimensiones de un envase promedio:

Ancho	5	cm
Largo	5	cm
Alto	20	cm

Dimensiones de una caja:

Ancho	20	cm
Largo	30	cm
Alto	20	cm

Caja

Peso promedio x envase:	0,19	Kg/unidad
Peso promedio x Caja (24 unid.):	4,56	Kg/caja
Peso promedio x Caja (TON):	0,005	Ton/caja
Cantidad de cajas necesarias para completar una tonelada:	219	Cajas

Figura 14. Cantidad de cajas en una tonelada para el cálculo del costo de transporte de residuos de envases. Elaboración propia.

Luego de lo anterior, se procede a calcular el costo de enviar un paquete con las características descritas. Para esto, se utiliza como referencia el simulador de costos de la empresa Servientrega, en el cual se identifica que esta empresa cobra 16.900 COP por transportar un paquete desde y hacia cualquier punto dentro de la zona de influencia de la ORP. Este valor aplica para todos los municipios del departamento de Córdoba, por lo cual, tomando como referencia los municipios más distantes entre ellos, San Bernardo del Viento y Ayapel, se tiene una distancia máxima de 224 Km. Teniendo en cuenta estos valores, se realiza el cálculo del costo de una tonelada por kilómetro recorrido dentro del sistema:

$$\frac{\left(16.900 \frac{COP}{Caja}\right) * \left(219 \frac{Cajas}{Ton}\right)}{224 Km} = 16.545 \frac{COP}{Ton} * Km \quad (34)$$

En este punto, se estima la distancia en kilómetros entre los centroides de las zonas, los puntos potenciales para acopios y transformadores. Ahora bien, con el valor calculado a partir de la ecuación 34, es posible expresar las matrices de costos en pesos por tonelada por kilómetro. La tabla 12 muestra las distancias y los valores expresados en COP/Ton/Km.

Tabla 12. Costo de transporte de residuos de envases y empaques desde el Acopio j hasta el Transformador k

	$j \backslash k$	Vía Montería – Planeta Rica		Vía Cereté – Ciénaga de Oro		
		1		2		
		Km	- COP/Ton/Km	Km	- COP/Ton/Km	
Acopios	Ciénaga Urbano	1	44,9	742.883	17,4	287.888
	Areciclar Cereté - Mateo Gómez	2	25,6	423.559	14,3	237.324
	Cereté - Asoreciclador Urbano	3	25,7	425.213	10,7	177.438
	Cereté Urbano	4	23,9	395.432	11,6	192.109
	Ciénaga de Oro Rural	5	45,3	749.501	12,3	203.507
	Acopio en Vía San Cotorra - San Pelayo	6	37,2	615.631	20,5	338.389
	Acopio en Vía Cereté - San Carlos	7	41,4	684.249	14,0	231.807

- **TA_j y TT_k : Parámetros binarios asociados a la pertenencia de instalaciones**

El modelo matemático cuenta con dos parámetros binarios que permiten indicar si una instalación pertenece o no a la ORP: TA_j para acopios, y TT_k para transformadores. Así, partiendo de la definición de los puntos para las instalaciones que se encuentran en las tablas 6 y 7, se establece un valor de cero para aquellas que ya existen dentro de las zonas de influencia y corresponden a entes externos, y un valor de uno para el resto de las instalaciones, cuyos puntos están definidos como potenciales y hacen referencia a lugares que podrían considerarse para la apertura de instalaciones de la ORP. Los valores definidos para ambos parámetros se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Parámetros binarios que establecen la pertenencia de las instalaciones

Índice	1	2	3	4	5	6	7
TA_j	1	0	0	1	1	1	1
TT_k	1	1					

- **α : Parámetro porcentual de cobertura**

Este parámetro se incluye en el modelo con el fin de garantizar la cobertura del sistema en la mayor cantidad de zonas posibles si se requiere. Está configurado como un valor porcentual que indica la diferencia máxima permitida entre los porcentajes de recuperación del sistema de la zona en la que menos se recupera y la que más se recupera. Estos porcentajes se calculan dividiendo el total recogido en cada zona sobre el total aprovechado por el sistema. Para el escenario base, su valor es de 50,0%.

- **ε : Valor que penaliza la apertura de instalaciones y la capacidad de entes externos**

Corresponde a un valor positivo cercano a cero, utilizado para regular el uso y la asignación de capacidades a entes externos. Para este caso, el parámetro « ε » se fija en 0,001.

- **P y Q : Cantidad máxima de instalaciones en el sistema**

Con estos parámetros, es posible definir la cantidad máxima de acopios (P) y transformadores (Q) que se pueden utilizar en el sistema. Para este escenario, se proponen valores máximos de cuatro y dos para « P » y « Q », respectivamente.

- **vma : Valor que corresponde al precio en el mercado del material aprovechable [COP/Ton]**

El valor correspondiente al vidrio como material aprovechable es de 250 COP/kg, es decir, unos 250.000 COP por tonelada en la zona de influencia de la ORP. Este dato es tomado por consulta a asociaciones de recicladores de oficio de la ciudad de Montería que comercializan este material a una empresa compradora a nivel nacional de residuos de vidrio para la fabricación de envases. Es importante mencionar que el mercado de este material se encuentra monopolizado en Colombia, lo que implica que el precio del material esté por debajo de lo que se esperaría y, en principio, haga poco atractivo recolectar vidrio frente a otro tipo de materiales aprovechables (Superservicios, 2019b).

- **ft : Incremento porcentual del valor del material asociado a la transformación [%]**

Este valor porcentual representa la proporción en la que aumenta el valor del material en el mercado una vez es transformado. Para el caso de estudio, asumiremos que este incremento es del 20,0% con respecto al precio del material en el mercado (vma).

- **vd : Valor del depósito para el sistema de reembolso [COP/Ton]**

Este dato es crucial para el funcionamiento del sistema. Representa el valor a devolver por cada envase que se recibe a través de las instalaciones de la ORP. Para el escenario base, este valor será 100 COP/envase, es decir, 526.316 COP/Ton. Para efectos de análisis, es posible expresar este parámetro como un porcentaje del valor del material en el mercado.

A continuación, se procede a validar el modelo partiendo del presente caso de estudio.

4.2 Validación del modelo

En esta sección, se detalla la forma de implementación del modelo, se menciona la instancia utilizada, se evalúan los criterios definidos para la validación en este trabajo, se describe la primera solución obtenida, y se mencionan algunas consideraciones derivadas de este análisis preliminar.

Primeramente, el modelo es implementado utilizando el lenguaje de programación Python (Van Rossum & Drake Jr, 1995), construido empleando Pyomo, un lenguaje de modelación de optimización de código abierto basado en Python (Bynum et al., 2021), y solucionado haciendo uso de Gurobi, un potente solucionador de optimización matemática con la capacidad de resolver problemas de alta complejidad (Gurobi Optimization, LLC, 2021).

A continuación, se ejecuta una instancia construida a partir de los parámetros definidos en la sección 4.1 para el modelo, partiendo del caso de estudio «Envases no retornables en la zona MEDIO SINÚ». En este punto, la solución obtenida apunta a que no existe una solución factible para nuestro modelo partiendo de los parámetros definidos en el caso de estudio, lo cual nos lleva a analizar que la cantidad disponible para recolección, luego de aplicar la *tasa efectiva de recuperación*, te_i , y la *tasa de rechazo*, tr_i , resulta insuficiente para cumplir con la meta mínima de aprovechamiento requerida. Así, para disponer de la cantidad requerida para obtener soluciones factibles, se hace necesario incrementar el valor de la *tasa efectiva de recuperación*, te_i , de 11% a un 15% para todas las zonas de influencia del sistema.

Con esto en mente, se obtiene una primera solución factible para la cual se verifica que los resultados sean coherentes con las consideraciones generales y las restricciones definidas. A continuación, se observa la descripción de los criterios establecidos y su respectiva validación:

Tabla 14. Criterios de validación para el modelo propuesto

Criterios de validación	CUMPLE	NO CUMPLE
Los residuos asignados a los acopios/transformadores no exceden su capacidad	X	
El material asignado al sistema no excede la cantidad generada en cada una de las zonas de influencia	X	
Los valores de las variables calculadas corresponden a lo establecido en su definición. Entre ellas: Costo de transporte, Costo de apertura de instalaciones, ingresos, egresos y utilidad del sistema.	X	
El sistema aprovecha, como mínimo, el valor definido como parámetro del modelo.	X	
El comportamiento de las variables de asignación de flujos de material, de apertura y de asignación de capacidad de las instalaciones, está conforme con las restricciones del modelo	X	

Con respecto a la solución óptima obtenida para esta corrida, el modelo sugiere dirigir directamente el material de todas las zonas hacia el *Transformador 1*, perteneciente a la ORP, para que sea procesado y almacenado semanalmente, asignándole una capacidad de 1,14 toneladas. La figura 15 describe mejor estas asignaciones.

Por otra parte, en la tabla 15 se observa que los ingresos por depósitos no redimidos representan el 82% del total de los ingresos, mientras que sólo una pequeña proporción proviene de la venta de materia prima transformada, cuya cantidad es equivalente a la mínima requerida. Esto podría explicarse debido a que la *tasa efectiva de recuperación* es baja, y el valor del material en el mercado, *vma*, es menor al valor del depósito en el escenario base, lo cual implica que al sistema le genere mayor utilidad quedarse con los depósitos no redimidos que volcar los recursos en torno a la recolección y aprovechamiento del material disponible en las zonas de influencia.

En este sentido, los costos en los que incurre el sistema se asocian a la apertura de una instalación transformadora y al pago de los depósitos correspondientes a la cantidad recolectada en esta instalación, sin embargo, dado que los productores le proporcionan a la ORP el valor de los depósitos y esta última los entrega a los usuarios del sistema cuando realizan la devolución de los envases, el valor de los depósitos redimidos no influye en el cálculo de la utilidad de la ORP.

Esta solución representa la mejor alternativa posible para optimizar la utilidad y cumplir con la meta de aprovechamiento, dados los parámetros del caso de estudio.

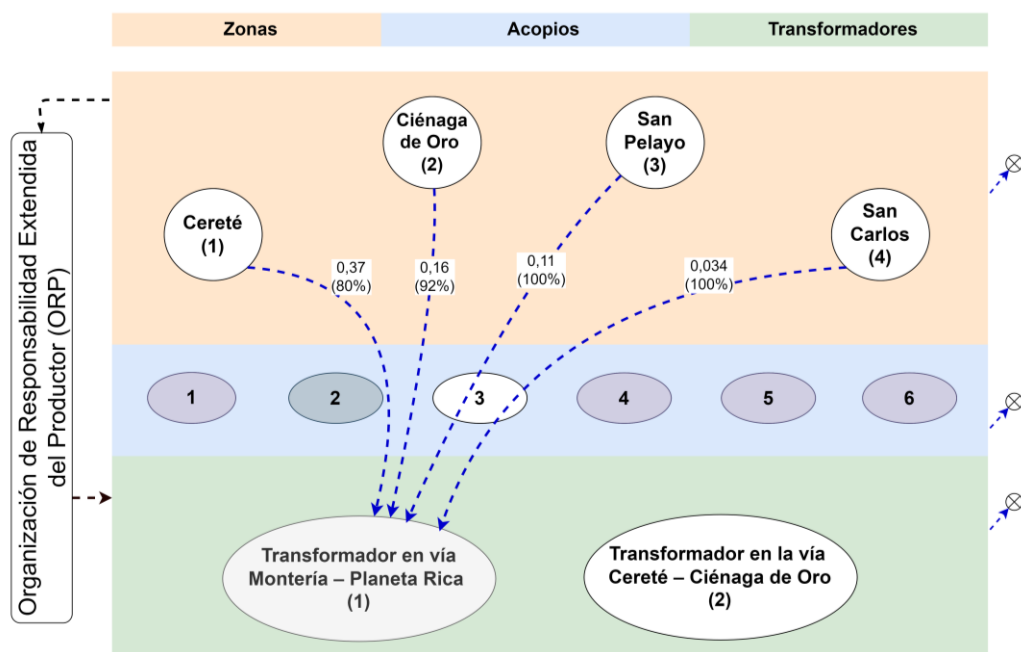


Figura 15. Solución del modelo para el caso de estudio planteado. Elaboración propia.

Tabla 15. Resumen de resultados de la solución del caso de estudio

Ingresos del sistema	COP/Sem	Ton/Sem
1.1 Ingresos por depósitos no redimidos	3.136.816	5,96
1.2 Ingresos por venta de material en el mercado	204.000	0,68
1.3 Ingresos por depósitos redimidos*	468.448	
<i>Subtotal</i>	3.809.264	
Egresos del sistema	COP/Sem	Ton/Sem
2.1.1 Costo de transporte entre Acopios de la ORP y cualquier transformador	-	-
2.1.2 Costo de transporte entre Acopios de entes externos y Transformadores de la ORP	-	-
2.2.1 Costo de apertura de Acopios	-	-
2.2.2 Costo de apertura de Transformadores	133.500	0,68
2.3 Pago de depósitos*	468.448	-
2.4 Costo de adquisición de material transformado por un ente externo	-	-
2.5 Costo de usar instalaciones de un ente externo para transformar material	-	-
2.6 Costo de adquisición de material sin transformar clasificado por un ente externo	-	-
<i>Subtotal</i>	601.948	
Utilidad: Ingresos - Egresos	3.207.316	

* Depósitos que ingresan a la ORP para luego ser pagados a los usuarios del sistema en el momento de la devolución del envase

El resultado de este ejercicio nos permite identificar ciertos comportamientos y tendencias clave para diseñar los experimentos. A continuación, se mencionan algunas consideraciones derivadas del análisis de la solución asociada al caso de estudio:

- La cantidad total aprovechada por el sistema fue igual a la cantidad mínima exigida por la ley, además, el modelo priorizó la apertura de instalaciones propias. Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario estudiar en qué condiciones el sistema recogería cantidades mayores a la meta mínima, en qué casos se recomienda usar instalaciones de entes externos y cómo esto se relaciona con la cantidad de material disponible en el sistema, el valor del material en el mercado y el valor del depósito. Concretamente, se pretende analizar el comportamiento del sistema en dos frentes específicos: utilidad y capacidad instalada.
- La participación excesiva de los depósitos no redimidos sobre los ingresos sugiere investigar cómo se distribuirían los ingresos si los depósitos no redimidos no se consideraran ingresos de la ORP. En este sentido, nos proponemos desarrollar un modelo matemático alternativo que no considera los depósitos no redimidos como ingresos de la ORP para estudiar el comportamiento del sistema en estas condiciones.

- La meta de aprovechamiento del sistema es dinámica con respecto al tiempo según lo planteado en la legislación. Esta particularidad implica analizar cómo evoluciona el sistema a través del tiempo con respecto a este parámetro y qué implicaciones podría tener para los productores que conforman la ORP.

Partiendo de las consideraciones anteriores, se definirán dos experimentos que apoyarán el análisis para la generación de lineamientos y recomendaciones para las pequeñas y medianas empresas con respecto a la configuración de sistemas de reembolso de depósito en el marco de la responsabilidad extendida del productor, como estrategia de economía circular que pone a los productores al frente de la gestión de los residuos de los envases y empaques que ponen en el mercado.

4.3 Diseño de experimentos

Una vez se tienen los resultados del numeral anterior, se procede a la construcción de experimentos con fines analíticos como apoyo a la toma de decisiones. En esta sección se detalla la planeación de los experimentos que se correrán mediante variaciones de los parámetros en el escenario base estudiado en la sección 4.2, haciendo uso del modelo propuesto.

4.3.1 Experimento 1: Análisis de utilidad y capacidad instalada

Teniendo en cuenta la necesidad de analizar el comportamiento del sistema desde los ámbitos económico y ambiental, se plantea un análisis factorial general con el objetivo de estudiar el comportamiento del valor de la función objetivo y la capacidad instalada a partir de la variación de cuatro parámetros, manteniendo constantes las demás condiciones de la instancia base. Los factores cuyos valores serán objeto de experimentación, son: (1) valor que corresponde al precio del material en el mercado, vma , que variará entre cero y 500.000 COP/Ton, con intervalos de 50.000 COP/Ton; (2) valor del depósito para el sistema de reembolso, vd , que será analizado para el mismo rango de valores que « vma »; (3) tasa efectiva de recuperación en la Zona i , te_i , cuyo valor mínimo será del 15% por temas de factibilidad de las soluciones, y se aumentará hasta 95% con intervalos de 20%; y (4) tasa de rechazo promedio de los materiales recuperados en la Zona i , tr_i , que tendrá un valor mínimo de 0%, y se incrementará hasta 25% por temas de factibilidad, con intervalos de 5%. Los cuatro factores y los niveles de factor para el experimento se resumen en la tabla 16.

Tabla 16. Resumen de factores y niveles para el experimento

<i>Factores</i>	<i>vma</i> [COP/Ton]	<i>vd</i> [COP/Ton]	<i>te_i</i>	<i>tr_i</i>
	0	0	15%	0%
	50.000	50.000	35%	5%
	100.000	100.000	55%	10%
	150.000	150.000	75%	15%
	200.000	200.000	95%	20%
<i>Niveles de factor</i>	250.000	250.000		25%
	300.000	300.000		
	350.000	350.000		
	400.000	400.000		
	450.000	450.000		
	500.000	500.000		

Además de lo anterior, dada la alta participación de los depósitos no redimidos en los ingresos totales del sistema para el escenario base, se correrá el experimento anterior para un modelo matemático alternativo en el cual se excluyen los depósitos no redimidos de los ingresos del sistema. Así, se corren 3.630 instancias con dos modelos matemáticos, para un total de 7.260 corridas.

4.3.2 Experimento 2: Evolución del escenario base 2021-2030

Como se menciona en secciones anteriores, la meta propuesta por la Resolución 1407 (2018) no es estática. Inicialmente, se debe aprovechar, como mínimo, el 10,0% de los envases y empaques puestos en el mercado, teniendo como base el tercer año previo a la implementación del plan, sin embargo, esa meta se incrementa gradualmente desde el año 2021, hasta llegar a un 30,0% en 2030. La figura 16 muestra las variaciones porcentuales de la meta entre los años 2021 y 2030.

Con esto en mente, se hace necesario analizar cómo evoluciona el sistema con respecto a la utilidad y en términos de capacidad conforme se va incrementando la meta de aprovechamiento. Además, teniendo en cuenta que el comportamiento de la población puede cambiar, se incluye en este experimento la tasa efectiva de recuperación en la Zona i , te_i . Por último, en aras de validar la influencia del valor del depósito en esta evolución, se incluirá también este componente del sistema, variando su valor entre el 50% y el 150% del valor del material en el mercado, con intervalos del 10%. Los factores y niveles para este experimento se detallan en la tabla 17.

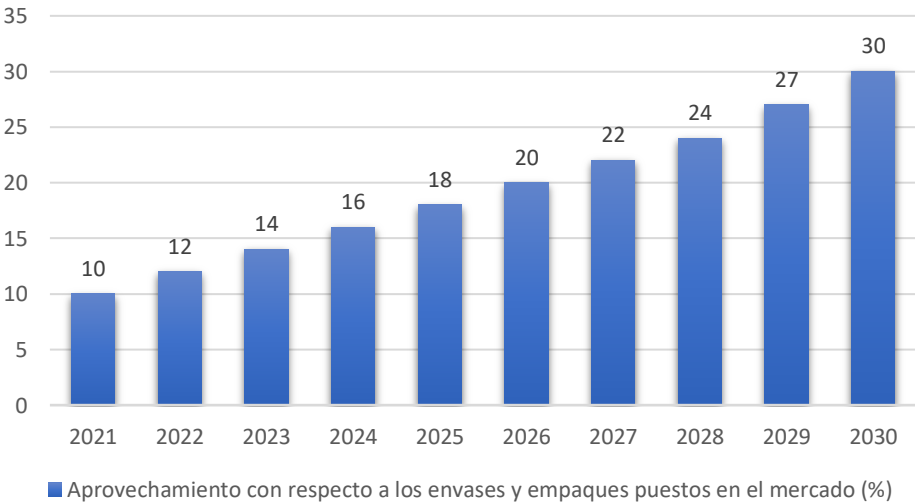


Figura 16. Metas de aprovechamiento entre el 2021 y el 2030. Adaptado de “El ABC de la resolución 1407 de 2018” (p. 7), por Cempre Colombia, 2018, Cempre Colombia.

Cabe resaltar que, al no contar con datos históricos para estimar la cantidad de envases puestos en el mercado por los productores que hacen parte de la ORP, se opta por utilizar la cantidad definida en la sección 4.1 para calcular la meta proyectada para los años 2021 a 2030, es decir, 356 toneladas anuales. Para efectos del modelo matemático, la meta de aprovechamiento semanal «MA» se calcula multiplicando 356 toneladas por el porcentaje de aprovechamiento requerido para cada año, y se obtiene el valor final utilizando una base de 52 semanas/año.

Finalmente, con fines analíticos, este experimento se realizará también utilizando un modelo matemático alternativo que excluya los depósitos no redimidos de los ingresos del sistema, por lo cual, se tendrán 550 instancias con dos modelos, para un total de 1.100 corridas.

Tabla 17. Resumen de factores y niveles para el experimento

		Año	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Valores de referencia para el cálculo	Porcentaje de aprovechamiento (Res. 1407, 2018)		10%	12%	14%	16%	18%	20%	22%	24%	27%	30%
	Meta anual estimada		36	43	50	57	64	71	78	85	96	107
	MA [Ton/Semana]		0,68	0,82	0,96	1,10	1,23	1,37	1,51	1,64	1,85	2,05
Factores	te_i		15%	35%	55%	75%	95%					
								<i>vma</i> *	50%:	125000		
								<i>vma</i> *	60%:	150000		
								<i>vma</i> *	70%:	175000		
								<i>vma</i> *	80%:	200000		
								<i>vma</i> *	90%:	225000		
								<i>vma</i> *	100%:	250000		
								<i>vma</i> *	110%:	275000		
								<i>vma</i> *	120%:	300000		
								<i>vma</i> *	130%:	325000		
								<i>vma</i> *	140%:	350000		
								<i>vma</i> *	150%:	375000		
		vd [COP/Ton]										

4.4 Análisis de resultados

En esta sección se analizan los resultados de los casos planteados en el numeral anterior. Incluye gráficas, análisis y conclusiones parciales de la investigación asociados a cada experimento.

4.4.1 Experimento 1: Análisis de utilidad y capacidad instalada

Inicialmente, se realiza un análisis descriptivo con el fin de indagar sobre el comportamiento de la utilidad con respecto al valor del depósito y al valor del material en el mercado en ambos modelos: principal y alternativo, siendo este último el que no considera los depósitos no redimidos como parte de los ingresos del sistema. Para estos efectos, los niveles de «vd» y «vma» son expresados en términos porcentuales, teniendo como base el valor del material en el mercado del caso de estudio, es decir, 250.000 COP/Ton.

Con este entendimiento, a partir de las figuras 17(a) y 17(b), es posible afirmar que los valores de utilidad para el modelo principal siguen una distribución aproximadamente normal, con una media y una mediana por encima de 1.500.000 COP/Semana. En contraste, el modelo alternativo presenta una distribución con sesgo a la derecha, presentando una alta concentración de los datos en la zona baja de la gráfica, con el 75% de los valores por debajo de 1.500.000 COP/Semana, una media inferior a 500.000 COP/Semana y una mediana menor a 1.000.000 COP/Semana.

Por su parte, en las figuras 17(c) y 17(d) observamos que la media y la mediana de la utilidad van aumentando para ambos modelos conforme se incrementa «vma», sin embargo, mientras que en el modelo principal evidenciamos una alta variabilidad de la utilidad en todos los niveles de «vma», en el modelo alternativo esta variabilidad es pequeña para valores bajos de «vma» y va aumentando de forma progresiva.

Con respecto a las gráficas que contrastan los valores de utilidad con los niveles del valor del depósito, figuras 17(e) y 17(f), puede evidenciarse una diferencia marcada entre ambos modelos: en el modelo principal la media y la mediana se incrementan conforme aumenta el valor del depósito, lo cual también parece tener incidencia sobre la variabilidad de la utilidad; en contraste, el modelo alternativo muestra una utilidad que permanece constante ante el aumento de «vd». Esto último podría esperarse teniendo en cuenta que, al no contar con los valores de los depósitos no redimidos como parte de los ingresos del sistema, el valor de «vd» no impactará en la utilidad del sistema.

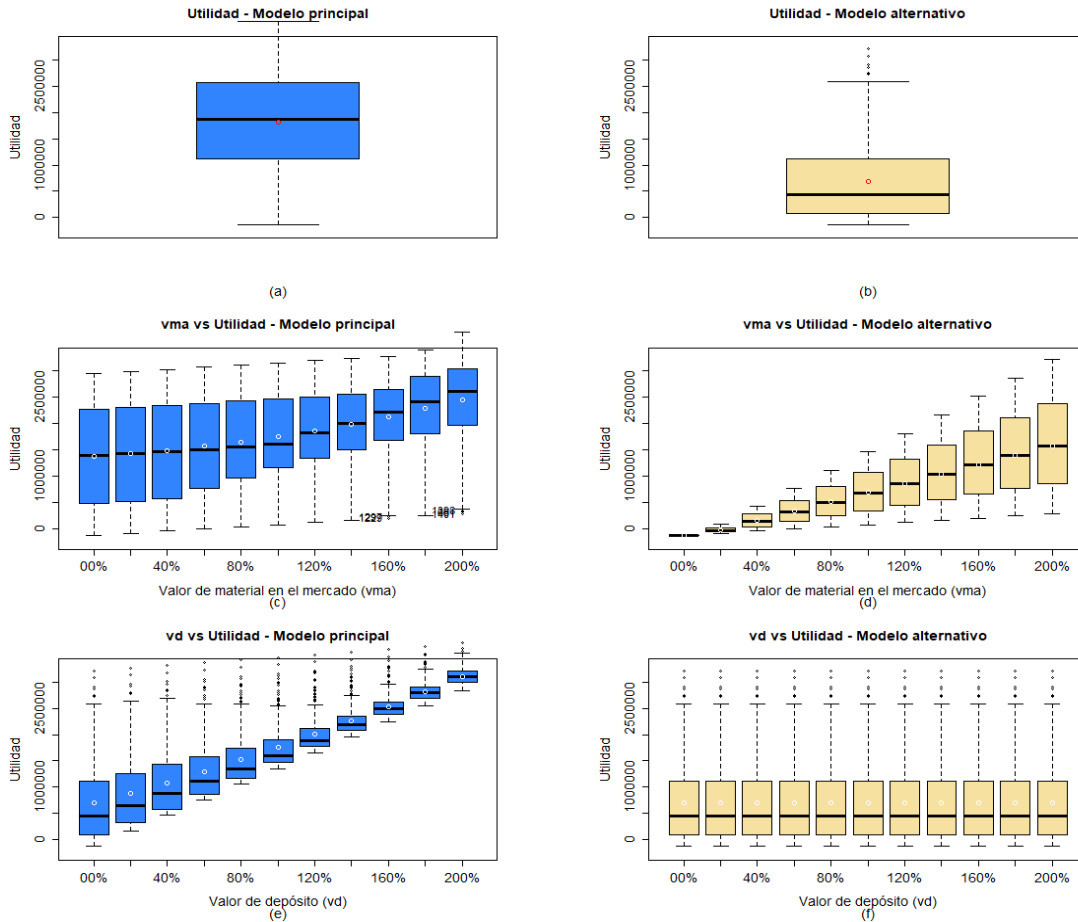


Figura 17. Descripción gráfica de la utilidad. (a) Utilidad del modelo principal, (b) Utilidad de modelo alternativo, (c) Utilidad en el modelo principal versus «vma», (d) Utilidad en el modelo alternativo versus «vma», (e) Utilidad en el modelo principal versus «vd», y (f) Utilidad en el modelo alternativo versus «vd». Elaboración propia.

Ahora bien, teniendo como punto de partida el análisis descriptivo, extraemos un primer subconjunto de experimentos para estudiar cómo influyen «vma», «vd» y la tasa efectiva de recuperación, te_i , en la utilidad del sistema. En este sentido, se incluyen los experimentos en los cuales varía « te_i » y «vd» según los niveles de factor definidos en el experimento 1, considerando que, para efectos de interpretación, «vd» se expresará como un porcentaje «vma», mientras tanto, para «vma» y « tr_i », se fijan los valores de 250.000 COP/Ton y 15%, respectivamente. Con este ejercicio, se obtiene una base de 55 instancias para cada modelo.

Posteriormente, se toma un segundo subconjunto de experimentos para indagar sobre el comportamiento de la capacidad instalada en el sistema con respecto al valor del depósito, el cual nuevamente es expresado como un porcentaje de «vma». En este ejercicio, se varía « te_i », «vd» y « tr_i » según los niveles de factor definidos en el experimento 1, y se fija el valor de «vma» en 250.000 COP/Ton. Finalmente, se cuenta con un grupo de 330 instancias para cada modelo.

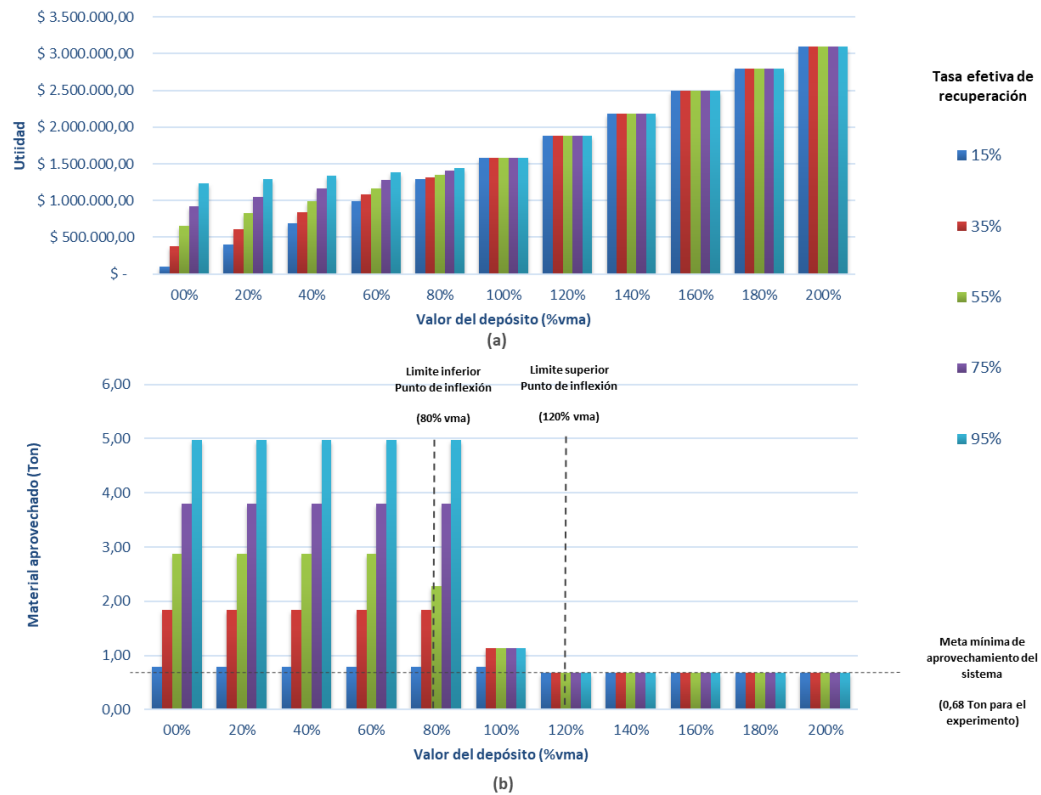


Figura 18. Experimentos para el análisis de la utilidad - modelo principal. (a) Utilidad versus «vd» para distintos niveles de «te_i», (b) Material aprovechado por el sistema versus «vd» para distintos niveles de «te_i». Elaboración propia.

Para el primer subconjunto de experimentos usando el *modelo principal* (figura 18), encontramos que existe un rango de valores de «vd» con respecto a «vma» dentro del cual se ubica un punto de inflexión que marca un cambio en el comportamiento del sistema: el rango está entre el 80% y el 120% del valor de «vma», y el punto se estima restando la tasa de rechazo a 120%⁶. Por ejemplo, si la tasa de rechazo es del 1%, el punto de inflexión será cercano a 119% del valor de «vma». En nuestro caso, la tasa de rechazo se fijó en 15%, por lo cual, el valor de «vd» que corresponde al punto de inflexión será cercano a 105% del valor de «vma». En adelante, nos referiremos a este punto como «pi».

⁶ Para hallar el rango porcentual de «vd» con respecto a «vma» en el que cambia el comportamiento del sistema que depende de la tasa de rechazo, se realizaron experimentos adicionales entre 75% y 120%, variando la tasa de rechazo desde 0% hasta 45%, obteniendo el rango de inflexión de 80% a 120% de «vma» y la forma de calcular el punto.

En este orden de ideas, cuando el valor del depósito es inferior a « p_i », el incremento en « te_i » tiene un impacto sobre la utilidad del sistema: a mayor tasa de recuperación y mayor « vd », mayor utilidad. Este comportamiento puede argumentarse desde los costos: si el valor del depósito es pequeño con respecto a « vma », el sistema verá atractivo el precio del material en el mercado y optará por recuperar, transformar y vender material para cubrir sus costos y aumentar la utilidad. En este sentido, para valores del depósito menores a « p_i », una estrategia funcional podría ser incentivar la recuperación de material para aumentar la utilidad considerando que la cantidad de material aprovechado por el sistema dependerá de la tasa efectiva de recuperación y de la tasa de rechazo. Puntualmente, en este rango funciona la política de recoger la mayor cantidad de material posible, sin embargo, a medida que « vd » se acerca a « p_i », se hace más atractivo sustentar los ingresos en los depósitos no redimidos, por lo cual, el sistema empieza a utilizar la política de abrir las instalaciones con la capacidad necesaria para cumplir con la meta y recoger todo lo que pueda almacenar en estas instalaciones más allá de la meta, sustentando el resto de la utilidad en depósitos no redimidos, como se observa en la figura 18(b) para valores de depósito del 100% de « vma ».

En contraste, cuando « vd » es mayor o igual a « p_i », la utilidad aumenta sin verse influenciada por la tasa efectiva de recuperación, sin embargo, el sistema se limita a aprovechar la cantidad de material correspondiente a la meta definida, como se observa en la figura 18 (b).

Partiendo de lo anterior, desde el punto de vista económico se recomienda aumentar el valor del depósito para incrementar la utilidad del sistema, sin embargo, de cara al componente ambiental, se sugiere que el valor del depósito sea inferior a « p_i », e incentivar un aumento en la tasa efectiva de recuperación a través de campañas de formación y concientización en la población, para aumentar la cantidad de material disponible para su recuperación y aprovechamiento.

Entre tanto, para el segundo subconjunto de experimentos usando el *modelo principal*, la figura 19 muestra el comportamiento de la capacidad instalada. Inicialmente, se debe considerar que la necesidad de instalación de capacidad se deriva de un requerimiento de recolección de material que debe estar disponible dentro del sistema, dicha disponibilidad está determinada por parámetros como « $QMPM_i$ », « te_i » y « tr_i ». Con esto en mente, observamos que el modelo sugiere abrir instalaciones de la ORP para todas las instancias evaluadas para recoger, aprovechar y transformar material. Más aún, cuando « vd » es inferior a « p_i », el modelo sugiere

aprovechar la mayor cantidad de material disponible e instalar capacidad en consecuencia, sin embargo, a medida que el valor de «vd» aumenta, la capacidad instalada por el sistema disminuye, lo que nos permite afirmar que, para este rango, a menor «vd», es más atractivo para la ORP en términos económicos recoger la mayor cantidad de material posible usando infraestructura propia, opción que también favorece el componente ambiental.

Por otro lado, para valores de «vd» mayores o iguales a «pi», las soluciones óptimas en términos económicos sugieren recoger sólo lo suficiente para cumplir con la meta de aprovechamiento establecida y la capacidad instalada de la ORP corresponde a la suficiente para cumplir con la meta definida. Por consiguiente, la capacidad instalada permanece constante ante el aumento de «vd». A partir de este punto, independientemente del valor de la tasa efectiva de recuperación y de la tasa de rechazo, deja de ser atractivo para el sistema en términos económicos la recuperación y el aprovechamiento de material: los depósitos no redimidos se convierten en la fuente principal de ingresos del sistema, lo que implica recoger lo menos posible para maximizar la utilidad.

Partiendo de lo anterior, para valores de depósito mayores o iguales a «pi», observamos que los experimentos sugieren abrir únicamente instalaciones de la ORP, teniendo en cuenta sólo aquellas necesarias para el proceso de transformación, y asignando directamente el flujo de material desde las zonas hasta estas instalaciones. A propósito de la capacidad instalada, la figura 19 muestra una reducción progresiva como resultado del promedio de instancias distintas, sin embargo, este corresponde a una única disminución por instancia que se da a partir de «pi», y permanece constante para valores mayores de «vd».

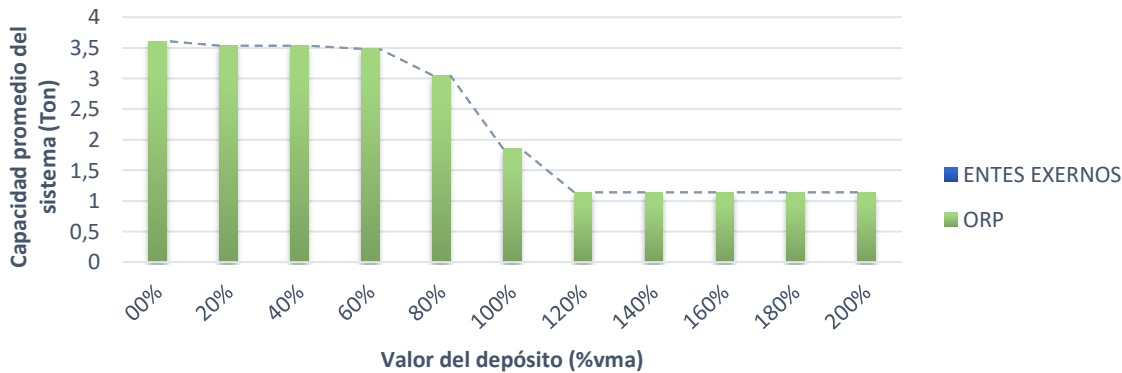


Figura 19. Experimentos para el análisis de la capacidad instalada - modelo principal. Capacidad instalada por el sistema versus «vd» distribuido entre capacidad de la ORP y entes externos. Elaboración propia.

Finalmente, para valores de depósito iguales o superiores a « pi », el modelo recomienda dejar de pagar depósitos para priorizar la incorporación de los depósitos no redimidos como ingresos del sistema. Para este rango de valores de « vd » con respecto a « vma », a mayor « vd », mayor será la utilidad del sistema, sin que haya un incremento en la cantidad de material recuperado más allá de la meta. En consecuencia, aumentar el depósito tanto como sea posible, por encima del valor del material en el mercado, podría ser un lineamiento óptimo en términos económicos para la ORP, pero poco recomendable desde el punto de vista ambiental ya que no incentiva al sistema a la recolección de material más allá de lo necesario para alcanzar la meta de aprovechamiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, las conclusiones sobre los resultados del modelo principal se resumen en la tabla 18.

Tabla 18. Conclusiones para el modelo principal

Rango para el valor del depósito	Descripción
$vd < pi$	A mayor tasa efectiva de recuperación y mayor « vd », mayor utilidad.
	A menor « vd », es más atractivo para la ORP en términos económicos recoger material usando infraestructura propia para maximizar la utilidad. Se recoge la mayor cantidad de material posible.
	Cuando « vd » aumenta, la capacidad instalada disminuye.
$pi \leq vd$	A mayor « vd », mayor utilidad. La cantidad de material recuperado se mantiene constante y corresponde a la meta mínima de aprovechamiento.
	Independientemente del valor de la tasa efectiva de recuperación y de la tasa de rechazo, no es atractivo para el sistema en términos económicos la recuperación y el aprovechamiento de material. Se utiliza la infraestructura de costo mínimo, preferiblemente de la ORP, para cumplir con la meta.
	Cuando « vd » aumenta, la capacidad instalada se mantiene constante.

Con respecto al primer subconjunto de experimentos utilizando el *modelo alternativo*, los resultados contrastan con respecto al *modelo principal* debido a que los depósitos no redimidos no se toman como parte de la utilidad del sistema. En este caso, independientemente del valor del depósito, es atractivo recoger la mayor cantidad de material posible para maximizar la utilidad. Así, la utilidad permanece constante ante el aumento de « vd » y depende de la tasa efectiva de recuperación y de la tasa de rechazo, como se observa en la figura 20(a). Por su parte, la cantidad de material aprovechado permanece constante ante el aumento del valor del depósito con respecto a « vma », como se muestra en la figura 20(b).

Para cualquier instancia del *modelo alternativo*, la utilidad dependerá principalmente de la tasa de rechazo en cada zona, de la tasa efectiva de recuperación, y de los valores definidos para los parámetros iniciales en términos de costos en cada caso particular.

Con relación al segundo subconjunto de experimentos que corresponde a la capacidad instalada, el comportamiento del *modelo alternativo* se describe en la figura 21: independientemente del valor del depósito, es atractivo para el modelo recoger y aprovechar la mayor cantidad de material posible utilizando instalaciones de la ORP para optimizar la utilidad. De acuerdo con el comportamiento observado en la capacidad instalada, los resultados obtenidos son razonables considerando que los depósitos no redimidos no aportan a los ingresos del sistema, por lo cual, sólo se cuenta con el valor del material en el mercado como fuente de ingresos.

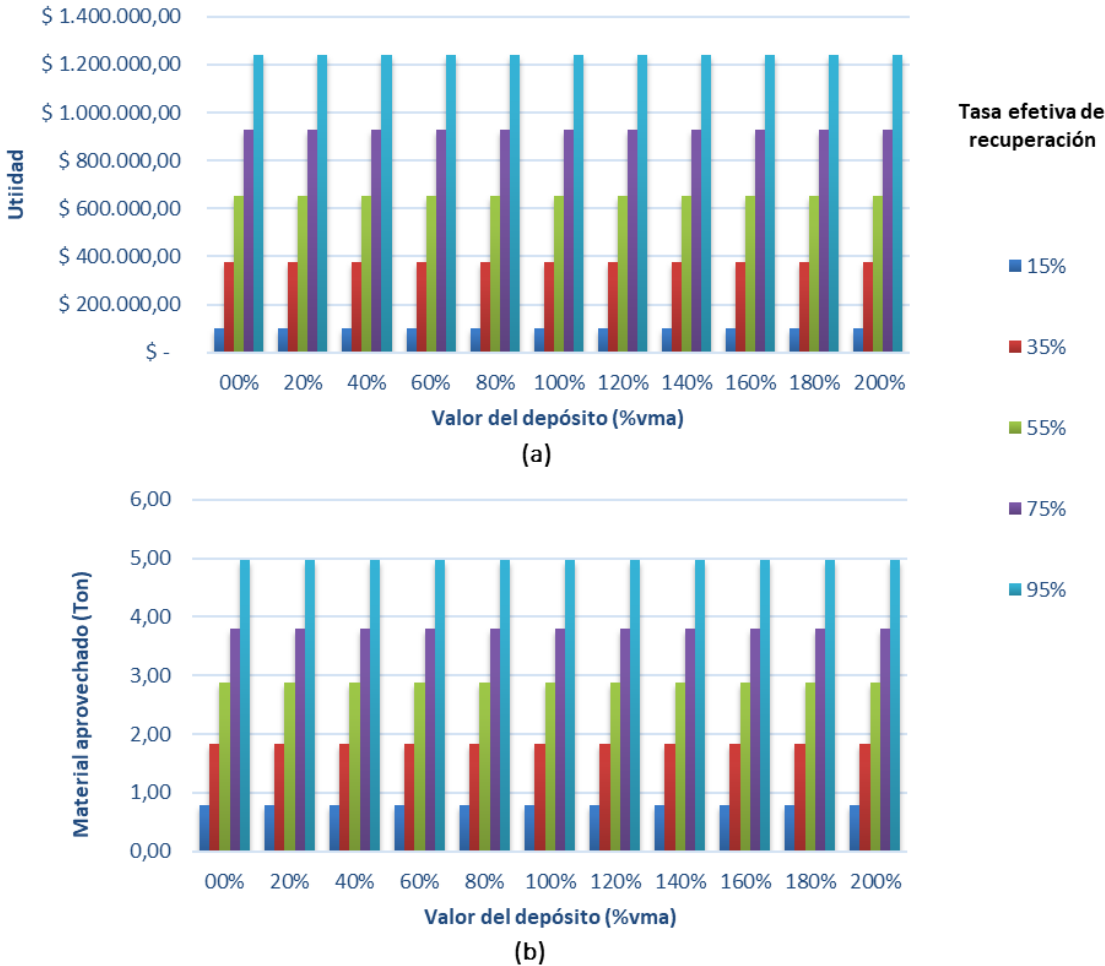


Figura 20. Experimentos para el análisis de la utilidad - modelo alternativo. (a) Utilidad versus «vd» para distintos niveles de «te_i», (b) Material aprovechado por el sistema versus «vd» para distintos niveles de «te_i». Elaboración propia.



Figura 21. Experimentos para el análisis de la capacidad instalada - modelo alternativo. Capacidad instalada por el sistema versus «vd» distribuido entre capacidad de la ORP y entes externos. Elaboración propia.

En este sentido, para el *modelo alternativo* se tiene que:

Tabla 19. Conclusiones para el modelo alternativo

Ítem	Descripción
1	A mayor tasa efectiva de recuperación, mayor utilidad.
2	Es atractivo para la ORP en términos económicos recoger material usando infraestructura propia para maximizar la utilidad. Se recoge la mayor cantidad de material posible.
3	Cuando «vd» aumenta, la capacidad instalada no se ve afectada.

Es de anotar que el valor del material en el mercado juega un papel fundamental en el comportamiento del sistema: de este depende que sea viable en términos económicos la recolección de material, y se convierte en el punto de partida para fijar el valor del depósito en el modelo principal.

En términos generales, si analizamos el comportamiento de ambos modelos desde un enfoque económico, podríamos decir que lo más conveniente es usar los depósitos no redimidos como parte de los ingresos de la ORP, ya que, para valores de «vd» mayores a cero, la utilidad del modelo principal supera a la del modelo alternativo en todos los casos si se comparan par a par las instancias del mismo tipo, y se va incrementando gradualmente conforme «vd» aumenta. En resumen, para optimizar la utilidad, se recomienda incluir los depósitos no redimidos en los ingresos del sistema e incrementar el valor de «vd» tanto como sea posible de acuerdo con las restricciones específicas del mercado o sector, haciendo énfasis en que este depósito se cobra junto con el precio del producto.

Si realizamos este mismo análisis teniendo en mente el objetivo ambiental, las figuras 18(b) y 20(b) nos muestran que ambos modelos presentan niveles máximos de material aprovechado para valores de «vd» iguales o inferiores al 60% del valor del material en el mercado; conforme a esto, para optimizar la recolección, se recomienda: (1) utilizar el modelo alternativo, el cual siempre tendrá incentivos para recoger la mayor cantidad de material posible; o (2) emplear el modelo principal, permitiendo que la ORP tenga los depósitos no redimidos como parte de sus ingresos, manteniendo el valor de «vd» en niveles cercanos al 60% de «vma». Para el modelo principal, el valor de «vd» podría ser aún mayor, sin embargo, no se debe superar el punto luego del cual el sistema no tendrá incentivos para recuperar más allá de la meta, *pi*, por tanto, se deberá prestar especial atención a la tasa de rechazo, ya que de esta dependerá la estimación del punto «*pi*»: a menor tasa de rechazo, más cercano estará este punto al 120% de «vma».

Ahora bien, partiendo de los resultados de ambos modelos, para empresas con barreras económicas, logísticas y técnicas como las pymes (Prieto-Sandoval et al., 2019), una alternativa viable económica y ambientalmente que les permita cumplir con la meta de aprovechamiento, podría ser: (1) partir del esquema de colaborativo, es decir, de la conformación de una ORP; (2) contar con los depósitos no redimidos como parte de los ingresos de su sistema, como funciona en el *modelo principal*, (3) definir un monto de depósito que se encuentre entre el 60% y el 80% del valor del material en el mercado⁷, (4) controlar la tasa de rechazo del sistema, (5) fomentar el incremento de la tasa efectiva de recolección en las zonas de influencia, y (6) realizar las alianzas necesarias con actores internos y/o externos del esquema de REP para garantizar que siempre se cuente con un comprador para el material transformado.

Con estas recomendaciones, los resultados muestran que es posible para las pymes con envases homogéneos en términos de material, peso y volumen, actuar de forma conjunta para garantizar el cumplimiento de la meta mínima de aprovechamiento de acuerdo con una zona de influencia definida, mientras generan ingresos a partir de la venta del material transformado, pagan los depósitos que los usuarios redimen en sus instalaciones transformadoras y obtienen ingresos de los depósitos no redimidos que podrían utilizarse para suplir gastos administrativos u operativos adicionales. En este caso, la venta de la materia prima aprovechable al fabricante de botellas es el evento que cierra el ciclo.

⁷ Estos porcentajes son de referencia. El monto del depósito podría ser mayor al 80%, sin embargo, se corre el riesgo de alcanzar el punto «*pi*» si la tasa de rechazo no se controla.

Así pues, en estas condiciones, sería posible cumplir con la meta de aprovechamiento siempre que la fábrica que proporciona envases a los productores de la ORP o cualquier otro ente externo que demande material aprovechable, garantice la compra de la cantidad de necesaria para cumplir con la meta de aprovechamiento. Así las cosas, la gestión previa de alianzas en este sentido es crucial para planear la cantidad máxima de materia prima que puede recoger y transformar de acuerdo con la demanda de este.

Finalmente, es menester hacer énfasis en que el análisis que se presenta se basa en el estudio de la variación de los factores seleccionados en el diseño de experimentos, sin embargo, existen parámetros cuya influencia no fue estudiada y que podrían provocar cambios en la configuración de la red. Para ilustrar un ejemplo, se realizó una corrida adicional de la instancia base incrementando los precios de arrendamiento por metro cuadrado, lo cual incluyó en la decisión de incluir instalaciones de entes externos en lugar de abrir un *Transformador* operado por la ORP. Otro caso, podría ser incluir a los comercializadores como *Acopios* de costo cero, con lo cual, eventualmente se modificaría el diseño de la red.

A continuación, estudiaremos la evolución del sistema con respecto al tiempo, basándonos en ambos modelos y partiendo del caso de estudio construido en la sección 4.1 de este trabajo.

4.4.2 Experimento 2: Evolución del escenario base 2021-2030

En aras de analizar el comportamiento y la evolución del sistema en el tiempo, se llevó a cabo este experimento de acuerdo con lo descrito en la sección 4.3.2. En este sentido, se tomaron los parámetros del escenario base planteado en la sección 4.1 y se ajustó la tasa efectiva de recuperación en un 15,0%, conforme a lo descrito en la validación del modelo. Para mayor ilustración, se corrió un experimento fijando el valor del depósito en 100 COP/envase, es decir, 526.316 COP/Ton. Los resultados se resumen en la tabla 20.

Tabla 20. Resumen de resultados para el experimento usando el escenario base – modelo principal

Año		2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
Aprovechamiento anual [%] (Res. 1407, 2018)		10%	12%	14%	16%	18%	20%	22%	24%	27%	30%	
Meta anual estimada [Ton]		36	43	50	57	64	71	78	85	96	107	
MA [Ton/Semana]		0,68	0,82	0,96	1,1	1,23	1,37	1,51	1,64	1,85	2,05	
te_i	15%	MAS	0,68	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
		CIORP	1,14	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
		CIEE	-	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
		US	3.207.316	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
	35%	MAS	0,68	0,82	0,96	1,1	1,23	1,37	1,51	1,64	NF	NF
		CIORP	1,14	1,14	1,14	1,14	2,28	2,28	2,28	2,28	NF	NF
		CIEE	-	-	-	-	-	-	-	-	NF	NF
		US	3.207.316	3.152.870	3.098.425	3.043.980	2.953.423	2.898.978	2.844.533	2.793.976	NF	NF
	55%	MAS	0,68	0,82	0,96	1,1	1,23	1,37	1,51	1,64	1,85	2,05
		CIORP	1,14	1,14	1,14	1,14	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
		CIEE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		US	3.207.316	3.152.870	3.098.425	3.043.980	2.953.423	2.898.978	2.844.533	2.793.976	2.712.308	2.634.529
	75%	MAS	0,68	0,82	0,96	1,1	1,23	1,37	1,51	1,64	1,85	2,05
		CIORP	1,14	1,14	1,14	1,14	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
		CIEE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		US	3.207.316	3.152.870	3.098.425	3.043.980	2.953.423	2.898.978	2.844.533	2.793.976	2.712.308	2.634.529
	95%	MAS	0,68	0,82	0,96	1,1	1,23	1,37	1,51	1,64	1,85	2,05
		CIORP	1,14	1,14	1,14	1,14	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
		CIEE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		US	3.207.316	3.152.870	3.098.425	3.043.980	2.953.423	2.898.978	2.844.533	2.793.976	2.712.308	2.634.529

*MAS: Material aprovechado por el sistema [Ton/Semana]

*CIORP: Capacidad instalada propiedad de la ORP [Ton]

*CIEE: Capacidad instalada de entes externos [Ton]

*US: Utilidad del sistema [COP/Semana]

*NF: No se encontró una solución factible para la instancia

Inicialmente, es posible evidenciar que, para una tasa efectiva de recuperación del 15%, sólo son factibles las instancias con la meta propuesta para 2021, lo cual resalta la necesidad de promover un aumento progresivo de estas tasas en aras de contar con la cantidad de material disponible para su recolección. Por su parte, para tasas de recuperación más elevadas, observamos que la cantidad de material aprovechado, en todos los casos, corresponde a la meta de aprovechamiento estimada para el experimento por año. Este resultado confirma el análisis de la sección 4.4.1: cuando el valor del depósito supera el punto « π », el *modelo principal* recomienda aprovechar sólo la cantidad correspondiente a la meta dado que empieza a ser más atractivo basar los ingresos en los depósitos no redimidos que en la recuperación de material.

Con respecto a la capacidad instalada, se observa que todas las instancias cuentan con capacidad de transformadores de la ORP, y corresponde a la capacidad necesaria para suplir la necesidad de cumplimiento de la meta. Este resultado es particular para esta instancia y no se debe generalizar debido a que los costos y la disponibilidad de instalaciones de entes externos, así como la posibilidad de abrir instalaciones de la ORP, es particular de cada caso. Se debe resaltar que, una vez más, los resultados obtenidos en este experimento son coherentes con las conclusiones derivadas de la sección 4.4.1: para valores de « νd » mayores a « π », la capacidad instalada será la necesaria para cumplir con la meta, ya sea con infraestructura propia para recibir el material y pagar depósitos directamente, utilizando entes externos para no tener que pagar depósitos, o usando una combinación de estos en el caso de instancias particulares que no cuentan con la posibilidad de utilizar instalaciones externas para transformar el material, como en este caso puntual. Por último, a medida que aumenta la meta de aprovechamiento, la utilidad se reduce, lo cual da cuenta de que un sistema con estas características, con el paso del tiempo, será insostenible en términos económicos si la meta sigue aumentando.

En este sentido, se plantea realizar un nuevo experimento utilizando un valor del depósito correspondiente al 60% de « νma », en el cual, de acuerdo con la información de la tabla 18, se espera que sea atractiva la recolección y el aprovechamiento de material para el sistema. Los resultados se muestran en la tabla 21. En este caso, para este valor del depósito, observamos que el modelo decide asignar la capacidad basándose en la meta establecida para cada año, y recoge todo el material posible más allá de la meta sin exceder su capacidad. Por esto, a medida que aumenta la meta, la utilidad puede disminuir debido a la apertura de nuevas instalaciones.

Así, si la meta sigue aumentando, la utilidad se iría reduciendo por la apertura de instalaciones hasta un punto en el que los ingresos dependan exclusivamente de la venta del material aprovechable recolectado y transformado por el sistema.

Finamente, de acuerdo con el análisis realizado en la sección 4.4.1, para instancias con valores de «vd» aún menores, existe la posibilidad de que el modelo recomiende recoger la mayor cantidad de material posible sin verse influenciado por la meta impuesta. Un sistema con estas características podría ser sostenible en el tiempo y aún incrementar su utilidad si se generan incentivos que fomenten un aumento en la tasa efectiva de recuperación, que impacten en la tasa de rechazo y, de esta forma, garanticen mayor disponibilidad de material para el sistema.

Tabla 21. Resumen de resultados para el experimento modificando «vd» – modelo principal

Año		2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
Aprovechamiento anual [%] (Res. 1407, 2018)		10%	12%	14%	16%	18%	20%	22%	24%	27%	30%	
Meta anual estimada [Ton]		36	43	50	57	64	71	78	85	96	107	
MA [Ton/Semana]		0,68	0,82	0,96	1,1	1,23	1,37	1,51	1,64	1,85	2,05	
te_i	15%	MAS	0,71	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
		CIORP	1,14	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
		CIEE	-	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
		US	1.411.631	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
	35%	MAS	1,14	1,14	1,14	1,14	1,65	1,65	1,65	1,65	NF	NF
		CIORP	1,14	1,14	1,14	1,14	2,28	2,28	2,28	2,28	NF	NF
		CIEE	-	-	-	-	-	-	-	-	NF	NF
		US	1.414.017	1.414.017	1.414.017	1.414.017	1.376.805	1.376.805	1.376.805	1.376.805	NF	NF
	55%	MAS	1,14	1,14	1,14	1,14	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
		CIORP	1,14	1,14	1,14	1,14	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
		CIEE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		US	1.414.017	1.414.017	1.414.017	1.414.017	1.380.284	1.380.284	1.380.284	1.380.284	1.380.284	1.380.284
	75%	MAS	1,14	1,14	1,14	1,14	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
		CIORP	1,14	1,14	1,14	1,14	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
		CIEE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		US	1.414.017	1.414.017	1.414.017	1.414.017	1.380.284	1.380.284	1.380.284	1.380.284	1.380.284	1.380.284
	95%	MAS	1,14	1,14	1,14	1,14	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
		CIORP	1,14	1,14	1,14	1,14	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28
		CIEE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		US	1.414.017	1.414.017	1.414.017	1.414.017	1.380.284	1.380.284	1.380.284	1.380.284	1.380.284	1.380.284

*MAS: Material aprovechado por el sistema [Ton/Semana]

*CIORP: Capacidad instalada propiedad de la ORP [Ton]

*CIEE: Capacidad instalada de entes externos [Ton]

*US: Utilidad del sistema [COP/Semana]

*NF: No se encontró una solución factible para la instancia

A partir de lo anterior, es claro que la tasa efectiva de recuperación tiene un papel fundamental en la evolución del sistema en el tiempo: si esta tasa no se incrementa, será inviable el cumplimiento de la meta en algún punto. Para identificar cuál es la mínima tasa efectiva de aprovechamiento que debe tener el sistema en su zona de influencia para esta instancia, se evaluó la factibilidad del modelo variando esta tasa. Los resultados muestran que, para 2022, esta tasa debería alcanzar un 20%. Los resultados se resumen en la figura 22.

Por otro lado, observamos que pueden existir tres políticas posibles según el valor del depósito con respecto a «vma»: (1) recolección de la mayor cantidad de material posible, basando sus ingresos en la venta de material; (2) asignación de capacidad según la meta y recolección de material hasta completar su capacidad, teniendo un enfoque de ingresos mixtos; y (3) recolección sólo para cumplir la meta definida, con ingresos basados principalmente en depósitos no redimidos. La figura 23 resume los resultados del experimento para entender mejor estos escenarios, encontrando que el comportamiento de la utilidad es similar para todas las tasas efectivas de recuperación: a mayor valor del depósito, mayor utilidad.

Con respecto a los valores de «vd» inferiores al «pi», se identificó que existen variaciones en la utilidad con respecto al valor de la tasa efectiva de recuperación y a la evolución del sistema. En este rango funciona la política de recoger la mayor cantidad de material posible, sin embargo, a medida que «vd» se acerca a «pi», se hace más atractivo sustentar los ingresos en los depósitos no redimidos, por lo cual, el sistema empieza a utilizar la política de abrir las instalaciones con la capacidad necesaria para cumplir con la meta y recoger todo lo que pueda almacenar en estas instalaciones más allá de la meta, sustentando el resto de la utilidad en depósitos no redimidos. Así, a medida que el sistema evoluciona en el tiempo y aumentan las metas, la utilidad disminuye dado que el sistema decide aumentar la capacidad de las instalaciones para cumplir las nuevas metas, haciendo que disminuyan sus ingresos por concepto de depósitos no redimidos.

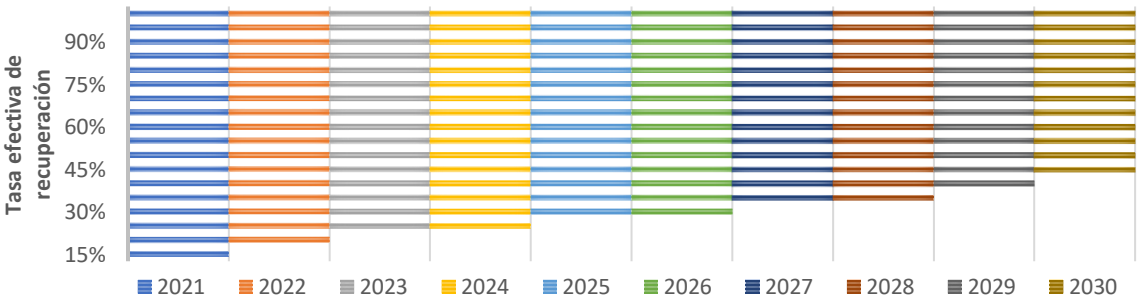


Figura 22. Experimentos para el análisis de factibilidad para la instancia - modelo principal. Año versus tasa efectiva de recuperación. Elaboración propia.

En contraste, para valores de «vd» iguales o superiores a «pi», los valores de utilidad no se ven impactados por la tasa efectiva de recuperación, sin embargo, van disminuyendo conforme evoluciona el sistema. Lo anterior, debido a que los valores de «vd» hacen atractiva la retención de depósitos, fomentando la política de recoger lo necesario para cumplir con la meta. Esto último hace que los ingresos por depósitos no redimidos vayan disminuyendo y la utilidad se vea impactada conforme aumenta la meta.

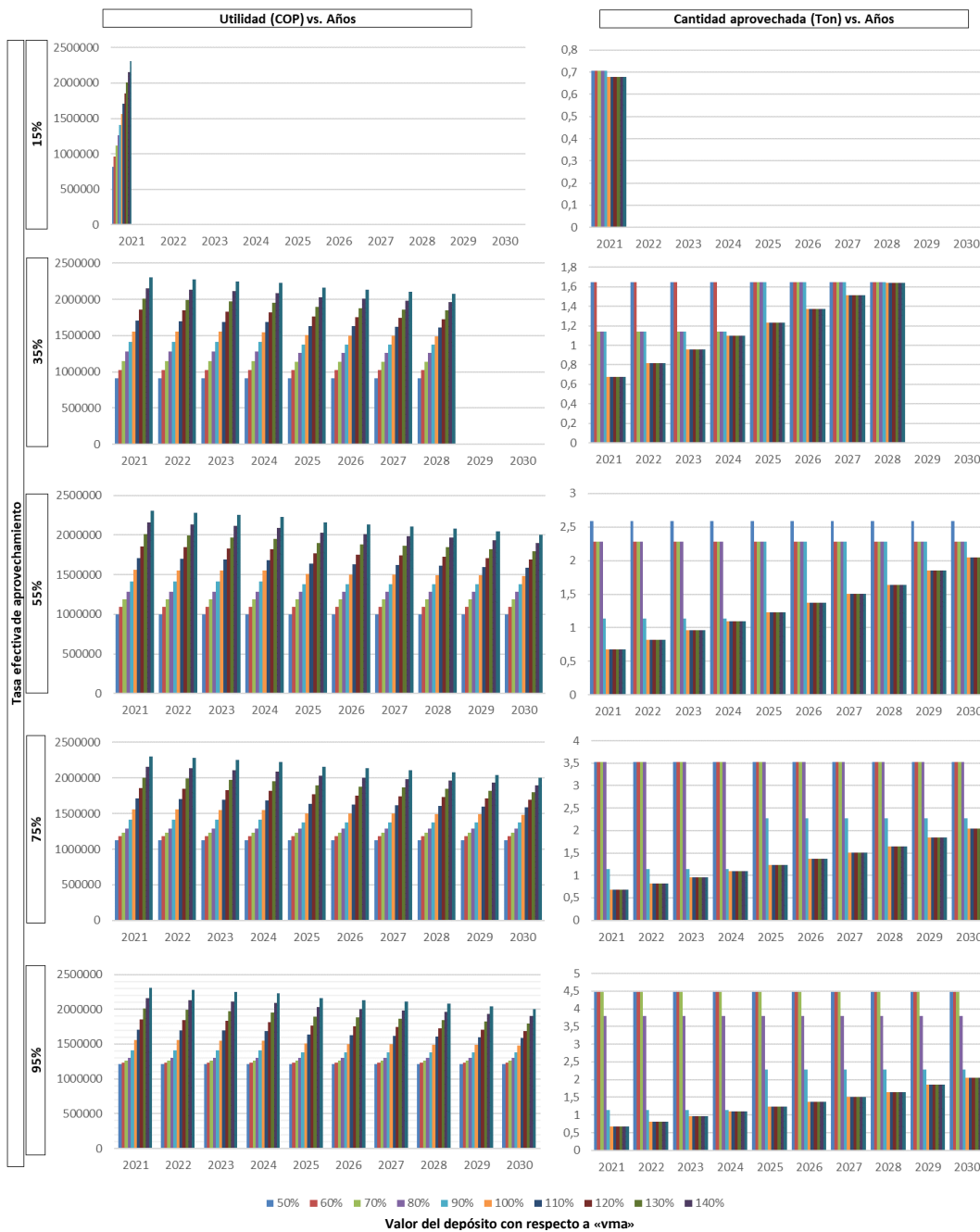


Figura 23. Resumen del experimento - modelo principal. Elaboración propia.

Por último, para complementar el experimento, se analizaron los resultados del modelo alternativo, encontrando, para todos los casos, que la utilidad y la cantidad de material aprovechado dependen exclusivamente de la tasa efectiva de recuperación, más específicamente, en la cantidad de material disponible para el sistema en la zona de influencia. Esto coincide con los resultados de la sección 4.4.1 ya que los depósitos no redimidos no hacen parte de los ingresos de la ORP, permitiéndonos afirmar que, para este modelo, existe una única política posible: recoger la mayor cantidad de material posible para optimizar su utilidad, sustentando sus ingresos en la venta de materia prima aprovechable transformada por el sistema. La figura 24 resume mejor estos resultados.

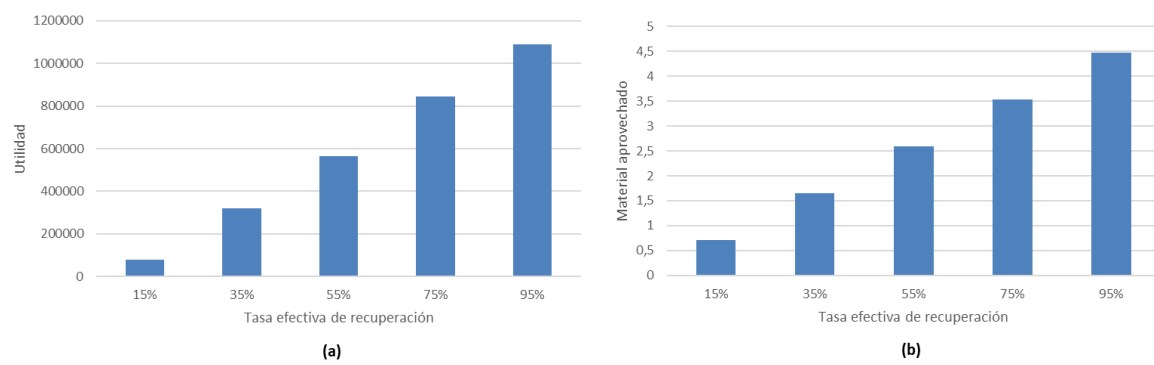


Figura 24. Resumen del experimento - modelo alternativo. (a) Tasa efectiva de recuperación versus utilidad, y (b) Tasa efectiva de recuperación versus material aprovechado. Elaboración propia.

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo, se brindan conclusiones generales con respecto al trabajo de investigación, cuya motivación parte del objetivo principal de desarrollar un modelo de apoyo a la toma de decisiones desde la óptica de la administración de operaciones y la cadena de suministros, considerando aspectos ambientales y económicos para pequeñas y medianas empresas en torno a los requisitos de responsabilidad extendida del productor (REP) en envases y empaques en Colombia. Primeramente, se incluyen conclusiones específicas con relación a las etapas del trabajo, acompañado de una breve descripción de los hallazgos obtenidos en cada una de ellas. Seguidamente, se hace énfasis en las lecciones aprendidas gracias al análisis de los resultados producto de la experimentación, incluyendo la generación de lineamientos de REP para pymes en el marco de la temática planteada, con lo cual se complementa el cumplimiento de los objetivos definidos para esta investigación. Finalmente, se mencionan los trabajos futuros que podrían desarrollarse y los aspectos a considerar según los autores de este estudio.

Así, el *diagnóstico y contextualización del problema de REP en envases y empaques* nos permitió contribuir, entre otros, con la elaboración de un marco normativo que permite destacar la labor del gobierno colombiano para establecer las bases legislativas en favor de una transición hacia una economía circular desde diversos frentes, fomentando el diseño de ciclos cerrados de flujo de materiales, y generando una oportunidad histórica para atacar específicamente el problema de gestión de residuos de empaques envases y empaques gracias a la Resolución 1407 de 2018 y a la Resolución 1342 de 2020. No obstante, se advierte que se requiere de un esfuerzo armónico que involucre también al sector productivo y a la academia para lograr diseñar, fomentar e implementar soluciones cada vez más efectivas.

En este sentido, se encontró que el cumplimiento de los requisitos de REP definidos en la Resolución 1407 de 2018 depende de una buena gestión logística, en la que se contemple la cadena de suministros de ciclo cerrado como un enfoque que incluye aspectos de logística inversa desde la planeación de la logística hacia adelante. Con esto en mente, se hizo posible construir un contexto general sobre la temática abordada. Finalmente, se delimitó el estudio al esquema de reembolso de depósito como parte de las herramientas de REP de economía circular, utilizando un enfoque colaborativo (RCP) que parte de la conformación de una Organización de Responsabilidad Extendida del Productor (ORP).

Por su parte, en el *análisis y priorización de alternativas de REP* fue posible estudiar antecedentes relacionados con la REP en envases y empaques, dando cuenta de trabajos realizados en otros países y de algunas iniciativas en el contexto de Colombia que podrían beneficiarse de las conclusiones de este estudio. De igual manera, se identifica que, a la fecha de la revisión, no existen investigaciones precedentes que combinen el desarrollo de un modelo bajo el esquema de reembolso de depósito y la solución de un caso de estudio, considerando restricciones basadas en la legislación colombiana.

También, partiendo de la revisión de estudios relacionados, fue posible ubicar nuestra investigación dentro de las temáticas de gestión de residuos de empaques; comparación de alternativas y sistemas eco-amigables, reciclaje, retorno y reúso. Además, se sustenta la elección de la herramienta de reembolso de depósito, que entra dentro de la categoría de instrumentos de REP basados en el mercado, en las tasas de recuperación superiores al 90% que se presentan en la mayoría de los países que la implementan. Para esta herramienta, algunas investigaciones previas mencionan que el monto del depósito es clave para el funcionamiento del sistema, sin embargo, en este trabajo gana relevancia el valor del material en el mercado como parámetro que condiciona la definición del monto del depósito, así como la cantidad de material disponible para el sistema, la cual puede gestionarse a través de campañas de concientización ambiental en las zonas de influencia que impacten en la tasa efectiva de recuperación y en la tasa de rechazo.

Partiendo de lo anterior y gracias al *estudio de métodos de modelación*, se plantea la necesidad de seleccionar una herramienta de solución que permita establecer restricciones y estudiar el comportamiento del sistema desde un objetivo ambiental y otro económico a partir de la modificación de sus parámetros, lo cual nos orienta hacia la elección de un modelo de optimización mono - objetivo que optimiza la utilidad mientras gestiona la cantidad aprovechada vía restricciones, enfocado en la modelación de decisiones de nivel táctico y estratégico en un único periodo, para varios productos con empaque homogéneo en términos de material, peso y volumen. El modelo propuesto funciona como una simplificación de un sistema que incluye: fabricante de botellas, productores, comercializadores, relleno sanitario, recicladores en proceso de formalización y/o gestores independientes, instalaciones de inspección, clasificación y/o transformación cuya propiedad puede ser de la ORP, o de entes externos a la ORP, como bodegas privadas, ECAs y plantas de reciclaje. En este punto, cabe destacar que la revisión de literatura dejó notar una deuda académica en términos de esquemas de REP que tengan en

cuenta a los recicladores de oficio como entes activos del sistema, lo cual constituye un hito en esta investigación ya que permite evaluar el comportamiento y la conveniencia de sistemas que integren entes públicos y privados desde el punto de vista ambiental y económico.

Para analizar el comportamiento del sistema utilizando el modelo propuesto, fue clave la construcción de un *caso de estudio* basado en datos de la subregión MEDIO SINÚ del departamento de Córdoba en Colombia, los cuales fueron tomados directamente con actores de la zona, y complementados usando fuentes secundarias de información. Una conclusión interesante de la validación inicial del modelo es que, para obtener una solución factible de nuestro problema, es indispensable contar, como mínimo, con la cantidad necesaria para cumplir con la meta de aprovechamiento en el sistema, la cual resulta de aplicar la tasa efectiva de recuperación, que representa lo que las personas estarían dispuestas a entregar al sistema, y la tasa de rechazo, a la cantidad de residuos de envases que se genera en cada zona.

Por último, la etapa de *experimentación y análisis* permite llegar a una conclusión importante: se identifica el valor del material en el mercado como el factor determinante que condiciona el monto del depósito en función del comportamiento del sistema. En este sentido, se consideren o no los depósitos no redimidos como parte de los ingresos de la ORP, un sistema con estas características tendrá incentivos para recoger material más allá de la meta si el valor del depósito es inferior al porcentaje «*pi*»⁸ del valor de material en el mercado. Así, si el valor del material aprovechable es muy pequeño, será posible fijar un depósito que cumpla con este criterio, sin embargo, la viabilidad económica del sistema podría verse comprometida teniendo en cuenta los costos asociados al mismo.

En el escenario en el que el valor del material en el mercado es pequeño con respecto a otros materiales, como es el caso puntual del vidrio en Colombia, los resultados recomiendan: (1) partir del esquema de colaborativo, es decir, de la conformación de una ORP; (2) contar con los depósitos no redimidos como parte de los ingresos de su sistema, como funciona en el *modelo principal*, (3) definir un monto de depósito que se encuentre entre el 60% y el 80% del valor del material en el mercado⁹, (4) controlar la tasa de rechazo del sistema, (5) fomentar el incremento de la tasa efectiva de recolección en las zonas de influencia, y (6) realizar las alianzas necesarias

⁸ «*pi*» es el punto de inflexión que marca un cambio en el comportamiento del sistema: el rango está entre el 80% y el 120% del valor de «*vma*», y el punto se estima restando la tasa de rechazo a 120%

⁹ Estos porcentajes son de referencia. El monto del depósito podría ser mayor al 80%, sin embargo, se corre el riesgo de alcanzar el punto «*pi*» si la tasa de rechazo no se controla.

con actores internos y/o externos del esquema de REP para garantizar que siempre se cuente con un comprador para el material transformado. Es menester mencionar que, para este escenario puntual, es indispensable la definición de una meta de aprovechamiento dado que no hay incentivos para recoger material, lo cual nos permite afirmar que la estrategia del gobierno de Colombia de imponer una meta de aprovechamiento para el vidrio mediante la Resolución 1407 de 2018 es acertada.

Otra conclusión interesante apunta a que, contrario a lo que podría esperarse, el hecho de que los depósitos no redimidos hagan parte de los ingresos de la ORP no representa un incentivo para recoger más material: si bien son un soporte económico para el sistema, a medida que el monto del depósito aumenta por encima del porcentaje del valor del material en el mercado, pi , la cantidad de material aprovechado disminuirá hasta ser la mínima requerida para cumplir con la meta, siendo más conveniente en este punto retener los depósitos no redimidos. En este sentido, desde el punto de vista netamente económico, la recomendación sería que los depósitos no redimidos sean recibidos por los productores (la ORP) para aumentar la utilidad del sistema y recoger lo mínimo permitido, sin embargo, desde lo ambiental, se sugiere que estos depósitos, bien sean regulados para ponerlos al servicio del sistema, por ejemplo, para fortalecer los esquemas y la infraestructura de entes externos de carácter público previo análisis económico de la viabilidad del sistema, o bien sean dispuestos para gestionar la recolección de envases a través de los comercializadores. Este último aspecto no fue considerado en el modelo planteado, sin embargo, su estudio podría ser interesante si se considera que los depósitos no redimidos podrían servir para financiar un potencial esquema de recolección de la ORP que involucre directamente una devolución desde los clientes a los comercializadores.

En general, al incluir los depósitos no redimidos como parte de los ingresos del sistema, este podrá adoptar una de tres políticas puntuales según el valor del depósito con respecto al valor del material en el mercado: (1) para « vd » mucho menor a « pi », el modelo recomienda recolectar la mayor cantidad de material posible, basando sus ingresos en la venta de material; (2) para « vd » cercano a « pi » por la izquierda, se recomienda asignar de capacidad según la meta y recolectar material hasta completar su capacidad, teniendo un enfoque de ingresos mixtos; y (3) para « vd » igual o mayor a « pi », se debería optar por recolectar sólo lo necesario para cumplir la meta definida, con ingresos basados principalmente en depósitos no redimidos.

En contraste, aunque la utilidad es menor, los resultados nos permiten concluir que la no inclusión de depósitos no redimidos como parte de los ingresos de la ORP obliga al sistema a recoger la mayor cantidad de material posible para optimizar su utilidad, sustentando sus ingresos en la venta de materia prima aprovechable transformada por el sistema.

Ahora bien, con respecto a la *generación de lineamientos para pymes en torno a REP*, los resultados muestran que, para este tipo de empresas con limitaciones económicas, logísticas y técnicas, es ideal trabajar de forma colaborativa en el ámbito económico, contar con las capacidades logísticas y técnicas que pueden brindarle los entes externos para cumplir con la meta o bien utilizar instalaciones propias según el valor del material en el mercado y los costos asociados a la apertura de instalaciones, y, aún, obtener una utilidad producto de la implementación de un esquema de reembolso de depósito. Para lograrlo, el monto del depósito se deberá incluir en el precio del producto, constituirse como parte de los ingresos de la ORP, y, de forma preliminar, ser mayor al punto «*pi*» del valor del material aprovechable en el mercado para incentivar un aumento en la tasa efectiva de recuperación. Si se quiere, inicialmente, podrían enfocarse en utilizar entes externos para la recuperación del material, tomando sólo la cantidad suficiente para cumplir con la meta y luego, una vez su sistema se estabilice, cuenten con los recursos necesarios y se identifique que el valor del material en el mercado es razonable, podría regularse el monto del depósito para que se establezca por debajo del punto «*pi*» para fomentar en la recolección y priorizar el aprovechamiento de materia prima, incentivando así la apertura de instalaciones propias.

Por otro lado, si bien el enfoque principal de este estudio son las pymes, es posible mencionar una recomendación para empresas más grandes a partir de los resultados de esta investigación: superadas las barreras técnicas, logísticas y económicas, los resultados apuntan a que un resultado óptimo en términos económicos y ambientales se logra fijando el valor del depósito por debajo del punto «*pi*», por lo cual, se sugiere fijar, por política, este valor como cota superior del monto del depósito para incentivar a estas empresas a recoger material más allá de la meta y evitar la retención de depósitos no redimidos.

En conclusión, los objetivos planteados han sido abordados para cada una de las etapas propuestas en este trabajo de investigación, encontrando resultados valiosos que podrán ser tomados en consideración a la hora de tomar decisiones relacionadas con la adopción de esquemas de REP para residuos de empaques y envases, y para la generación de políticas relacionadas con la regulación de los sistemas que incluyan el reembolso de depósito dentro de su estrategia. Así mismo, se hace un aporte teórico a la temática, y se proporciona un modelo matemático funcional, adaptable según el caso concreto a estudiar considerando los supuestos que se tuvieron en cuenta para su construcción y las unidades de medida de cada parámetro.

Para trabajos futuros, uno de los aspectos más importantes es el levantamiento de información para construcción de las instancias. Esta información debe ser consistente y se debe prestar especial atención a las unidades definidas para cada parámetro. Un estudio interesante podría comprender el análisis de algunos de los parámetros del modelo que no fueron estudiados en este trabajo, como el costo de apertura de instalaciones, o la inclusión de comercializadores como Acopios de costo cero, con lo cual, eventualmente, se modificaría el diseño de la red. El modelo desarrollado en este estudio es susceptible de ser adaptado a otro tipo de materiales y escenarios, sin embargo, se deberán ajustar las restricciones necesarias para considerar cualquier condición específica que se asocie al material en cuestión. Finalmente, para el uso de entes externos, el caso de estudio presentado en esta investigación tiene un supuesto fuerte y es que estos envían los envases completos a las instalaciones transformadores para luego ser triturados, sin embargo, de cara a la construcción de una nueva instancia, puede utilizarse otro método para el cálculo del costo de transporte de material desde acopios de entes externos hacia instalaciones de la ORP, incluyendo los aspectos que se consideren necesarios.

Referencias

- Abejón, R., Laso, J., Margallo, M., Aldaco, R., Blanca-Alcubilla, G., Bala, A., & Fullana-i-Palmer, P. (2020). Environmental impact assessment of the implementation of a Deposit-Refund System for packaging waste in Spain: A solution or an additional problem? *Science of the Total Environment*, 721, 137744. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137744>
- Albaladejo, M., Franco Henao, L., & Mirazo, P. (2021). *What is the Circular Economy?* UNIDO, United Nations Industrial Development Organization. https://iap.unido.org/articles/what-circular-economy?_ga=2.229879708.1407603200.1653805790-1869035264.1653805790
- Ameli, M., Mansour, S., & Ahmadi-Javid, A. (2019). A simulation-optimization model for sustainable product design and efficient end-of-life management based on individual producer responsibility. *Resources, Conservation and Recycling*, 140(October 2018), 246–258. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.031>
- ANDI. (2019). Economía Circular, la gran apuesta de la ANDI. *Revista A*, 271, 6. https://issuu.com/andicolombia/docs/revistaa_271_compressed/6?ff
- Arnaud, B. (2017). Extended Producer Responsibility and Green Marketing: An Application to Packaging. *Environmental and Resource Economics*, 67(2), 285–296. <https://doi.org/10.1007/s10640-015-9986-x>
- Ayyagari, M., Demirguc-Kunt, A., & Maksimovic, V. (2014). Who creates jobs in developing countries? *Small Business Economics*, 43(1), 75–99.
- Babbitt, C. W., Gaustad, G., Fisher, A., Chen, W.-Q., & Liu, G. (2018). Closing the loop on circular economy research: From theory to practice and back again. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.012>
- Blomsma, F., & Brennan, G. (2017). The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jiec.12603>
- Bocken, N. M. P., Olivetti, E. A., Cullen, J. M., Potting, J., & Lifset, R. (2017). Taking the Circularity to the Next Level: A Special Issue on the Circular Economy. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jiec.12606>
- Bourguignon, D. (2016). Closing the loop: New circular economy package. *European Parliamentary Research Service*, 9.
- Bynum, M. L., Hackebeil, G. A., Hart, W. E., Laird, C. D., Nicholson, B. L., Siirola, J. D., Watson, J.-P., & Woodruff, D. L. (2021). *Pyomo--optimization modeling in python* (Third, Vol. 67). Springer Science & Business Media.
- Campo Limpio. (n.d.). ¿Quiénes somos? - Corporación Campo Limpio. <http://campolimpio.org/#sliderCampo2>
- Cempre Colombia. (2018). *El ABC de la resolución 1407 de 2018*.
- Cempre Colombia. (2020). *Red Redcliclo, Iniciativa para el incremento de la tasa de aprovechamiento de materiales*. <https://cempre.org.co/red-reciclo-iniciativa-para-el-incremento-de-la-tasa-de-aprovechamiento-de-materiales/>

- CEPAL, N. U., & others. (2018). *Employment Situation in Latin America and the Caribbean: Environmental sustainability and employment in Latin America and the Caribbean*.
- Confecámaras. (2018). Nuevos Hallazgos De La Supervivencia y Crecimiento De Las Empresas En Colombia. *Reportes Económicos*, 1, 32.
http://www.confecamaras.org.co/phocadownload/2018/Cuadernos_Análisis_Económico/Cuaderno_demografia_empresarial/Cartilla17.pdf
- CONSORCIO NCU- UAESP. (2018). Informe 4. Recomendaciones técnicas y normativas respecto a las necesidades de equipamiento requeridas en la prestación de la actividad de aprovechamiento. In *Contrato No. 443 DE 2017* (Vol. 2, Issue 443).
- Cooper, M. C., Lambert, D. M., & Pagh, J. D. (1997). Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics. *The International Journal of Logistics Management*, 7(1), 1-14(14).
<https://doi.org/10.1108/09574099710805556>
- CORA. (2020). *Colectivo de Responsabilidad Ambiental*. <https://cora.com.co/>
- CVS. (2022). *Cobertura Geográfica de la Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge*. Corporación Autónoma Regional de Los Valles Del Sinú y Del San Jorge.
<https://cvs.gov.co/cobertura-geografica/#1618430401496-be8715co-308b>
- Dāce, E., Pakere, I., & Blumberga, D. (2013). Analysis of sustainability aspects of the packaging deposit-refund system in Latvia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 173, 729–740.
- Decreto 1076. (2015). *Decreto 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Diario Oficial No 49523, mayo 26 de 2015) 26 May, 2015.
- Decreto 1140. (2003). *Decreto 1140 de 2003. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1713 de 2002, en relación con el tema de las unidades de almacenamiento, y se dictan otras disposiciones*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 07 May, 2003.
- Decreto 1505. (2003). *Decreto 1505 de 2003. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1713 de 2002, en relación con los planes de gestión Integral de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 04 Jun, 2003.
- Decreto 1713. (2002). *Decreto 1713 de 2002. Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral*. Ministerio de Desarrollo Económico & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 01 Ene, 2002.
- Decreto 2811. (1974). *Decreto 2811 de 1974. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente*. Ministerio de Ambiente, (Diario Oficial No 34.243, enero 27 de 1975) 01 Ene, 1974.
- Decreto 4741. (2005). *Decreto 4741 de 2005. Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 30 Dic, 2005.
- Decreto 838. (2005). *Decreto 838 de 2005. Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 23 Mar, 2005.

- Del Río, P., Carrillo-Hermosilla, J., Könnölä, T., & Bleda, M. (2016). Resources, capabilities and competences for eco-innovation. *Technological and Economic Development of Economy*, 22(2). <https://doi.org/10.3846/20294913.2015.1070301>
- DNP. (2016). Política Nacional Para La Gestión Integral De Residuos Solidos. In *Consejo nacional de política económica y social*. http://acmineria.com.co/sites/default/files/regulations/conpes_3874.pdf
- DNP. (2018a). Estrategia para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia. In *Documento Conpes 3918* (p. 74). Departamento Nacional de Planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3918.pdf>
- DNP, D. N. de P. (2018b). *Proyecto tipo 45: Lineamientos para la construcción de estación de clasificación y aprovechamiento de residuos sólidos - ECA*.
- DNP, & DANE. (2022). *Terridata - Departamento de Córdoba*. Terridata - Sistema de Estadísticas Territoriales. <https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/perfiles/23000>
- Ecologista. (2020). *Nueva alianza para la transformación de residuos*. <https://www.ecologista.com.co/nueva-alianza-para-la-transformacion-de-residuos/>
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Growth within: a circular economy vision for a competitive europe*. Ellen MacArthur Foundation.
- Foundation, E. M. (2019). *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*. Ellen MacArthur Foundation Cowes.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? In *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- González-Torre, P. L., Adenso-Díaz, B., & Artiba, H. (2004). Environmental and reverse logistics policies in European bottling and packaging firms. *International Journal of Production Economics*. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00181-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00181-6)
- Grupo Retorna. (2020). *Quiénes somos – Grupo Retorna*. <http://gruporetorna.com/quienes-somos/>
- Guide, V. D. R., & Van Wassenhove, L. N. (2009). OR FORUM—The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research. *Operations Research*, 57(1), 10–18. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0628>
- Gurobi Optimization, LLC. (2021). *Gurobi Optimizer Reference Manual*. <https://www.gurobi.com>
- Homrich, A. S., Galvão, G., Abadia, L. G., & Carvalho, M. M. (2018). The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. In *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.064>
- Islam, M. T., & Huda, N. (2018). Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 137(June), 48–75. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.026>
- Kalmykova, Y., Sadagopan, M., & Rosado, L. (2018). Circular economy - From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>

- Kaptar. (2020). *Kaptar nos mueve*. <https://www.kaptarnosmueve.com/>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank Publications.
- Kim, S., & Mori, A. (2015). Revisiting the extended producer responsibility program for metal packaging in South Korea. *Waste Management*, 39, 314–320.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.006>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Ko, Y. D., Noh, I., & Hwang, H. (2012). Cost benefits from standardization of the packaging glass bottles. *Computers and Industrial Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.11.026>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Kulshreshtha, P., & Sarangi, S. (2001). “No return, no refund”: an analysis of deposit-refund systems. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 46(4), 379–394.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-2681\(01\)00161-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0167-2681(01)00161-5)
- Lacy, P., & Rutqvist, J. (2015). The Product as a Service Business Model: Performance over Ownership. In *Waste to Wealth*. https://doi.org/10.1057/9781137530707_8
- Lavee, D. (2010). A cost-benefit analysis of a deposit–refund program for beverage containers in Israel. *Waste Management*, 30(2), 338–345.
- Ley 1259. (2008). *Ley 1259 de 2008. por medio de la cual se instauro en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros; y se dictan otras disposiciones*. (Diario Oficial 47208, Diciembre 19 de 2008) 19 Dic, 2008.
- Ley 1333. (2009). *Ley 1333 de 2009. Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones*. (Diario Oficial 47417, Julio 21 de 2009) 21 Jul, 2009.
- Ley 142. (1994). *Ley 142 de 1994. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 41.433 de 11 de julio de 1994. Última actualización: 5 de octubre de 2021 - (Diario Oficial No. 51802 - 19 de septiembre de 2021).
http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0142_1994.html
- Ley 1672. (2013). *Ley 1672 de 2013. Por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), y se dictan otras disposiciones*. (Diario Oficial 48856, Julio 19 de 2013) 19 Jul, 2013.
- Ley 689. (2001). *Ley 689 de 2001. Por la cual se modifica parcialmente la Ley 142 de 1994*. Diario Oficial No. 44.537, de agosto 31 de 2001. Última actualización: 5 de octubre de 2021 - (Diario Oficial No. 51802 - 19 de septiembre de 2021).
http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0689_2001.html
- Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. In *Journal of Cleaner Production*.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>

- Lindhqvist, T. (2000). *Extended producer responsibility in cleaner production: Policy principle to promote environmental improvements of product systems* (Vol. 2000, Issue 2). Lund University.
- Lindhqvist, T., & Lifset, R. (2003). Can We Take the Concept of Individual Producer Responsibility from Theory to Practice? *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1162/108819803322564299>
- Lindhqvist, T., Manomaivibool, P., & Tojo, N. (2008). *La responsabilidad extendida del productor en el contexto latinoamericano*.
- Macarthur, F. E. (2013). *Hacia Una Economía Circular : Motivos Económicos Para Una Transición Acelerada*. 21. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Executive_summary_S.P.pdf
- MADS. (2015). *Proyecto piloto de análisis de impacto normativo. Estrategia para envases y empaques*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- MADS. (2019). *Estrategia nacional de economía circular - ENEC. Nueva cultura y nuevos modelos de negocio, transformación productiva y cierre de ciclos de materiales*.
- 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>
- MAVDT. (2010). *Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Meherishi, L., Narayana, S. A., & Ranjani, K. S. (2019). Sustainable packaging for supply chain management in the circular economy: A review. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117582. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.057>
- Moore, S. B., & Manring, S. L. (2009). Strategy development in small and medium sized enterprises for sustainability and increased value creation. *Journal of Cleaner Production*, 17(2). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.004>
- MVCT, M. de V. C. y T. (2014). *Resolución 754*.
- Naciones-Unidas. (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible. 17 objetivos para transformar nuestro mundo. Objetivo 12*. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumptionproduction/>
- Niero, M., & Kalbar, P. P. (2019). Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level. *Resources, Conservation and Recycling*, 140(September 2018), 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.002>
- Nnorom, I. C., & Osibanjo, O. (2008). Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(6), 843–858. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2008.01.004>
- Noci, G., & Verganti, R. (1999). Managing “green” product innovation in small firms. *R and D Management*, 29(1). <https://doi.org/10.1111/1467-9310.00112>
- Numata, D. (2009). Economic analysis of deposit–refund systems with measures for mitigating negative

- impacts on suppliers. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(4), 199–207.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.11.008>
- O'Brien, M. (2012). *A crisis of waste?: understanding the rubbish society*. Routledge.
- OECD/ECLAC. (2014). *OECD Environmental Performance Reviews: Colombia 2014*. OECD Publishing.
<https://doi.org/10.1787/9789264208292-en>
- OECD. (2001). *Deposit-refund system*. <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=594>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2016). *Extended producer responsibility: Updated guidance for efficient waste management*. OECD Publishing.
- Ormazabal, M., Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Santos, J. (2016). An overview of the circular economy among SMEs in the Basque Country: A multiple case study. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(5). <https://doi.org/10.3926/jiem.2065>
- PBOT. (2018a). *Revisión, ajuste y complementación del plan básico de ordenamiento territorial PBOT del municipio de Cereté, Córdoba*. Documento Resumen. Oficina de Planeación Municipal de Cereté.
- PBOT. (2018b). *Revisión, ajuste y complementación del plan básico de ordenamiento territorial PBOT del municipio de Ciénaga de Oro, Córdoba*. Documento Resumen. Oficina de Planeación Municipal de Ciénaga de Oro.
- PBOT. (2018c). *Revisión, ajuste y complementación del plan básico de ordenamiento territorial PBOT del municipio de San Carlos, Córdoba*. Documento Resumen. Oficina de Planeación Municipal de San Carlos.
- PBOT. (2018d). *Revisión, ajuste y complementación del plan básico de ordenamiento territorial PBOT del municipio de San Pelayo, Córdoba*. Documento Resumen. Oficina de Planeación Municipal de San Pelayo.
- Peterson, M. (2004). Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. *Journal of Macromarketing*.
<https://doi.org/10.1177/0276146704264148>
- Pires, A., Martinho, G., Ribeiro, R., Mota, M., & Teixeira, L. (2015). Extended producer responsibility: a differential fee model for promoting sustainable packaging. *Journal of Cleaner Production*.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.084>
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., Santos, J., Baumgartner, R. J., & Ormazabal, M. (2019). Key strategies, resources, and capabilities for implementing circular economy in industrial small and medium enterprises. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 26(6), 1473–1484.
<https://doi.org/10.1002/csr.1761>
- Prieto-Sandoval, V., Jaca García, C., & Ormazabal Goenaga, M. (2016). Circular Economy : An economic and industrial model to achieve the sustainability of society. In *Proceedings of the 22nd Annual International Sustainable Development Research Society Conference. Rethinking Sustainability Models and Practices: Challenges for the New and Old World Contexts*.
- Prieto Sandoval, V., Jaca García, M., & Ormazabal, M. (2017). Economía circular: relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. *Memoria Investigaciones En Ingeniería*.

- Punto Azul. (2020). *Envases y empaques* - Corporación Punto Azul.
<https://www.puntoazul.com.co/envases-y-empaques/>
- Quinn, L., & Sinclair, A. J. (2006). Policy challenges to implementing extended producer responsibility for packaging. In *Canadian Public Administration*. <https://doi.org/10.1111/j.1754-7121.2006.tb02018.x>
- Resolución 1297. (2010). *Resolución 1297 de 2010. Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Pilas y/o Acumuladores y se adoptan otras disposiciones*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (Diario Oficial 47769 Julio 13 de 2010). 08 Jul, 2010.
- Resolución 1326. (2017). *Resolución 1326 de 2017. Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se dictan otras disposiciones*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Diario Oficial No 50287, julio 7 de 2017) 06 Jul, 2017.
- Resolución 1342. (2020). *Resolución 1342 de 2020. Por la cual se modifica la Resolución 1407 de 2018 y se toman otras determinaciones*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Resolución 1407. (2018). *Resolución 1407 de 2018. Por la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 26 Jul, 2018 Núm. 50673.
- Resolución 1457. (2010). *Resolución 1457 de 2010. Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se adoptan otras disposiciones*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (Julio 29 de 2010) 29 Jul, 2010.
- Resolución 1511. (2010). *Resolución 1511 de 2010. Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Bombillas y se adoptan otras disposiciones*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (Agosto 5 de 2010) 05 Ago, 2010.
- Resolución 1512. (2010). *Resolución 1512 de 2010. Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Computadores y/o Periféricos y se adoptan otras disposiciones*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (Agosto 5 de 2010) 05 Ago, 2010.
- Resolución 1675. (2013). *Resolución 1675 de 2013. Por la cual se establecen los elementos que deben contener los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Plaguicidas*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Diario Oficial No 49022, enero 3 de 2014) 02 Dic, 2013.
- Resolución 371. (2009). *Resolución 371 de 2009. Por la cual se establecen los elementos que deben ser considerados en los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Fármacos o Medicamentos Vencidos*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 26 Feb, 2009.
- Resolución 372. (2009). *Resolución 372 de 2009. Por la cual se establecen los elementos que deben contener los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de Baterías Usadas Plomo Acido, y se adoptan otras disposiciones*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Diario Oficial 47282, Marzo 5 de 2009) 05 Mar, 2009.
- Resolución CRA 720. (2015). *Resolución CRA 720 del 2015. Por la cual se establece el régimen de regulación tarifaria al que deben someterse las personas prestadoras del servicio público de aseo que atiendan en municipios de más de 5.000 suscriptores en áreas urbanas, la metodología*. Unidades Administrativas Especiales - Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico.
<https://www.cra.gov.co/documents/RESOLUCION-720-DE-2015-EDICION-Y-COPIA.pdf>

- Rizos, V., Behrens, A., van der Gaast, W., Hofman, E., Ioannou, A., Kafyeke, T., Flamos, A., Rinaldi, R., Papadelis, S., Hirschnitz-Garbers, M., & Topi, C. (2016). Implementation of circular economy business models by small and medium-sized enterprises (SMEs): Barriers and enablers. *Sustainability (Switzerland)*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/su8111212>
- Røine, K., & Lee, C. Y. (2006). With a little help from EPR? Technological change and innovation in the Norwegian plastic packaging and electronics sectors. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1162/108819806775545448>
- Rubio, S., Ramos, T. R. P., Leitão, M. M. R., & Barbosa-Povoa, A. P. (2019). Effectiveness of extended producer responsibility policies implementation: The case of Portuguese and Spanish packaging waste systems. *Journal of Cleaner Production*, 210, 217–230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.299>
- Simon, B., Amor, M. Ben, & Földényi, R. (2016). Life cycle impact assessment of beverage packaging systems: Focus on the collection of post-consumer bottles. *Journal of Cleaner Production*, 112, 238–248. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.008>
- Soyca. (2020). *Alianza entre Socya y Asei trae como resultado a REPACK*. <https://socya.org.co/alianza-entre-socya-y-asei-trae-como-resultado-a-repack/>
- Spicer, A. J., & Johnson, M. R. (2004). Third-party demanufacturing as a solution for extended producer responsibility. *Journal of Cleaner Production*, 12(1), 37–45.
- Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature News*, 531(7595), 435.
- Standard, B. (2017). BS 8001: 2017 Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations-Guide. *The British Standard Institution*.
- Stevens, G. C. (1989). Integrating the Supply Chain. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 19(8), 3–8. <https://doi.org/10.1108/EUM0000000000329>
- Subramanian, R., Ferguson, M. E., & Beril Toktay, L. (2013). Remanufacturing and the Component Commonality Decision. *Production and Operations Management*, 22(1), 36–53. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2012.01350.x>
- Superservicios. (2018a). Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2017. *Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios*, 1–177.
- Superservicios. (2018b). Informe Nacional de aprovechamiento 2017. *Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios*, 57. <https://www.superservicios.gov.co/noticias/informe-nacional-aprovechamiento-2016>
- Superservicios. (2019a). Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2018. *Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios*.
- Superservicios. (2020). Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos - 2019. *Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios*, 142.
- Superservicios, S. de S. P. D. (2019b). Informe Sectorial de la Actividad de Aprovechamiento - 2019. *República de Colombia*, 115.

- Suversión. (2020). *Nueva Licorera de Boyacá comprometida con el ambiente*.
<https://suversion.com.co/home/nueva-licorera-de-boyaca-comprometida-con-el-ambiente/>
- Tencati, A., Pogutz, S., Moda, B., Brambilla, M., & Cacia, C. (2016). Prevention policies addressing packaging and packaging waste: Some emerging trends. *Waste Management*, 56, 35–45.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.025>
- The World Bank. (2019). *Population, total*. The World Bank.
<https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>
- 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>
- Tian, G., Zhang, H., Feng, Y., Jia, H., Zhang, C., Jiang, Z., Li, Z., & Li, P. (2017). Operation patterns analysis of automotive components remanufacturing industry development in China. *Journal of Cleaner Production*, 164, 1363–1375.
- Trusts, P. C., & others. (2020). *Breaking the Plastic Wave: A Comprehensive Assessment of Pathways Towards Stopping Ocean Plastic Pollution*. *Pew Charitable Trusts*, 7.
- Van Engeland, J., Beliën, J., De Boeck, L., & De Jaeger, S. (2020). Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains. *Omega (United Kingdom)*, 91.
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.12.001>
- Van Rossum, G., & Drake Jr, F. L. (1995). *Python reference manual*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam.
- Zhong, H., & Zhao, C. (2012). E-waste Deposit system under EPR in China: A view from closed-loop supply chain. *ICSSSM12*, 239–243. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2012.6252228>
- Zhou, G., Gu, Y., Wu, Y., Gong, Y., Mu, X., Han, H., & Chang, T. (2020). A systematic review of the deposit-refund system for beverage packaging: Operating mode, key parameter and development trend. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119660>