



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**Desarrollo de un modelo de economía
circular para la gestión de residuos sólidos.
Aplicación en municipios de economía
deprimida en Colombia**

Tesis doctoral
Camilo Andrés Vargas Terranova

Directores
Dr. Javier Rodrigo Ilarri
Dra. María Elena Rodrigo Clavero

Valencia, noviembre de 2022

A papá José,
Toda una referencia y ejemplo

Resumen

El modelo M-GRCT, principal producto desarrollado en esta investigación, tiene por objeto promover mejores prácticas ambientales de gestión de residuos sólidos aprovechables en contextos municipales desfavorecidos (municipalidades de economía deprimida). Se trata de un importante instrumento técnico que brinda soporte a la gestión de residuos municipales con un enfoque de promoción de la economía circular.

M-GRCT está soportado en una herramienta ofimática dinámica que se ha programado para calcular variables de dos grandes módulos en escenarios predefinidos de simulación, con el objetivo de evaluar su eficiencia comparando el modelo tradicional de gestión de residuos reciclables (lineal) y el promocionado (circular).

Los dos módulos principales del modelo corresponden a un módulo de evaluación ambiental y otro de evaluación financiera. En el módulo ambiental se calculan, entre otras variables, los beneficios por reducción de huella de carbono que se logran al minimizar volúmenes de residuos aprovechables transportados y dispuestos en vertederos, o el censo de recuperadores/recicladores de oficio para promover su importante labor en la cadena de gestión de residuos, diseño de rutas selectivas y promoción de empleo.

En el módulo financiero, se calculan las variables económicas a partir de la cuantificación de residuos aprovechables producidos en las municipalidades de interés, considerándolos como unidad de negocio asociada a la correcta separación que deben realizar todos los sectores de generación tipificados.

Se realizan así estimaciones de ingresos, costes e inversiones para la implementación de plantas de aprovechamiento de residuos, a partir de flujos de caja con un horizonte de evaluación predefinido y consideraciones de financiación.

Como ejemplos de aplicación, M-GRCT se ha utilizado para simular la gestión de residuos aprovechables en un conjunto de municipios de economía deprimida en Colombia. Las características socioeconómicas de estos territorios, los informes oficiales asociados a la gestión de sus residuos y otros criterios base, permitieron la selección de éstos. Los resultados logrados exponen interesantes contrastes y cifras asociadas a los potenciales beneficios ambientales y económicos que se pueden lograr con la implementación real del modelo

Resum

El model M-GRCT, principal producte desenvolupat en aquesta investigació, té per objecte promoure millors pràctiques ambientals de gestió de residus sòlids aprofitables en contextos municipals desfavorits (municipalitats d'economia deprimida). Es tracta d'un important instrument tècnic que brinda suport a la gestió de residus municipals amb un enfocament de promoció de l'economia circular.

M-GRCT està suportat en una eina ofimàtica dinàmica que s'ha programat per calcular variables de dos grans mòduls en escenaris predefinitos de simulació, amb l'objectiu d'avaluar-ne l'eficiència comparant el model tradicional de gestió de residus reciclables (lineal) i el promoció (circular).

Els dos mòduls principals del model corresponen a un mòdul d'avaluació ambiental i un altre d'avaluació financera. Al mòdul ambiental es calculen, entre altres variables, els beneficis per reducció d'empremta de carboni que s'aconsegueixen en minimitzar volums de residus aprofitables transportats i disposats en abocadors, o el cens de recuperadors/recicladors d'ofici per promoure'n l'important labor a la cadena de gestió de residus, disseny de rutes selectives i promoció d'ocupació.

Al mòdul financer, es calculen les variables econòmiques a partir de la quantificació de residus aprofitables produïts a les municipalitats d'interès, considerant-los com a unitat de negoci associada a la correcta separació que han de realitzar tots els sectors de generació tipificats.

Es fan així estimacions d'ingressos, costos i inversions per a la implementació de plantes d'aprofitament de residus, a partir de fluxos de caixa amb un horitzó d'avaluació predefinit i consideracions de finançament.

Com a exemples d'aplicació, M-GRCT s'ha utilitzat per simular la gestió de residus aprofitables en un conjunt de municipis d'economia deprimida a Colòmbia. Les característiques socioeconòmiques d'aquests territoris, els informes oficials associats a la gestió dels seus residus i altres criteris base, van permetre'n la selecció. Els resultats aconseguits exposen interessants contrastos i xifres associades als potencials beneficis ambientals i econòmics que es poden aconseguir amb la implementació real del model.

Abstract

The M-GRCT model, main product developed in this research, aims to promote better environmental practices for the management of usable solid waste in disadvantaged municipal contexts (municipalities with depressed economies). It is an important technical instrument that provides support for municipal waste management with a focus on promoting the circular economy.

M-GRCT is supported by a dynamic office automation tool that has been programmed to calculate variables of two large modules in predefined simulation scenarios, with the aim of evaluating its efficiency by comparing the traditional recyclable waste management model (linear) and the promoted-do (circular).

The two main modules of the model correspond to an environmental assessment module and a financial assessment module. The environmental module calculates, among other variables, the benefits of reducing the carbon footprint achieved by minimizing volumes of usable waste transported and disposed of in landfills, or the census of collectors/recyclers by trade to promote its important work in the waste management chain, design of selective routes and employment promotion.

In the financial module, the economic variables are calculated based on the quantification of usable waste produced in the municipalities of interest, considering them as a business unit associated with the correct separation that all typified generation sectors must carry out.

Thus, estimates of income, costs and investments are made for the implementation of waste utilization plants, based on cash flows with a predefined evaluation horizon and financing considerations.

As application examples, M-GRCT has been used to simulate the management of usable waste in a group of municipalities with depressed economies in Colombia. The socio-economic characteristics of these territories, the official reports associated with their waste management and other basic criteria, allowed their selection. The results achieved expose interesting contrasts and figures associated with the potential environmental and economic benefits that can be achieved with the real implementation of the model

Agradecimientos

La realización de esta tesis doctoral sugiere de mi parte, inicialmente, un agradecimiento enorme al Dr. Javier Rodrigo Ilarri, quien apoyó todo el proceso investigativo, encausó la consecución de los productos científicos y permitió un vínculo demasiado significativo en medio de una pandemia y la distancia. Gracias, Dr. Javier, por esta oportunidad, por esta particular amistad, por la motivación y los constantes consejos.

Extiendo también mi gratitud a la Dra. María Elena Rodrigo Clavero, por sus aportes, buenos ejemplos, referencias y voces de aliento permanentes.

Al programa de Doctorado en Ingeniería del Agua y Medioambiental, al personal administrativo que siempre atendió cualquier consulta y proceso estando lejos.

Agradecimiento enorme a mis estudiantes del programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad de La Salle en Colombia, por impulsarme y permitirme mostrarles que la magia de la ciencia cautiva y merece la pena.

A Paula, Miguel, Lesly, Nury y Alejandro; quienes escucharon mis ideas y juntaron sus manos con las mías para lograr materializarlas.

A Janna, por su existencia en pleno.

A todos mis seres amados, por dejarme ser siempre.

Índice

Índice de figuras

Índice de tablas

1. Introducción y objetivos	1
2. Avances en la implementación de técnicas de economía circular en zonas rurales de Colombia en un marco de desarrollo sostenible	5
Resumen.....	5
Siglas.....	6
2.1. Introducción	6
2.2. Panorama general de la gestión de residuos sólidos urbanos en Colombia	9
2.3. Materiales y métodos	12
2.3.1. Selección de municipios.....	12
2.3.2. Evaluación de los Planes de Manejo de Residuos Sólidos.....	14
2.3.2.1. Generación y cuantificación de RSU	15
2.3.2.2. Recolección y transporte de RSU.....	16
2.3.2.3. Barrido y limpieza de carreteras y zonas públicas	16
2.3.2.4. Potencial de reciclaje de RSU	17
2.3.2.5. Vertedero final de RSU	17

2.4. Resultados	17
2.4.1. Producción de RSU	17
2.4.2. Recolección y transporte de RSU.....	21
2.4.3. Barrido y limpieza de carreteras y áreas públicas	22
2.4.4. Potencial de reciclaje de RSU	23
2.4.5. Vertederos finales.....	25
2.5. Discusión.....	27
2.6. Conclusiones	28
2.7. Referencias.....	30
3. M-GRCT: un modelo dinámico de economía circular para el óptimo diseño de sistemas de gestión de residuos en municipios de economía deprimida.....	37
Resumen.....	37
Siglas	38
3.1. Introducción y Objetivos	38
3.2. Materiales y métodos.....	40
3.2.1. Municipios de bajos ingresos: características generales.....	40
3.2.2. M-GRCT: Un modelo numérico para la simulación de sistemas de gestión de residuos sólidos reciclables	41
3.2.2.1. Generación y segregación de residuos sólidos reciclables (G).....	43
3.2.2.2. Recogida de residuos reciclables (R)	45
3.2.2.3. Clasificación y Almacenamiento Temporal en Centros de Acopio (C).....	46
3.2.2.4. Transferencia a Gerentes Externos y Repaso a la Cadena de Producción (T).....	47
3.2.3. DATA4: La herramienta de soporte informático M-GRCT	47
3.2.4. Definición de escenarios basados en criterios de gestión de residuos reciclables	51
3.2.5. Procesamiento de matrices de tipo macro	52
3.2.6. Ejecución del modelo M-GRCT mediante DATA4	54
3.2.7. Viabilidad financiera del modelo de economía circular	56
3.3. Estudio de caso: Uso del modelo M-GRCT en el municipio de Guateque (Colombia)	57

3.3.1. Descripción del área de estudio y selección de escenarios.....	57
3.3.2. Descripción del área de estudio y selección de escenarios.....	59
3.3.3. Estudio de caso: componente (G)	60
3.3.4. Estudio de caso: componente (C).....	62
3.3.5. Estudio de caso: componente (T).....	62
3.3.6. Resultados del modelo y análisis de la viabilidad financiera	63
3.4. Discusión.....	65
3.5. Conclusiones	67
3.6. Referencias.....	68
4. Implementación de técnicas de economía circular para la gestión óptima de residuos sólidos reciclables utilizando el modelo de apoyo a la decisión M-GRCT.....	75
Resumen.....	75
Siglas.....	76
4.1. Introducción y objetivos.....	76
4.2. Materiales y métodos	78
4.2.1. DATA4: La herramienta de soporte informático M-GRCT.....	78
4.2.1.1. Procedimiento de control ambiental M-GRCT	79
4.2.1.2. Control Financiero M-GRCT	81
4.2.2. Selección de Municipios	83
4.2.3. Selección de Municipios	85
4.3. Resultados	86
4.3.1. M-GRCT Control Ambiental en Municipios	86
4.3.1.1. Generación Anual de Residuos Reciclables.....	86
4.3.1.2. Proyección del número de recicladores de residuos.....	89
4.3.1.3. Reducción anual de las emisiones de metano	89
4.3.1.4. Reducción anual de la huella de carbono	90
4.3.2. Control financiero de M-GRCT en ambos municipios	90
4.4. Discusión.....	93
4.5. Conclusiones	95
4.6. Referencias.....	96

5. Conclusiones y líneas de futura investigación.....	101
6. Contribuciones científicas.....	105

Índice de figuras

Figura 2.1. Mapa de ubicación de Colombia dentro de América del Sur	13
Figura 2.2. Ubicación geográfica de los seis municipios: Región Cundinamarca y Sibaté; Región de Boyacá y Chiquinquirá; Región de Santander y San Gil; Región valle del Cauca y Zarzal; Región del Meta y Granada; Región Antioquia y Marinilla.....	14
Figura 2.3. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para el análisis de la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) en áreas de economía deprimida.....	15
Figura 2.4. Estimación de la tasa de producción futura de RSU en los seis municipios (a) Sibaté; b) Chiquinquirá; c) San Gil; d) Zarzal; e) Granada; f) Marinilla.....	20
Figura 2.5. Composición porcentual de los RSU	21
Figura 2.6. Distribución en fracciones del potencial de reciclaje de RSU en cada municipio	23
Figura 2.7. Ubicación geográfica de los sitios de disposición final dentro del área del municipio. a) Municipalidad de Sibaté y relleno sanitario de Nuevo Mondoñedo; b) Municipalidad de Marinilla y relleno sanitario de Los Saltos; c) Municipalidad de Chiquinquirá y relleno sanitario de Carapacho; d) Municipalidad de San Gil y relleno sanitario de El Cucharero (Acuasan); e) Municipio de Granada y relleno sanitario de La Guaratara; f) Municipalidad de Zarzal y relleno sanitario de presidente.	26
Figura 3.1. Esquema conceptual del modelo M-GRCT	42
Figura 3.2. Fuentes de generación de residuos reciclables consideradas por el modelo M-GRCT: componente (G).....	44
Figura 3.3. Clasificación de residuos reciclables considerada por el modelo M-GRCT: componente (R).....	45
Figura 3.4. Características logísticas y administrativas de un centro de recogida de residuos. Modelo M-GRCT: componente (C).....	46
Figura 3.5. Vista general del menú principal de la herramienta DATA4	48
Figura 3.6. Panel de control DATA4	50
Figura 3.7. Ubicación geográfica del municipio de Guateque.....	58
Figura 3.8. Atributos y variables incluidos en la herramienta DATA4 para el caso de estudio	59
Figura 3.9. Proyección de la tasa de reciclaje en Guateque (2020-2031)	61
Figura 3.10. Número estimado de recicladores por tipo en el municipio de Guateque	62
Figura 3.11. Resultados del cuadro de mando financiero en DATA4: Ventas proyectadas por tipo de residuo reciclable con una tasa de reciclaje anual del 1% al 10%.	63
Figura 3.12. Resultados del cuadro de mando financiero en DATA4: Proyección de flujo de caja (ingresos-gastos) para el modelo de economía lineal y el escenario de simulación de economía circular.....	64

Figura 3.13. Resultados del cuadro de mando financiero en DATA4: Reducción de costes de recogida, transporte y disposición final de residuos utilizables implementados en el escenario de simulación (modelo de economía circular).....	65
Figura 4.1. Definición de criterios para el procedimiento de control ambiental en el modelo M-GRCT	80
Figura 4.2. Ubicación geográfica de los municipios de Tibasosa y Arbeláez dentro de las regiones de Cundinamarca y Boyacá (Colombia).....	85
Figura 4.3. Producción de residuos reciclables y características proyectadas, (izquierda) Escenario 1: Tibasosa; (derecha) Escenario 2: Arbeláez.	88
Figura 4.4. Proyección del número de recicladores, (izquierda) Escenario 1: Tibasosa; (derecha) Escenario 2: Arbeláez.....	89
Figura 4.5. Emisiones de metano en reducciones de rellenos sanitarios, (izquierda) Escenario 1: Tibasosa; (derecha) Escenario 2: Arbeláez.....	89
Figura 4.6. Reducción anual de la huella de carbono, (izquierda) Escenario 1: Tibasosa; (derecha) Escenario 2: Arbeláez	90

Índice de tablas

Tabla 2.1. Extensión territorial de los municipios en estudio	13
Tabla 2.2. Principales características de los escenarios de generación de residuos analizados.....	16
Tabla 2.3. Producción per cápita de RSU en zonas urbanas y rurales en municipios de interés.....	17
Tabla 2.4. Cantidades de generación de RSU para cada escenario y municipio definido.....	18
Tabla 2.5. Principales Componentes de recolección y transporte en los municipios seleccionados	22
Tabla 2.6. Eficiencia de la cobertura de recolección de RSU para cada municipio evaluado	22
Tabla 2.7. Barrido y limpieza de carreteras y áreas públicas municipales.....	23
Tabla 2.8. Características del sistema de reciclaje en los municipios de quinta categoría.....	24
Tabla 2.9. Información general, vertederos de referencia.....	25
Tabla 3.1. Lista de parámetros: DATA4	51
Tabla 3.2. Lista de parámetros y procesos matemáticos: DATA4	53
Tabla 3.3. Procesamiento del contexto financiero en la matriz de tipo macro.....	53
Tabla 3.4. Caracterización de residuos reciclables DATA4.....	54
Tabla 3.5. Registro de información relacionado con el componente (R): DATA4.....	55
Tabla 3.6. Registro de información relacionada con el componente (C): DATA4.....	55
Tabla 3.7. Información relacionada con el componente (T)-DATA4.....	56
Tabla 3.8. Registro e información general del municipio de Guatemala.....	59
Tabla 3.9. Composición de residuos reciclables: Guatemala.....	60
Tabla 3.10. Datos relacionados con el componente (C): DATA4.....	62
Tabla 3.11. Viabilidad financiera evaluada a 10 años (2021-2031) del modelo simulado y del modelo de economía lineal.....	65
Tabla 4.1. Criterios de decisión sobre la viabilidad de las alternativas de inversión económica	83
Tabla 4.2. Criterios ponderados matriz de selección de municipios	84
Tabla 4.3. Evaluación PGIRS: Matriz DAFO	86
Tabla 4.4. Criterios de evaluación de los modelos de gestión lineal y circular (M-GRCT).....	91
Tabla 4.5. Entradas de flujo de caja y valores de referencia en cada escenario	92

1. Introducción y objetivos

Aun cuando hoy muchos países han logrado importantes avances en la gestión de residuos, no dejan de hacerse visibles las brechas que las políticas económicas pueden generar este campo. Con carácter general, son muchas las naciones que no terminan de asegurar la reducción de los impactos ambientales asociados a las malas prácticas de gestión de los residuos y los daños colaterales que se alcanzan con ello en la salud pública.

Los catalogados territorios o municipalidades de economía deprimida indiscutiblemente enfrentan múltiples retos que incluyen de manera visible: los problemas de saneamiento básico, la desnutrición, bajos niveles de acceso a educación, deficientes servicios de salud y el desempleo, entre otros.

A pesar de la significancia de estas dificultades, las nuevas estrategias emergentes de gestión de residuos, apoyadas en las normas locales y regionales, promueven escenarios que conducen potencialmente a la reducción de las problemáticas antes referidas. Para el caso particular de municipios de economía deprimida colombianos, actualmente se hace evidente la forma en que la recuperación de residuos reciclables desde la informalidad se convierte en una fuente de ingresos para muchas personas y en una buena manera de contribuir a reducir los inconvenientes asociados a la mala gestión de residuos.

En la presente tesis doctoral se ha desarrollado el modelo M-GRCT, el cual tiene por objeto promover mejores prácticas ambientales de gestión de residuos sólidos aprovechables en contextos municipales desfavorecidos. Esta herramienta técnica considera la integración de los generadores de residuos, los procesos efectivos de segregación de los mismos, la promoción de rutas selectivas de aprovechamiento apoyadas en los

recuperadores/recicladores de oficio y la participación de los sectores productivos bajo un enfoque holístico que incluye una valoración económica y ambiental de los procesos y resultados.

La intención última de esta propuesta, es promover la toma acertada de decisiones por parte de autoridades y administraciones locales, proyectando la materialización de compromisos ambientales mundiales tan trascendentes como los son los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

En este marco de referencia, la presente tesis doctoral presenta los siguientes objetivos:

Objetivo general

Desarrollar un modelo de economía circular para la gestión de residuos sólidos. A partir de su implementación y evaluación en municipios colombianos, se proyectará la reducción de los residuos municipales enviados al vertedero, la generación de ingresos alternos y la disminución de los costos de saneamiento local.

Objetivos específicos

- 1.- Diagnosticar la gestión de residuos sólidos municipales colombianos mediante la evaluación de la estructura de los planes de gestión integral de residuos.
- 2.- Realizar un análisis del estado del arte sobre modelos de economía circular asociados a la gestión de residuos.
- 3.- Elaborar y proponer la implementación del modelo en una muestra de municipios colombianos de economía deprimida, en concordancia con las disposiciones normativas vigentes.
- 4.- Evaluar la implementación del modelo a partir de herramientas técnicas y escenarios simulados, promoviendo la mejora en la gestión de residuos.

El presente documento desarrolla los objetivos anteriores estructurándose del siguiente modo:

- En el capítulo 1 se presenta el problema a abordar, los objetivos de la investigación y se expone la estructura de la tesis doctoral.
- En el capítulo 2 se muestra el diagnóstico de situación respecto a la gestión de residuos sólidos y se presenta el estado del arte de modelos de economía circular asociados a gestión de residuos. Se analizan los planes de gestión integral de residuos (PGIRS) de seis municipios de economía deprimida colombianos y se

expone el potencial que tiene los residuos sólidos reciclables como base para un modelo de economía circular.

- El capítulo 3 presenta el modelo M-GRCT, como una nueva herramienta para la gestión de residuos en municipios de economía deprimida y se complementa el estado del arte objetivo de la tesis. Se describe el modelo de forma conceptual, los módulos que lo componen, y la herramienta ofimática que lo soporta junto con las variables y escenarios de simulación. Se incluyen los resultados simulados de la implementación del modelo en un caso de estudio.
- El capítulo 4 presenta una evaluación más completa de la aplicación simulada del modelo M-GRCT en un conjunto de municipios colombianos. Se expone la metodología para la selección de municipios, se realiza un análisis de los módulos ambiental y financiero que conforman el modelo de acuerdo con los escenarios de simulación. Finalmente se exponen los estimativos y su respectivo análisis para la viabilidad de implementación real del modelo.
- En el capítulo 5 se exponen las conclusiones y líneas de futura investigación asociadas al proceso de consolidación y los resultados alcanzados con esta tesis.
- En el capítulo 6 se muestran las contribuciones realizadas con la tesis.

El contenido de los capítulos 2, 3 y 4 fue objeto de los siguientes artículos de investigación publicados en revistas indexadas JCR.

Artículo correspondiente al capítulo 2.

Rodrigo-Ilarri, J.; Vargas-Terranova, C.-A.; Rodrigo-Clavero, M.-E.; Bustos-Castro, P.-A. Advances on the Implementation of Circular Economy Techniques in Rural Areas in Colombia under a Sustainable Development Framework. *Sustainability* 2021, 13, 3816. <https://doi.org/10.3390/su13073816>

Artículo correspondiente al capítulo 3.

Vargas-Terranova, C.-A.; Rodrigo-Ilarri, J.; Rodrigo-Clavero, M.-E.; Rozo-Arango, M.-A. M-GRCT: A Dynamic Circular Economy Model for the Optimal Design of Waste Management Systems in Low-Income Municipalities. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 2681. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052681>

Artículo correspondiente al capítulo 4.

Vargas-Terranova, C.-A.; Rodrigo-Illarri, J.; Rodrigo-Clavero, M.-E.; Parra-Saad, A. Implementing Circular Economy Techniques for the Optimal Management of Recyclable Solid Waste Using the M-GRCT Decision Support Model. *Appl. Sci.* 2022, 12, 8072. <https://doi.org/10.3390/app12168072>

2. Avances en la implementación de técnicas de economía circular en zonas rurales de Colombia en un marco de desarrollo sostenible

Rodrigo-Ilarri, J.; Vargas-Terranova, C.-A.; Rodrigo-Clavero, M.-E.; Bustos-Castro, P.-A. Advances on the Implementation of Circular Economy Techniques in Rural Areas in Colombia under a Sustainable Development Framework. *Sustainability* **2021**, *13*, 3816. <https://doi.org/10.3390/su13073816>.

Resumen

Por primera vez en la literatura científica, este artículo presenta un análisis de la implementación de técnicas de economía circular en un marco del desarrollo sostenible en seis municipios con una economía deprimida en Colombia. El análisis se basa en los datos de producción de residuos sólidos a escala local, la valorización de éstos para su posterior reciclaje, y la identificación y cuantificación de las variables asociadas al tratamiento y disposición final de los residuos, de acuerdo con el marco regulatorio colombiano. Los valores de generación de residuos se obtienen considerando tres escenarios diferentes, en los que se comparan los valores obtenidos y cuanto difieren de lo establecido en los planes de gestión. Se han identificado diferencias importantes entre los programas de gestión de residuos de cada municipio. Estas diferencias están fundamentalmente asociadas a los diferentes procesos administrativos considerados para cada caso individual. Esta investigación es un buen punto de partida para el desarrollo de modelos de gestión de residuos basados en técnicas de economía circular, mediante la implementación posterior de una herramienta ofimática en regiones deprimidas como las estudiadas.

Siglas

RSU: Residuos Sólidos Urbanos

PGIRS: Plan(es) Gestión Integral de Residuos Sólidos

PIB: Producto interno bruto

PPC: Producción per cápita

2.1. Introducción

Colombia cuenta con un marco normativo (Resolución 3754/2014) que promueve la regulación del servicio de limpieza pública. Sin embargo, la literatura científica incluye muy pocas investigaciones que expliquen y analicen las singularidades a la hora de aplicar técnicas de economía circular en las zonas rurales, incluido el análisis específico de la promoción y contribución de elementos clave en términos de gestión de residuos en un marco de desarrollo sostenible. Sólo algunos trabajos recientes se han centrado en mostrar los avances de la gestión de residuos en las economías municipales con mayor crecimiento de las ciudades más grandes del país, como Bogotá y Medellín (Padilla y Trujillo, 2018; Valenzuela, 2020).

A partir del análisis realizado en las grandes ciudades, se obtienen previsiones respecto a la producción de residuos sólidos a gestionar. Estas previsiones pueden ser utilizadas como una primera aproximación por las entidades encargadas de la gestión ambiental en los municipios pequeños. Las particularidades de la economía local de estos municipios son muy diferentes a las de las grandes ciudades y exponen situaciones económicas adversas. Por lo tanto, se deben establecer estrategias en la gestión de residuos sólidos para la implementación, mejora y operación de la prestación del servicio público de limpieza y gestión de residuos bajo criterios de economía circular. Estas estrategias deben incluir el diseño de rutas de recolección de residuos, metodologías de separación, reciclaje, tratamiento y eliminación.

Además, las estrategias de gestión deben considerar necesariamente el establecimiento de acciones dirigidas a fortalecer las asociaciones de recicladores locales que realizan un trabajo fundamental en la gestión de residuos en esta escala local. En este contexto, la implementación de técnicas de economía circular significa un beneficio para la comunidad, reduciendo los impactos ambientales asociados a la gestión de residuos sólidos urbanos y minimizando los rechazos depositados en vertederos. Además, se pueden implementar otros procesos de promoción de la ecoeficiencia con el uso de materias primas distintas de los residuos, aprovechando el potencial de producción de las actividades agrícolas en las zonas rurales (Borowski, 2021).

La literatura científica muestra que el desarrollo económico y el crecimiento de la población implican la aparición de ciudades más pobladas y prósperas que demandan una mayor oferta de bienes y servicios que participan en el mercado local y global, lo que resulta en un aumento en la generación de residuos sólidos (Kaza et al., 2018;

Khandelwal, 2019; Cervantes et al., 2018). La generación de residuos sólidos urbanos (RSU) es un problema que requiere una gestión integral debido a los impactos sociales, económicos y ambientales que causan (Zhang et al., 2010; Kuehr, 2007). Una gestión segura de los residuos sólidos urbanos es, por lo tanto, un desafío persistente en la sociedad moderna (Wagner, 2008).

Actualmente, la principal tendencia en la gestión de residuos es la economía circular (Margallo et al., 2019), que se centra en promover la reutilización y la reducción de residuos, de forma que los recursos se utilicen al máximo y se amplíe su vida útil (Cobo et al., 2018; Arena, 2014). Del mismo modo, respecto a los residuos generados por la agroindustria, la tecnología de compostaje ha sido sofisticada, evaluando las características fisicoquímicas de diferentes materias primas, como sucede con los residuos alimentarios o materia vegetal (frutas, trigo, celulosa). A través de este desarrollo tecnológico, se impulsa la estrategia de economía circular para los residuos orgánicos, no solo en el uso de los residuos, sino también en el uso que se le da al compostaje por parte de los agricultores (Zelazi, 2021). Sin embargo, la situación en las economías emergentes y en desarrollo es muy diferente.

Mientras que los países desarrollados intentan implementar sistemas de gestión de residuos integrales y sostenibles (Laurent et al., 2014), las naciones emergentes luchan por cambiar la eliminación de desechos en vertederos no controlados (vertederos a cielo abierto) a su eliminación en rellenos sanitarios o controlados (Ferronato et al., 2019; Vaccari et al., 2012). La mayoría de los vertederos no controlados del mundo se encuentran en África, América Latina y Asia, y tienen un impacto directo en la salud pública y ambiental de aproximadamente 64 millones de personas (Zurbrügg, 2014).

Un ejemplo de los problemas de salud que pueden surgir debido a la eliminación inadecuada de los residuos es la situación que se da en Conakry, Guinea, en la que los residuos se queman abiertamente o son vertidos en cuerpos de agua, generando un aumento en la morbilidad de las poblaciones urbanas que conduce a un aumento de la mortalidad. Esta situación se produce por los gases emitidos de la quema de residuos que generan problemas respiratorios. Del mismo modo, hay una presencia significativa de microplásticos y patógenos en los cuerpos de agua utilizados por la población, lo que hace que las personas se envenenen o se expongan a enfermedades fatales (Borowski, 2021).

Así, por ejemplo, en la mayoría de los países africanos (54) menos del 20% (11) de los residuos sólidos urbanos generados se eliminan en vertederos controlados (Vaccari et al., 2019). En China, dependiendo de la región, este porcentaje aumenta al 30-60% (Odowu et al., 2019). En América Latina, hay países como Brasil, donde el 60% de sus municipios utilizan vertederos incontrolados para gestionar sus RSU (Wang et al., 2018). Esto se debe fundamentalmente a la inexistencia de políticas de planificación de la gestión de residuos (De Sousa y Fernandino, 2019).

Por lo tanto, aunque existen alternativas con menor impacto ambiental, el relleno sanitario sigue siendo el método de eliminación de desechos más utilizado en los países en

desarrollo. Es una tecnología barata, conocida y con menos problemas que los generados por los vertederos incontrolados (Costa y Díaz, 2020; Manfredi y Christensen, 2009).

En cuanto a las operaciones de reciclaje, mientras que la media europea ronda el 25%, China alcanza el 10% y los países latinoamericanos apenas alcanzan el 5% (Guerrero et al., 2013).

Los países de ingresos bajos y medianos comparten varias similitudes con respecto a sus condiciones socioeconómicas, en particular al tener sistemas de gestión de residuos que funcionan con estándares bajos (Botello et al., 2018). Esta situación crea la necesidad de formar alternativas de tratar los residuos, lo que lleva a la aparición de actividades informales de residuos (llamado el "sector informal de residuos").

La existencia de este sector informal contribuye a aumentar las tasas de reciclaje de muchas ciudades de países de ingresos bajos y medios, reduciendo el volumen de residuos depositados en vertederos y creando valor agregado en el sector económico (Aparcana, 2017). Sin embargo, a pesar de estos beneficios, el sector informal también está asociado con condiciones sociales y económicas negativas (Wilson et al., 2012; Medina, 2000).

Aproximadamente, el 1% de la población urbana mundial está involucrada en la valoración de residuos sólidos; en América Latina, Asia y África, el trabajo de estas personas (recicladores) representa casi el 30% de este proceso de recuperación (Wilson et al., 2006).

El sistema óptimo de gestión de RSU es un aspecto esencial para tener en cuenta en cualquier desarrollo. Este debe cubrir los aspectos de optimización en términos de tecnología y costo para lograr la sostenibilidad (Gutberlet, 2015). Sin embargo, en muchas ocasiones se pretende implantar en zonas rurales sistemas de gestión de residuos que ya están implantados en zonas urbanas sin estudios de campo. Esto significa que los sistemas de gestión de RSU en los países en desarrollo son generalmente ineficientes, ya que carecen de estructuras administrativas y financieras adecuadas, una buena legislación y recursos humanos adecuados (Anwar et al., 2018).

Las características y la composición de los residuos sólidos generados en las zonas rurales son diferentes de las zonas urbanas. Para implementar un sistema óptimo de gestión de residuos, es necesario conocer las características y composición de los residuos en las zonas rurales, ya que contienen una gran fracción de residuos orgánicos (más del 50% del total), cierta cantidad de residuos inorgánicos (vidrio, plástico, papel, metales) y una cantidad insignificante de residuos tóxicos (Patwa et al., 2020).

Existen estudios que demuestran la importancia y el valor de medir y evaluar cuantitativamente los sistemas de gestión de residuos. Para la gestión de residuos, los responsables políticos no pueden gestionar lo que no pueden medir. Los datos son de vital importancia para guiar las transiciones hacia sistemas de gestión de residuos sostenibles y circulares (Elgie et al., 2021).

Para implementar y lograr una eficiencia óptima en la gestión de residuos sólidos, cada etapa del sistema de gestión debe analizarse desde una perspectiva económica, ambiental y social (Yıldız et al., 2021). El desarrollo de un plan de manejo de residuos sólidos urbanos es un proceso complejo. Llevar a cabo un plan eficiente, cuantificar y pronosticar la generación de residuos sólidos son componentes esenciales (Solano et al., 2019).

2.2. Panorama general de la gestión de residuos sólidos urbanos en Colombia

La transición de un sistema de gestión de residuos basado en una economía lineal a uno basado en la economía circular se traduce en políticas públicas, lo que es un desafío global. En el caso de los países sudamericanos, la gestión de los RSU es un gran reto, ya que su generación aumenta continuamente (Calderón y Rutkowski, 2020). Además, existen otros problemas, como la eliminación inadecuada de residuos, la insuficiencia financiera en los sistemas urbanos y la presencia de un sector informal de reciclaje (Ezeah et al., 2013; Hettiarachchi et al., 2018; Velis, 2017).

El sistema más utilizado en Colombia para la eliminación de residuos es la disposición en vertederos (97% del total), incluyendo tanto el relleno sanitario controlado como el no controlado. Los residuos acumulados en estas instalaciones afectan a la recuperación del suelo y generan problemas ambientales derivados de la producción de lixiviados y biogás. Sin embargo, los vertederos siguen siendo elegidos como la mejor opción para la eliminación de residuos (Molano, 2019).

En 2018 en Colombia, se dispuso un promedio de 30.973 t/día de residuos sólidos en todos sus municipios, lo que corresponde al 97% de los residuos que se generaron a nivel nacional. Esta disposición de residuos se realizó tanto en sitios autorizados como no autorizados. El 89,5% de esta disposición se realizó en rellenos sanitarios, celdas de contingencia y plantas de tratamiento autorizadas por las autoridades ambientales, mientras que el 10,5% corresponde a sitios de eliminación no autorizados en los que se utilizan celdas temporales y vertederos a cielo abierto. Sin embargo, a nivel nacional, los vertederos siguen siendo el sistema de tratamiento predominante (56%) (SSPD, 2019a).

Adicionalmente, se reportaron 974.039 toneladas de material reutilizable en el país, siendo el papel y cartón el mayor porcentaje (55%), seguido de metales (29%), plásticos (10%), y vidrio, madera y textiles (SSPD, 2019b).

La gestión integral de residuos sólidos en Colombia se realiza en conjunto con el servicio público de limpieza con el propósito de avanzar hacia una economía circular. Este grupo de políticas busca mantener el valor de los productos y materiales el mayor tiempo posible, considerando así un modelo lineal de producción y consumo. Las políticas actuales promueven la educación y la innovación en términos de separación, uso y tratamiento de residuos sólidos (DPN, 2016).

El plan de desarrollo colombiano 2018-2022 promueve la implementación de la estrategia de economía circular para fomentar el desarrollo económico, ambiental y social del país, tratando de aumentar el reciclaje y el uso de residuos sólidos con el propósito de reducir un 20% de los gases de efecto invernadero para 2030, implementando una gestión integral de residuos en todo el país con el fin de mejorar la reutilización de residuos y fortalecer los programas educativos (MinAmbiente, 2019).

En Colombia, los municipios se clasifican de acuerdo con su población y los ingresos corrientes anuales según lo establecido en el artículo 6 de la Ley 617 de 2000. Estar categorizado permite tener ciertos tipos de funciones administrativas, como el acceso a las inversiones, la mejora de la gestión pública y la asignación y distribución de las transferencias nacionales (Duque, 2017). Para ser clasificado dentro de la quinta categoría, por ejemplo, un municipio debe tener una población entre diez mil uno (10.001) y veinte mil (20.000) habitantes o presentar un ingreso corriente entre quince mil (15.000) y veinticinco mil (25.000) salarios mínimos legales mensuales (Congreso de Colombia, 2000).

De acuerdo con estas funciones administrativas, según lo establecido en el artículo 5 de la Ley 142 de 1994, es responsabilidad de los municipios garantizar la prestación eficiente del servicio de limpieza pública de residuos sólidos a sus habitantes, ya sea por parte de empresas oficiales, privadas, mixtas, o directamente por parte de la administración municipal (Congreso de Colombia, 1994).

Este servicio se presta de acuerdo con los lineamientos del Plan Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS). Un municipio debe aprobar un plan que contenga los siguientes programas: (i) Gestión institucional para la prestación del servicio de limpieza pública, (ii) generación de residuos sólidos, (iii) recolección, transporte y traslado, (iv) barrido y limpieza de caminos y áreas públicas, (v) limpieza de playas costeras y ribereñas, (vi) corte de césped y poda de árboles en caminos y áreas públicas, (vii) lavado de áreas públicas, (viii) aprovechamiento, (ix) inclusión de recicladores, (x) disposición final, (xi) manejo de residuos sólidos especiales, (xii) manejo de residuos de construcción y demolición, (xiii) gestión de residuos sólidos en zonas rurales, y (xiv) gestión de riesgos (MVCT y MADS, 2014).

En Colombia, la investigación ambiental se ha centrado hasta ahora en el control de la contaminación atmosférica, en el diseño de tecnologías para el tratamiento de agua potable y aguas residuales domésticas, y en estrategias de salud pública. Sin embargo, la cuestión del tratamiento de los residuos sólidos no ha progresado significativamente. Actualmente, la única tecnología para tratar los residuos es el vertido, que presenta en la mayoría de los vertederos fallos operativos y técnicos.

En Colombia, en 2018, solo se reutilizaron 974.039 toneladas del total anual de residuos que se generaron (11.305.145 toneladas). Eso significa que sólo el 8,61% del total de residuos se reutilizó. Según los informes nacionales colombianos (SSPD, 2019a, SSPD, 2019b), la práctica habitual de la gestión de RSU comienza con la separación voluntaria en origen por parte de los generadores de residuos, el almacenamiento temporal y el acondicionamiento en los centros de recolección de residuos, que son principalmente

utilizados por los sectores productivos, y la reincorporación de estos como materia prima secundaria en la producción de insumos tales como el cartón, papel, vidrio y plástico. Destacan empresas como Peldar, Cartón de Colombia, Fibras Nacional y Acerías Paz del Río, líderes en la incorporación de materiales recuperados para el desarrollo de sus procesos (MinVivienda, 2020; Alcaldía Municipal de Zarzal, 2015; Alcaldía Municipal de San Gil, 2015; Alcaldía Municipal de Marinilla, 2016; Alcaldía Municipal de Granada, 2016; Alcaldía Municipal de Sibaté, 2019).

Hasta el momento, la gestión integral de los residuos sólidos en Colombia se ha limitado a formular o actualizar PGIRS, pero no se ha realizado ningún análisis sobre las tasas de generación, ni se ha evaluado la calidad de la prestación del servicio de limpieza pública (Gélvez, 2017). Esto se debe a que a nivel administrativo los esfuerzos se han centrado en cumplir con la recogida y distribución final de residuos.

En un contexto internacional, en la gestión de residuos sólidos, se ha identificado que en los países de ingresos bajos y medios se repiten diversos problemas (DNP, 2020). La falta de capacidad y habilidades técnicas fue la más reportada con una incidencia del 30%. En países como Kenia y Brasil, la barrera técnica surge en relación con la deficiente infraestructura del servicio de limpieza pública. Del mismo modo, en el caso de Filipinas, la principal barrera limitante para poder proponer acciones de mejora en la recogida y disposición final de los residuos es la falta de información sobre la composición de los residuos, su calidad, los precios de los materiales y la situación laboral de los trabajadores.

Al comparar ciudades de países de bajos ingresos, como los de Colombia, los problemas más comunes se refieren a dificultades técnicas y a la capacidad de recopilar información sobre las condiciones de servicio y sus componentes.

La literatura científica incluye pocos estudios realizados en países del entorno latinoamericano. Un análisis de la generación de residuos sólidos en Colombia (Colorado y Echeverri, 2020) se basó en el producto interno bruto (PIB). Este análisis comparó el PIB de Colombia con el de países como Brasil y Bolivia, destacando la relación inversa entre el PIB y la generación de residuos sólidos. En el caso de Brasil, la producción de residuos por unidad de PIB es menor en comparación con la de otros países, a pesar de que el PIB de Brasil es el más alto de América Latina. Por el contrario, en Bolivia, la generación de residuos sólidos es mayor en comparación con la de otros países, y el PIB boliviano es el más bajo de la región. Mientras Bolivia genera 92 toneladas de RSU por cada millón de dólares de PIB, Brasil genera 29 toneladas de RSU por cada millón de dólares de PIB. En Colombia, que tiene el tercer PIB más grande de América Latina, hay una marcada diferencia en las cantidades reportadas por las grandes ciudades, que han controlado los vertederos, y las reportadas en las zonas rurales, donde las cantidades de residuos producidos son mayores.

Otros estudios se centran en el análisis de la generación y composición de residuos sólidos en diferentes países de América Latina y el Caribe (Hernández et al., 2016) indican que, para países como Colombia, México, Paraguay, Perú y Ecuador, hay una tendencia

hacia una disminución en el contenido de desperdicio de alimentos, jardinería, cuero y caucho, papel y cartón, pero esta fracción sigue siendo predominante. Además, se han identificado diferencias estacionales, económicas y regionales. Para el caso particular del plástico, hubo un aumento en su producción, mientras que para el vidrio se observó una disminución en la cantidad presente en las diferentes ciudades en estudio.

Con base en lo anterior, esta investigación analiza los planes integrales de gestión de residuos sólidos en municipios colombianos de quinta categoría (con un componente agrícola importante), específicamente en la generación, recolección y transporte de residuos sólidos, barrido y limpieza de carreteras y áreas públicas, inclusión de recicladores y programas de eliminación determinados por el PGIRS como instrumentos administrativos clave para la prestación del servicio de limpieza pública.

La investigación realizada evalúa la gestión integral de los residuos sólidos en municipios de quinta categoría, evidenciando que cada municipio integra sus programas en función de su capacidad administrativa y técnica. Esa es la razón por la que los municipios implementan rutas de recolección con una frecuencia específica para gestionar los residuos y proponen desarrollar alternativas para la reutilización de los residuos al tiempo que garantizan el mantenimiento de las carreteras y áreas públicas con programas de barrido y limpieza.

2.3. Materiales y métodos

2.3.1. Selección de municipios

Siguiendo la clasificación del Departamento Nacional de Planeación y la actual legislación en Colombia, (Art. 2 de la Ley 617/2000 y Art. 6 de la Ley 136/1994 definen una categorización de los distritos y municipios dentro del país) (figura 2.1), los distritos y municipios se clasifican de acuerdo con su población e ingresos en seis categorías.

Para el desarrollo de esta investigación se seleccionaron seis municipios de la quinta categoría (figura 2.2). Estos municipios son Sibaté (ubicado en el departamento de Cundinamarca), Chiquinquirá (ubicado en el departamento de Boyacá), San Gil (ubicado en el departamento de Santander), Zarzal (ubicado en el departamento del Valle del Cauca), Granada (ubicado en el departamento de Meta) y Marinilla (ubicado en el departamento de Antioquía) (Congreso de Colombia, 2000; Congreso de Colombia, 1994; MVCT y MADS, 2014; DNP, 2020).

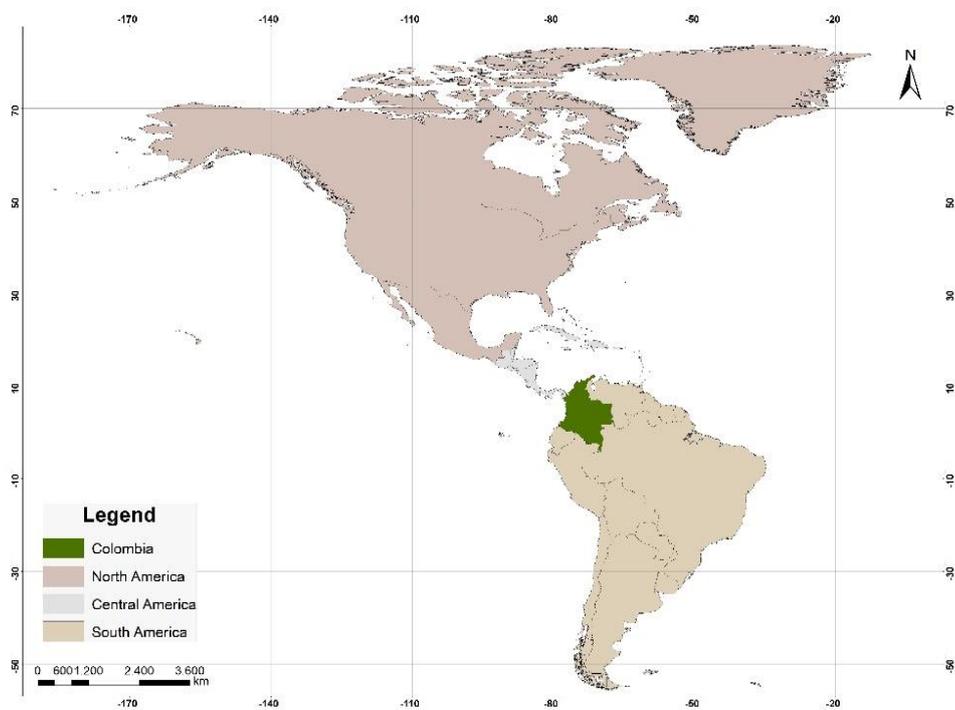


Figura 2.1. Mapa de ubicación de Colombia dentro de América del Sur

La tabla 2.1 muestra el área total de los municipios en estudio: Sibaté, Cundinamarca con una extensión de 120 km²; Chiquinquirá, Boyacá con una superficie de 171 km²; San Gil, Santander con una superficie de 150 km²; Zarzal, Valle del Cauca con una superficie de 371 km²; Granada, Meta con una superficie de 381 km²; y Marinilla, Antioquia con una superficie de 116 km², respectivamente.

Tabla 2.1. Extensión territorial de los municipios en estudio

Municipios	Extensión (km ²)
Sibaté	120
Chiquinquirá	171
San Gil	150
Zarzal	371
Granada	381
Marinilla	116

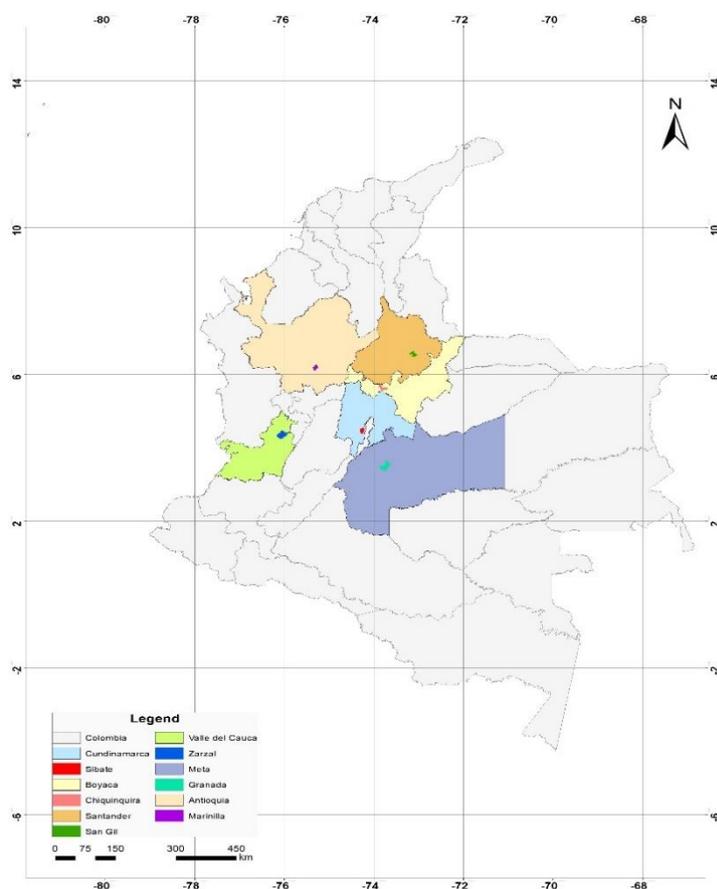


Figura 2.2. Ubicación geográfica de los seis municipios: Región Cundinamarca y Sibaté; Región de Boyacá y Chiquinquirá; Región de Santander y San Gil; Región valle del Cauca y Zarzal; Región del Meta y Granada; Región Antioquia y Marinilla

2.3.2. Evaluación de los Planes de Manejo de Residuos Sólidos

Para cada uno de los seis municipios seleccionados, se evaluaron los correspondientes PGIRS, el Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2018 y el Informe Nacional de Reutilización de Residuos 2018. Cada PGIRS fue analizado identificando dentro de cada uno de ellos la generación, uso, recolección, transporte, programas de transferencia y disposición final de residuos sólidos, así como la cobertura de los programas de limpieza de áreas públicas (PGIRS, 2020; Alcaldía Municipal de Zarzal, 2015; Alcaldía Municipal de San Gil, 2015; Alcaldía Municipal de Marinilla, 2016; Alcaldía Municipal de Granada, 2016; Alcaldía Municipal de Sibaté, 2019).

La metodología propuesta para analizar la gestión de RSU en áreas de bajos ingresos incluye el análisis individual de los siguientes aspectos clave que deben abordarse secuencialmente (figura 2.3)

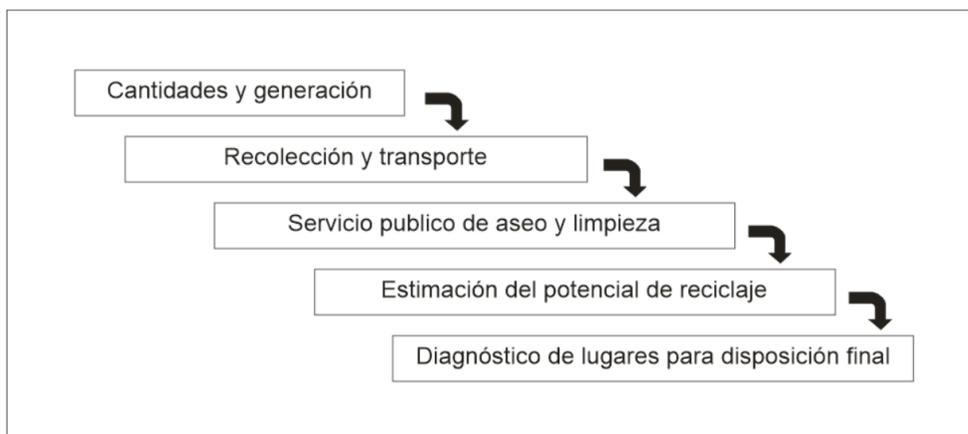


Figura 2.3. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para el análisis de la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) en áreas de economía deprimida.

Esta metodología ha sido diseñada teniendo en cuenta la falta común de información asociada a zonas económicamente deprimidas o con bajos ingresos anuales, en las que es muy común que no se disponga de datos fiables.

2.3.2.1. Generación y cuantificación de RSU

Se realizó una comparación para tres escenarios diferentes. Esta comparación se basó en la estimación de la cantidad de residuos generados por habitante en un día para una proyección de cinco años (período comprendido entre 2018 y 2022). El primer escenario (Referencia) responde a la proyección indicada en el PGIRS. El segundo escenario (Estimación 1) se obtuvo considerando la proyección de la población obtenida por el método geométrico utilizando las ecuaciones (2.3.2.1.1) y (2.3.2.1.2) y la producción de residuos sólidos per cápita establecida en el PGIRS. El tercer escenario (Estimación 2), se obtuvo a partir de la cantidad de residuos sólidos reportados en el Informe Nacional de Disposición Final para el año 2018 y la proyección de la población utilizando el método geométrico mostrado en las Ecuaciones (2.3.2.1.1) y (2.3.2.1.2) (MVCT, 2010):

$$P_f = P_{uc}(1 + r)^{T_f - T_{uc}} \quad (2.3.2.1.1)$$

$$r = \left(\frac{P_{uc}}{P_{ci}}\right)^{\frac{1}{(T_{uc} - T_{ci})}} \quad (2.3.2.1.2)$$

Donde P_f es la población correspondiente al año para el que se va a realizar la proyección; P_{uc} es la población esperada por el Departamento Nacional de Estadística de Colombia - DANE (DANE, 2005); P_{ci} es la población correspondiente al censo inicial con

información; r es la tasa de crecimiento anual en forma decimal; T_{uc} es el último año proyectado por el DANE y T_f es el año al que se debe hacer la estimación. La producción diaria de residuos sólidos por habitante se obtuvo de acuerdo con la Ecuación (2.3.2.1.3) (MVCT, 2012):

$$\text{Producción de RSU per cápita (PPC)} = \frac{\text{Kg de masa de RSU/d}}{\text{Población}} \quad (2.3.2.1.3)$$

Una vez obtenidos los valores de producción de residuos sólidos para los tres escenarios, se determinaron las diferencias como se muestra en las ecuaciones (2.3.2.1.4) y (2.3.2.1.5), calculando los errores absolutos y los errores relativos entre los valores de referencia y los valores estimados (Domínguez y Nieves, 2011):

$$\text{Error absoluto}_{1,2} = \text{abs}(\text{Valor ref} - \text{Estimación}_{1,2}) \quad (2.3.2.1.4)$$

$$\text{Error relativo}_{1,2}(\%) = \frac{\text{abs}(\text{Valor ref} - \text{Estimación}_{1,2})}{\text{Valor ref}} \quad (2.3.2.1.5)$$

En la tabla 2.2 se describen las principales características de los tres escenarios analizados para determinar los valores de generación de residuos sólidos y sus diferencias porcentuales. Se definió que, al momento de comparar las cifras oficialmente reportadas y las estimaciones, estos datos no deben superar un 50% de discrepancia, para evitar sesgos o errores significativos.

Tabla 2.2. Principales características de los escenarios de generación de residuos analizados.

Referencia	Estimación 1	Estimación 2
Corresponde a la cantidad de residuos generados en el municipio detallado en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) de acuerdo a las proyecciones realizadas en el Plan	Corresponde a la cantidad de residuos generados en cada municipio detallado en el PGIRS en relación al número de habitantes reportado por las entidades gubernamentales para el año 2018	Corresponde al valor reportado en el Informe Nacional de Disposición Final 2018

2.3.2.2. Recolección y transporte de RSU

En cuanto al programa de recolección y transporte de RSU, se comprobaron y evaluaron las micro rutas y la frecuencia de recolección, así como el tipo de transporte y la capacidad del sistema de recolección para cada uno de los seis municipios, siguiendo la información incluida en el PGIRS.

2.3.2.3. Barrido y limpieza de carreteras y zonas públicas

En el programa de barrido y limpieza de carreteras y áreas públicas, se identificaron y consultaron las micro rutas y la frecuencia. Del mismo modo, se determinó el kilometraje

barrido y el número de canastas públicas instaladas en el municipio, siguiendo la información incluida en el PGIRS.

2.3.2.4. Potencial de reciclaje de RSU

Para cada producto de residuos sólidos, se determinaron los tipos de residuos que es probable que se reutilicen y su cantidad respectiva (%). Asimismo, a partir de la información contenida en cada PGIRS, se identificaron las asociaciones de recicladores, el número de recicladores por municipio y las instalaciones de clasificación y uso.

2.3.2.5. Vertedero final de RSU

Finalmente, en el programa final de disposición de residuos sólidos, se identificó el relleno sanitario, el tipo de relleno sanitario y su titularidad (administración regional o municipal). Se determinó la distancia al vertedero desde el centroide del municipio y se representó geográficamente en el software ArcGIS 10.5.

2.4. Resultados

2.4.1. Producción de RSU

La producción per cápita para las zonas urbanas y rurales de cada municipio, según lo informado en el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos, se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Producción per cápita de RSU en zonas urbanas y rurales en municipios de interés.

Municipio	PPC Urbana (kg/día)	PPC Rural (kg/día)
Sibaté	0,650	0,460
Chiquinquirá	0,550	0,420
San Gil	0,790	0,270
Zarzal	0,730	0,860
Granada	0,710	0,450
Marinilla	0,470	0,290

Las tasas diarias de generación de residuos para el periodo 2018 a 2022 se estimaron aplicando la Ecuación 2.3.1.3 y considerando las proyecciones realizadas en los tres escenarios previamente definidos (Referencia, Estimación 1 y Estimación 2). Se obtuvieron los valores de los errores absolutos y relativos para cada uno de los municipios. Los resultados que muestran los errores porcentuales para cada año se muestran En la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Cantidades de generación de RSU para cada escenario y municipio definido.

Año	Municipio	Valor	Estimación	Error	Error	Estimación	Error	Error
		Referencia (kg/día)	1 (E1) (kg/día)	Absoluto E1	Relativo E1 (%)	2 (E2) (kg/día)	Absoluto E2	Relativo E2 (%)
2018	Sibaté	32366	26348	6018	18.590	18830	13536	41.820
	Chiquinquirá	32585	32652	67	0.210	33190	605	1.860
	San Gil	40269	47139	6870	17.060	46530	6261	15.550
	Zarzal	13609	30957	17348	127.480	84810	71201	523.200
	Granada	72186	51521	20665	28.630	29251	42935	59.480
	Marinilla	25640	51599	25959	101.240	27910	2270	8.850
2019	Sibaté	32771	26758	6013	18.350	19123	13648	41.650
	Chiquinquirá	32846	32785	60	0.180	33325	480	1.460
	San Gil	41527	48343	6816	16.410	47719	6192	14.910
	Zarzal	13818	31094	17276	125.030	85185	71367	516.490
	Granada	73041	52838	20203	27.660	29999	43042	58.930
	Marinilla	26570	53198	26628	100.220	28775	2205	8.300
2020	Sibaté	33180	27174	6006	18.100	19420	13760	41.470
	Chiquinquirá	33108	27174	5935	17.920	19420	13688	41.340
	San Gil	42824	49578	6754	15.770	48938	6114	14.280
	Zarzal	14030	31232	17202	122.610	85562	71532	509.850
	Granada	74337	54188	20149	27.100	30765	43572	58.610
	Marinilla	27510	54846	27336	99.370	29667	2157	7.840
2021	Sibaté	33594	27596	5998	17.850	19722	13872	41.290
	Chiquinquirá	33594	27596	5998	17.850	19722	13872	41.290
	San Gil	44162	50845	6683	15.130	50188	6026	13.640
	Zarzal	14245	31370	17125	120.220	85941	71696	503.320
	Granada	76095	55573	20522	26.970	31552	44543	58.540
	Marinilla	28470	56546	28076	98.620	30586	2116	7.430
2022	Sibaté	34015	28026	5989	17.610	20029	13986	41.120
	Chiquinquirá	33640	33188	452	1.340	33735	94	0.280
	San Gil	45541	52144	6603	14.500	51470	5929	13.020
	Zarzal	14463	31509	17046	117.860	86321	71859	496.850
	Granada	78349	56994	21355	27.260	32358	45991	58.700
	Marinilla	29460	58298	28838	97.890	31534	2074	7.040

Las proyecciones de generación de residuos sólidos para cada uno de los seis municipios en el período de estudio y para cada escenario se muestran en la figura 2.4.

De los datos disponibles se obtuvieron los valores porcentuales de la composición de los residuos sólidos generados en los municipios de Sibaté, Chiquinquirá, San Gil, Zarzal, Granada y Marinilla. El porcentaje máximo corresponde a los residuos orgánicos (54%),

seguidos por el plástico (13%), otros residuos que incluyen textiles, caucho y sintéticos (12%), vidrio (6%), papel (5%), cartón (4%), y en la misma proporción chatarra, residuos de madera y follaje (3%) (figura 2.5).

Los residuos sólidos orgánicos son los de mayor producción municipal. Sin embargo, no se someten a un proceso de recuperación mediante compostaje de forma sistemática y organizada bajo planificación previa. Este proceso solo se realiza para actividades de corte y poda.

En el caso específico de los municipios de Chiquinquirá y San Gil, solo se utilizan los residuos generados en el mercado agrícola sin distinción de técnica. Sin embargo, no hay registros del uso de residuos procedentes de dicho mercado. En los municipios de Granada, Zarzal y Marinilla, los residuos domésticos se depositan finalmente en un relleno sanitario

En el municipio de Sibaté, existe la recolección selectiva de residuos orgánicos domésticos que son entregados a un agente externo que se encarga de su procesamiento final. A nivel doméstico, la práctica del compostaje depende de las condiciones de cada hogar y del conocimiento sobre esta técnica. Sin embargo, no hay registros del número de personas que realizan esta actividad, volúmenes de compost producido, sectores en los que se utiliza el compostaje y/o si existe algún mecanismo de comercialización.

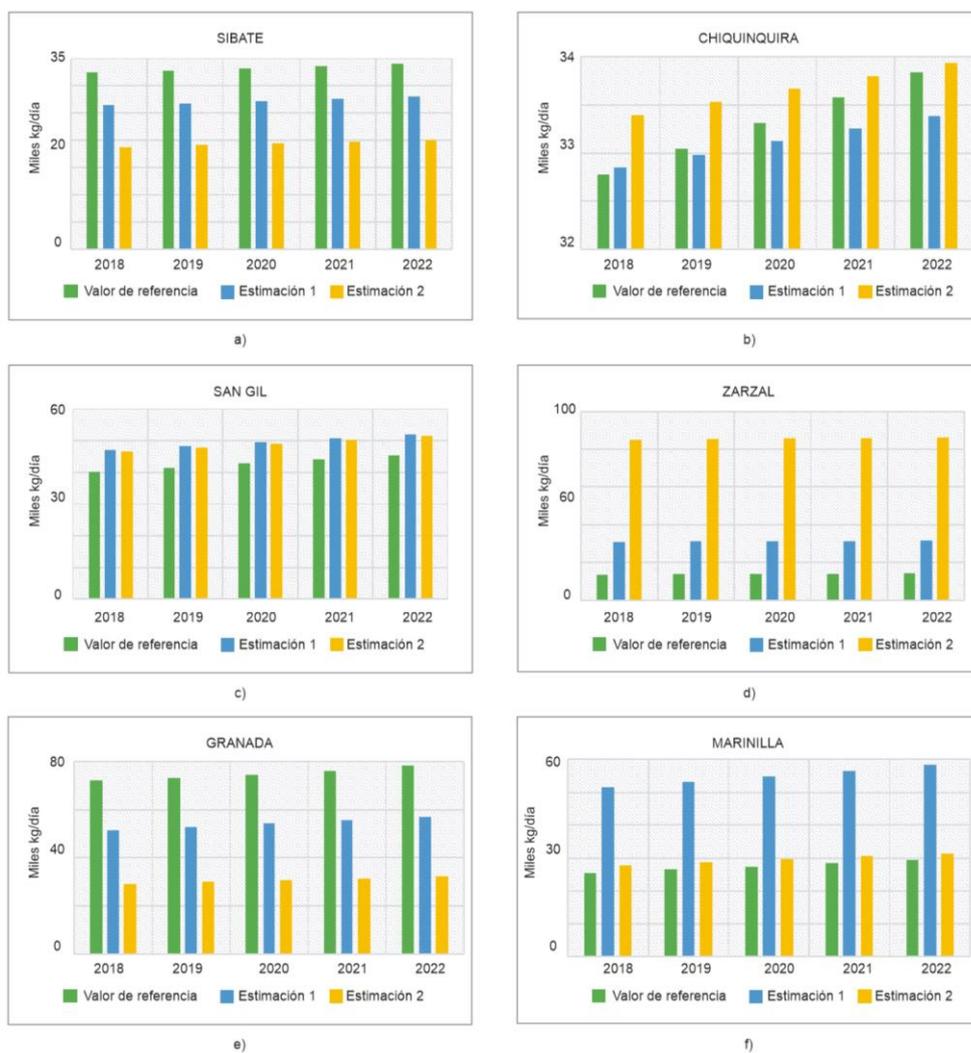


Figura 2.4. Estimación de la tasa de producción futura de RSU en los seis municipios (a) Sibaté; b) Chiquinquirá; c) San Gil; d) Zarzal; e) Granada; f) Marinilla.

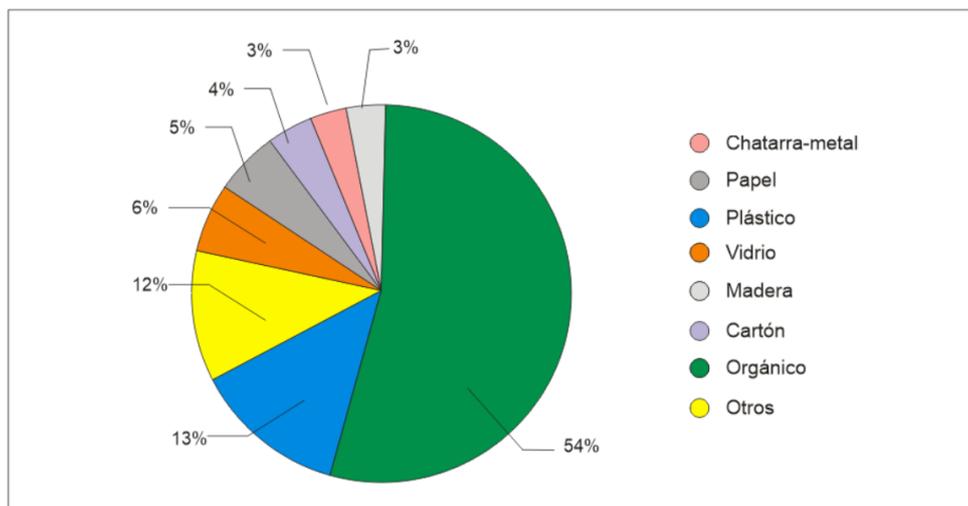


Figura 2.5. Composición porcentual de los RSU

2.4.2. Recolección y transporte de RSU

En cuanto al programa de recolección y transporte, se cuenta con vehículos tipo compactador, teniendo en cuenta que, en promedio, los municipios utilizan dos o tres vehículos con una capacidad entre 8 a 25 yd³. Asimismo, muestran un promedio de entre 7 a 10 rutas de micro recolección, cada una con una frecuencia de 2 a 3 veces por semana. Los principales componentes de las actividades de recogida y transporte se resumen en la tabla 2.5. La eficiencia en la prestación del servicio de limpieza pública para cada municipio se muestra en la tabla 2.6. Para las áreas urbanas dentro de cada municipio la eficiencia del servicio es del 100%. Para las zonas rurales de los municipios de Sibaté, Zarzal Granada y Marinilla la eficiencia es superior al 80%. Los municipios de Chiquinquirá y San Gil no prestan este servicio.

Tabla 2.5. Principales Componentes de recolección y transporte en los municipios seleccionados

Municipio	Tipo de vehículo	Número de vehículos	Volumen (yd ³)	Número de microrutas	Frecuencia (veces/semana)
		1	25		
Sibaté	Compactador	1	16	10	2
		1	17		
Chiquinquirá	Compactador	2	16	8	3
		1	8		
San Gil	Compactador	2	16	7	3
		1	8		
Zarzal	Compactador	2	25	7	3
Granada	Compactador	1	26	7	2
		1	16		
Marinilla	Compactador	3	17	10	2 o 3

Tabla 2.6. Eficiencia de la cobertura de recolección de RSU para cada municipio evaluado

Municipio	Eficiencia urbana (%)	Eficiencia rural (%)
Sibaté	100	98
Chiquinquirá	100	0
San Gil	100	0
Zarzal	100	85
Granada	100	100
Marinilla	100	91.170

2.4.3. Barrido y limpieza de carreteras y áreas públicas

En cuanto al programa de barrido y limpieza de carreteras y áreas públicas, se estableció en cada municipio el kilometraje barrido distribuido en las micro rutas con su respectiva frecuencia. Además, se obtuvo el número de contenedores de almacenamiento instaladas en diferentes puntos del municipio, tal y como se muestra en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Barrido y limpieza de carreteras y áreas públicas municipales

Municipio	Distancia de barrido (km)	Microrutas	Frecuencia (veces/semana)	Número de cajas de almacenamiento
Sibaté	64,530	21	6	144
Chiquinquirá	49,320	4	6	12
San Gil	66,740	16	3	30
Zarzal	62	20	6	15
Granada	301,30	22	3	74
Marinilla	149	10	6	100

2.4.4. Potencial de reciclaje de RSU

Los residuos potencialmente reciclables que se generan en los municipios del área de estudio incluyen plástico, papel, vidrio, cartón y chatarra en las proporciones que se muestran en la figura 2.6.

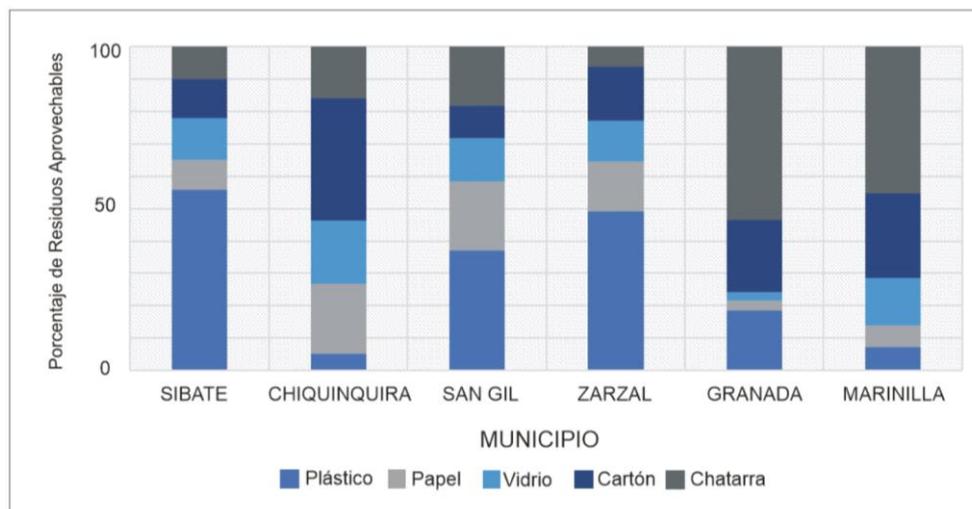


Figura 2.6. Distribución en fracciones del potencial de reciclaje de RSU en cada municipio

En contraste, la composición presentada en las figuras 2.5 y 2.6 da cuenta de la significancia que tienen los residuos orgánicos en los seis municipios que alcanza en suma un 54% (figura 2.5), opacando parcialmente la representatividad de materiales reciclables tales como la chatarra y otras formas ferrosas que son más visibles en la figura 2.6. En proporción, el 31% de los residuos aprovechables no orgánicos (restando también el 12%

de residuos misceláneos y el 3% de residuos de madera y similares), expone un panorama interesante como el expuesto en la figura 2.6; que es objeto de atención para propuestas de manejo o modelos de gestión circular para reciclables.

La actividad de reciclaje es llevada a cabo por recicladores, que pueden trabajar de forma independiente o pertenecen a diferentes asociaciones que trabajan de forma coordinada. Según la evaluación realizada, en tres de los seis municipios hay asociaciones y en los tres restantes hay recicladores independientes. Cada uno de los municipios cuenta con más de un centro de acopio donde se clasifica el RSU. Las principales características del sistema de reciclaje se resumen en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Características del sistema de reciclaje en los municipios de quinta categoría

Municipio	Tipo de reciclador	Número de recicladores	Nombre	Centros de recogida
Sibaté	Asociación	55	ASOCRO, ARSI y ACRUB	4
Chiquinquirá	Asociación	47	Asociación de Recicladores de Chiquinquirá	9
San Gil	Independiente	71		4
Zarzal	Independiente	6		5
Granada	Independiente	40		13
Marinilla	Asociación e independiente	83	CORPOGESTAR ORIENTE	5

En la figura 2.6, se muestra el material potencialmente utilizable. Se ha podido identificar la existencia en cada municipio de un centro de acopio apoyado por los recuperadores que realizan la actividad. Sin embargo, solo los municipios de San Gil, Marinilla y Chiquinquirá reportan el porcentaje real de uso, que es del 10,52%, 25,25% y 10,20%, respectivamente. El resto de los municipios no reportan ningún valor de reutilización, ya sea porque no se cuantifican los resultados del reciclaje o porque los residuos no se entregan a gestores externos, que podría proporcionar la información de una manera precisa (PGIRS, 2020; Alcaldía Municipal de Zarzal, 2015; Alcaldía Municipal de San Gil, 2015; Alcaldía Municipal de Marinilla, 2016; Alcaldía Municipal de Granada, 2016; Alcaldía Municipal de Sibaté, 2019).

En estos municipios, los recicladores obtienen un beneficio de la venta de los materiales seleccionados y su posterior uso. Desafortunadamente, las técnicas de clasificación y reciclaje aún no se implementan completamente, especialmente los municipios más pequeños. La separación de residuos no está suficientemente arraigada en la sociedad rural. En este sentido, impulsar alternativas basadas en técnicas de economía circular como las propuestas permiten optimizar la gestión de los residuos municipales y maximizar la valorización de los residuos aprovechables. Estas técnicas también refuerzan el papel de

las asociaciones locales de recicladores y materializan beneficios a nivel social y ambiental (Martínez, 2016).

2.4.5. Vertederos finales

La disposición final de los RSU en cada uno de los municipios seleccionados se lleva a cabo en vertederos sanitarios. Cuatro de ellos son gestionados por las autoridades regionales, mientras que en dos municipios su vertedero es gestionado directamente por las autoridades locales.

La tabla 2.9 muestra la distancia desde el centro del municipio hasta el relleno sanitario correspondiente

Tabla 2.9. Información general, vertederos de referencia.

Municipio	Vertedero controlado	Autoridad responsable	Distancia (km)
Sibaté	Nuevo Mondoñedo	Regional	27
Chiquinquirá	Carapacho	Municipal	20
San Gil	El Cucharó (Aucuasan)	Regional	9
Zarzal	Presidente	Regional	60
Granada	La Guatara	Regional	2
Marinilla	Los Saltos	Municipal	18

La figura 2.7 muestra la ubicación del vertedero dentro del área del municipio correspondiente, mostrando sus respectivas áreas urbanas y rurales.

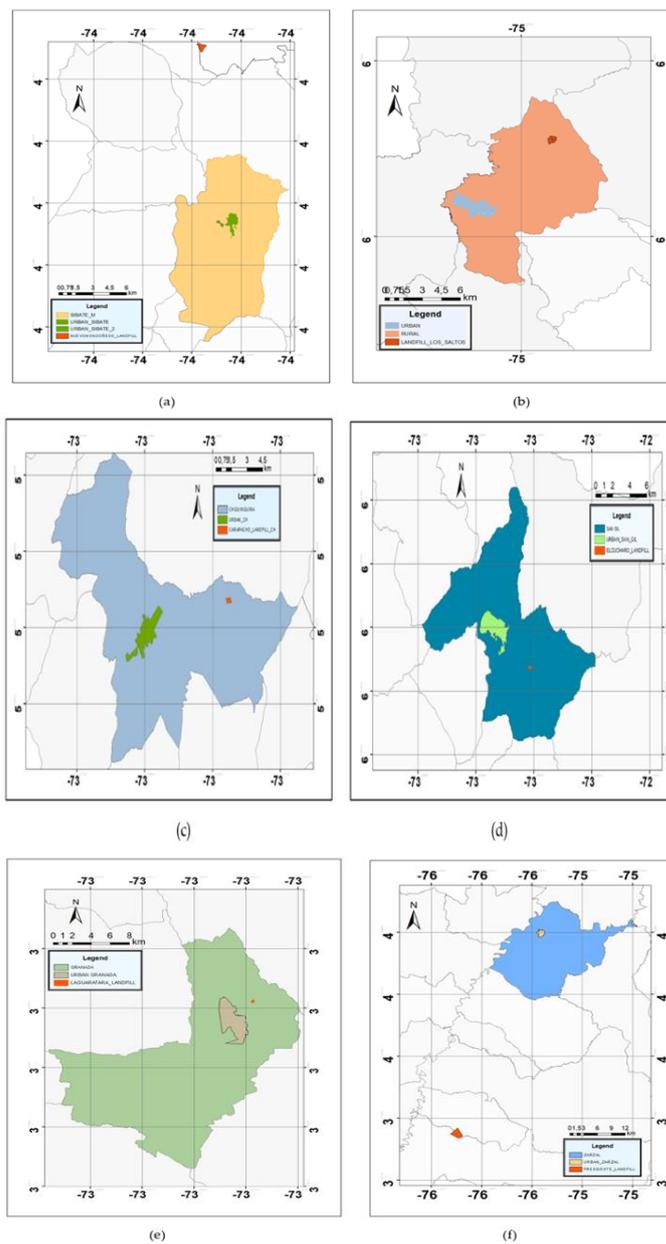


Figura 2.7. Ubicación geográfica de los sitios de disposición final dentro del área del municipio. a) Municipalidad de Sibaté y relleno sanitario de Nuevo Mondoñedo; b) Municipalidad de Marinilla y relleno sanitario de Los Saltos; c) Municipalidad de Chiquinquirá y relleno sanitario de Carapacho; d) Municipalidad de San Gil y relleno sanitario de El Cucharó (Acuasan); e) Municipio de Granada y relleno sanitario de La Guaratara; f) Municipalidad de Zarzal y relleno sanitario de presidente.

2.5. Discusión

En esta investigación, los programas de (i) generación de residuos sólidos urbanos, (ii) recolección y transporte, (iii) barrido y limpieza de caminos y áreas públicas, (iv) uso e inclusión de recicladores, y (v) disposición final en seis municipios de quinta categoría en Colombia se ha realizado utilizando una metodología comparativa. Los resultados se han obtenido mediante el análisis de datos obtenidos de fuentes oficiales y el uso de herramientas de información geográfica. Los factores analizados incluidos en el análisis son la estimación de la producción de residuos, la cantidad de residuos potencialmente utilizables, la tipología de los recicladores, las microrutas y frecuencia de recogida y barrido, el tipo de vehículos para llevar a cabo las actividades de recogida, el número de cestas instaladas en el municipio y el lugar de disposición final y su distancia al centroide de cada municipio.

De acuerdo con lo mostrado en la tabla 2.4, los municipios que presentaron un mayor error en la Estimación 1 respecto al Valor de Referencia fueron Zarzal y Marinilla. En el caso de Zarzal, el número de habitantes es mayor según el PGIRS que la población proyectada por el método geométrico basado en el censo del año 2018. En cuanto a la diferencia en Marinilla, la población aumentó más de lo que habían proyectado. Esa puede ser la razón por la cual la diferencia en la generación de residuos sólidos en el caso particular de estos municipios es cercana al 100%.

Para la Estimación 2, los municipios con mayores diferencias fueron Zarzal y Granada. En el caso de Zarzal, es evidente que la generación de residuos reportada por la Superintendencia de Servicios Públicos en su informe anual de disposición final es mayor a la considerada en el PGIRS, mientras que, en el caso de Granada, la generación de residuos es menor según el informe de la Superintendencia que lo que considera la PGIRS.

En el caso del programa de recolección y transporte, los municipios cuentan con rutas de micro recolección con una frecuencia de 2 a 3 veces por semana. Son capaces de recoger todos los residuos que se generan a la vez que tienen un mejor control de los recursos económicos que se demandan para recoger los residuos. En promedio, cada municipio cuenta con 2 o 3 vehículos compactadores con capacidad suficiente para llevar a cabo la recogida. Este tipo de vehículos permite una mayor capacidad de carga y un mejor control de los lixiviados y olores ofensivos generados por los residuos sólidos (Martínez y Piña, 2016).

En cuanto al programa de barrido y limpieza de carreteras y áreas públicas, cada municipio tiene sus respectivas micro rutas y su frecuencia. A pesar de que cada municipio ha instalado cajas de almacenamiento se puede observar que hay algunos municipios que tienen solo de 12 a 15 de ellos, mientras que otros tienen más de 100. Esta diferencia se genera por las decisiones administrativas que se toman en cada municipio. Por ello, este programa se enfoca en acciones encaminadas a dejar zonas y vías públicas libres de residuos sólidos que se encuentren dispersos o acumulados que puedan generar bloqueos en el sistema de alcantarillado o que genere vectores (Ochoa, 2018).

En el programa de uso e inclusión de recicladores, tal cual se muestra en la tabla 2.4, las municipalidades cuentan con centros de acopio donde se clasifican los potenciales residuos sólidos no orgánicos. Tres de los municipios no realizan la tarea de clasificación mientras que los otros tres municipios clasifican los residuos antes de entregarlos a terceros. Todas las municipalidades tienen recicladores, ya sea que pertenezcan a un sindicato o trabajen de forma independiente. Como se muestra en los porcentajes dados en la figura 2.5, el residuo más generado es el plástico, seguido de la chatarra y finalmente el cartón. El municipio de Marinilla es el que reutiliza los residuos a un ritmo mayor (25,25%) debido a su mayor número de recicladores. Los municipios de San Gil (10,52%) y Chiquinquirá (10,20%) también reutilizan residuos. Los tres municipios restantes no proporcionan información sobre la cantidad de residuos reutilizados.

Finalmente, en cuanto al programa de disposición final de los seis municipios, se ha visto que utilizan rellenos sanitarios que proporcionan un destino final a los residuos sólidos. Según la tabla 2.9 y la figura 2.6, el municipio que está más alejado de su relleno sanitario es Zarzal y el municipio que tiene el relleno sanitario más cerca de su centroide es Granada. La ubicación de un relleno sanitario depende de las áreas potenciales que la entidad municipal determine en su plan de manejo y debe ser licenciada a través del proceso medioambiental. Esa es la razón por la que los vertederos municipales dependen de criterios administrativos y técnicos y su distancia del centroide dependerá directamente de estos factores (Campani et al., 2018).

En las zonas rurales más alejadas de los centros poblados o en las ciudades con mayor actividad económica, es común que los residuos sólidos se quemen a la intemperie o se entierren sin ninguna otra medida técnica adicional. A veces, estas prácticas son la respuesta a la ineficiencia de los servicios de recogida de residuos (Ramírez, 2015). De hecho, esto no hace ninguna diferencia con los rellenos sanitarios en otras regiones de Colombia que muestran defectos importantes en su operación que causaron situaciones de emergencia y catástrofes en el período comprendido entre 1977 y 2005 (Hettiarachchi, 2018).

2.6. Conclusiones

Por primera vez en la literatura científica, este trabajo presenta un análisis de la implementación de técnicas de economía circular bajo criterios de sostenibilidad ambiental en seis municipios con economía deprimida en Colombia. El análisis se basa en los datos de producción de residuos a escala local, la recuperación de residuos para su posterior reciclaje y la identificación y cuantificación de las variables asociadas al tratamiento y disposición final de residuos de acuerdo con el marco regulatorio colombiano.

Asimismo, este trabajo proporciona un análisis completo de la gestión integral de los residuos sólidos en las zonas rurales colombianas, siendo uno de los primeros estudios en comparar diferentes municipios del país en relación con la provisión de residuos públicos. Se ha evaluado cada uno de los componentes del servicio de recolección de

residuos, detallando las diferencias entre municipios que deberían tener similitudes debido a su igual categorización económica. Las diferencias administrativas que se identifican en los programas se asocian principalmente al tamaño e ingresos de los municipios y a la voluntad político-administrativa de ejecutar estos planes tal y como se han detallado para proporcionar la limpieza pública.

Las proyecciones de población y residuos sólidos permiten tomar decisiones a largo plazo a través del análisis de datos, por lo que en los municipios se puede cubrir de manera completa y eficiente el servicio público de saneamiento, así como establecer estrategias de reducción y uso de estrategias orientadas bajo un paradigma de economía circular. Sin embargo, los planes locales de gestión de residuos se preparan para períodos de 8 a 10 años, por lo que la información considerada dentro de ellos no siempre se ajusta a la dinámica actual de la población.

Según lo establecido en la legislación colombiana (Resolución 0754 de 2014), una vez implementado el plan local de manejo de residuos, es responsabilidad de la administración local del municipio controlar, actualizar, optimizar y mejorar las acciones específicas incluidas en el plan para hacer la provisión del servicio de gestión de residuos más eficiente. El análisis realizado en este trabajo proporciona una estimación de las cantidades de potenciales subproductos de reciclaje, que son necesarias para el diseño de estrategias por parte de las administraciones y las empresas que prestan el servicio.

Se han identificado problemas en la gestión de los residuos en los municipios analizados. Solo los municipios de San Gil y Marinilla reportan algún porcentaje de reutilización (10,52% y 25,25% respectivamente). Sin embargo, el resto de los municipios no reportan ningún valor, ya sea porque no llevan un registro del material que se reutiliza o porque es sólo almacenado en los centros de acopio. Se ha demostrado que cada municipio integra sus programas de acuerdo con su capacidad administrativa y técnica. La gestión de los residuos sólidos se realiza a través de su recolección, transposición y disposición final, así como la generación de alternativas para la clasificación y uso de residuos (como plástico, cartón, vidrio, papel y chatarra), con el apoyo de recicladores o asociaciones comerciales.

Del mismo modo, se evidencia la implementación de estrategias de barrido y corte para el mantenimiento de carreteras y áreas públicas. Estas estrategias permiten a los municipios mantener una baja cantidad de residuos dispersos que pueden ser fuente de vectores y generar la devaluación del inmueble por su acumulación.

Finalmente, los problemas analizados en municipios rurales con bajo poder adquisitivo en Colombia resaltan la importancia de tener acceso a metodologías de información que permitan la posterior sistematización de los datos. Este es un aspecto clave para la implementación y establecimiento de técnicas óptimas de gestión de residuos basadas en criterios de economía circular, a pesar de los contextos económicos de las regiones. Desafortunadamente, los problemas en la gestión, promoción y control de datos en los municipios colombianos con economía deprimida son muy evidentes. Estos municipios aún necesitan la implementación de mecanismos efectivos para promover cambios

importantes en los sistemas de gestión de residuos debido a deficiencias socioculturales y administrativas a pesar de que comparten el marco regulatorio con ciudades más grandes del país que están en línea con las necesidades del sistema de gestión (MVCT, 2012). La implementación de modelos de economía circular en pequeños municipios colombianos para el uso de residuos como plástico, cartón, papel, chatarra y vidrio brinda mayores oportunidades a nivel social, económico y ambiental. Los resultados obtenidos tras el análisis realizado muestran la existencia de un buen escenario para el desarrollo de estos modelos basados en técnicas de economía circular. Estos incluyen la participación de asociaciones locales de recicladores para que la gestión de residuos mejore significativamente.

Actualmente se encuentra en proceso la implantación de una herramienta ofimática en municipios como los presentados en este trabajo, que permitirá la simulación de variables consideradas en un modelo de economía circular. La herramienta en desarrollo es una matriz de tipo macro desarrollada en la plataforma Microsoft Excel® acompañada de un panel programado en Visual Basic®. Estas herramientas han sido seleccionadas teniendo en cuenta la capacidad económica y técnica de los municipios en estudio. Los resultados preliminares de viabilidad para la implementación de un modelo circular para residuos utilizables se lograron durante el segundo semestre de 2021. Como resultado de esta investigación, se espera presentar a un gobierno local, en un plazo no mayor a 8 meses a partir de ahora, una propuesta piloto para la implementación gradual del modelo, apoyada por comunidades académicas y otras organizaciones relacionadas con el proceso, considerando también que ya existe un municipio preseleccionado ubicado en el centro del país.

2.7. Referencias

- Alcaldía Municipal de Granada. Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos; Empresas de Servicios Públicos de Granda EDESA SA ESP: Granada, Colombia, 2016.
- Alcaldía Municipal de Marinilla. Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos; Empresa de Servicios Públicos de San José de La Marinilla ESPA ESP: Marinilla, Colombia, 2016.
- Alcaldía Municipal de San Gil. Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos; Un. AMMSG—ACUASAN: San Gil, Colombia, 2015.
- Alcaldía Municipal de Sibaté. Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos; Empresas Públicas Municipales de Sibaté S.C.A. ESP: Sibaté, Colombia, 2019.
- Alcaldía Municipal de Zarzal. Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos; Unidad de Asistencia Técnica Agropecuaria—UMATA: Zarzal, Colombia, 2015.
- Anwar, S.; Elagroudy, S.; Razik, M.A.; Gaber, A.; Bong, C.P.C.; Ho, W.S. Optimization of solid waste management in rural villages of developing countries. *Clean Technol. Environ. Policy* 2018, 20, 489–502.

- Aparcana, S. Approaches to formalization of the informal waste sector into municipal solid waste management systems in low and middle-income countries: Review of barriers and success factors. *Waste Manag.* 2017, págs. 61, 593–607.
- Arena U; Di Gregorio, F. A waste management planning based on substance flow analysis. *Resour. Conserv. Recycl.* 2014, 85, 54–66.
- Borowski, P. Environmental pollution as a threats to the ecology and development in Guinea Conakry. *J. Innov. Entrep.* 2021, págs. 10, 1–17.
- Borowski, P.F. Innovation strategy on the example of companies using bamboo. *J. Innov. Entrep.* 2021, págs. 10, 1–17.
- Botello-Álvarez, J.E.; Rivas-García, P.; Fausto-Castro, L.; Estrada-Baltazar, A.; Gómez-González, R. Informal collection, recycling and export of valuable waste as transcendent factor in the municipal solid waste management: A Latin-American reality. *J. Clean. Prod.* 2018, págs. 182, 485–495.
- Calderón Márquez, A.J.; Rutkowski, E.W. Waste management drivers towards a circular economy in the global south—The Colombian case. *Waste Manag.* 2020, págs. 110, 53–65.
- Campani, D.; La Torre, F.; Sarafian, D.; Tello, P. Barrido, recolección, Transporte y Transferencia de Residuos Sólidos Urbanos. En *Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos; Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS: São Paulo, Brasil*, 2018; Pp. 60–65.
- Cervantes, D.E.T.; López Martínez, A.; Cuartas Hernández, M.; de Cortázar, A.L.G. Using indicators as a tool to evaluate municipal solid waste management: A critical review. *Waste Manag.* 2018, 80, 51–63.
- Cobo, S.; Domínguez-Ramos, A.; Irabien, A. From linear to circular integrated waste management systems: A review of methodological approaches. *Resour. Conserv. Recycl.* 2018, págs. 135, 279–295.
- Colorado-Lopera, H.A.; Echeverri-Lopera, G.I. The solid waste in Colombia analyzed via gross domestic product: Towards a sustainable economy. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioq.* 2020, págs. 96, 51–63.
- Congreso de Colombia. Ley 142 de 1994
- Congreso de Colombia. Ley 617 de 2000
- Costa, I.; Dias, M.F. Evolution on the solid urban waste management in Brazil: A portrait of the Northeast Region. *Energy Rep.* 2020, págs. 6, 878–884.
- De Sousa Pereira, T.; Fernandino, G. Evaluation of solid waste management sustainability of a coastal municipality from northeastern Brazil. *Ocean Coast. Manag.* 2019, 179, 104839.

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Censo General. 2005.
- Departamento Nacional de Planeación, Consejo Nacional de Política Económica y Social. CONPES 3874: Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos; Consejo Nacional de Política Económica y Social: Bogotá, Colombia, 2016.
- Departamento Nacional de Planeación. Sistema de Estadística Territoriales TerriData.
- Domínguez, F.; Nieves, A. Errores. In *Métodos Numéricos Aplicados a la Ingeniería; Grupo Editorial Patria: Mexico City, Mexico, 2011; Pp. 13–22.*
- Duque, N. Importancia de la Categorización Territorial Para la Descentralización y las Relaciones Intergubernamentales en Colombia. *Derecho del Estado* No 38. 2017, pp. 67-95.
- Elgie, A.R.; Singh, S.J.; Telesford, J.N. You can't manage what you can't measure: The potential for circularity in Grenada's waste management system. *Resour. Conserv. Recycl.* 2021, 164, 105170.
- Ezeah, C.; Fazakerley, J.A.; Roberts, C.L. Emerging trends in informal sector recycling in developing and transition countries. *Waste Manag.* 2013, 33, 2509–2519.
- Ferronato, N.; Rada, E.C.; Gorrity Portillo, M.A.; Cioca, L.I.; Ragazzi, M.; Torretta, V. V. Introduction of the circular economy within developing regions: A comparative analysis of advantages and opportunities for waste valorization. *J. Environ. Manag.* 2019, 230, 366–378.
- Gélvez, M. Propuesta Para el Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos en el Municipio de Puerto Escondido, Córdoba, Colombia; Universidad Militar Nueva Granada: Bogotá, Colombia, 2017.
- Guerrero, Los Ángeles; Maas, G.; Hogland, W. Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Manag.* 2013, 33, 220–232.
- Gutberlet, J. Cooperative urban mining in Brazil: Collective practices in selective household waste collection and recycling. *Waste Manag.* 2015, págs. 45, 22–31.
- Hernández-Berriel, M.; Aguilar-Virgen, Q.; Taboada-González, P.; Lima-Morra, R.; Eljaiek-Urzola, M.; Márquez-Benavides, L.; Buenrostro-Delgado, O. Generación y Composición de los Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 2016, págs. 32, 11–22.
- Hettiarachchi, H.; Ryu, S.; Caucci, S.; Silva, R. Municipal Solid Waste Management in Latin America and the Caribbean: Issues and Potential Solutions from the Governance Perspective. *Recycling* 2018, 3, 19.
- Idowu, I.A.; Atherton, W.; Hashim, K.; Kot, P.; Alkhaddar, R.; Alo, B.I.; Shaw, A. An analyses of the status of landfill classification systems in developing countries: Sub Saharan Africa landfill experiences. *Waste Manag.* 2019, págs. 87, 761–771.

- Kaza, S.; Yao, L.; Bhada, P.; Van Woerden, F. A Global Picture of Solid Waste Management. In *What a Waste 2.0 A global Snapshot of Solid Waste Management to 2050; Urban Development Series; The World Bank: Washington, DC, USA*, 2018; Pp. 17–37.
- Khandelwal, H.; Dhar, H.; Thalla, A.K.; Kumar, S. Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: A worldwide critical review. *J. Clean. Prod.* 2019, 209, 630–654.
- Kuehr, R. Towards a sustainable society: United Nations University's Zero Emissions Approach. *J. Clean. Prod.* 2007, 15, 1198–1204.
- Laurent, A.; Bakas, I.; Clavreul, J.; Bernstad, A.; Niero, M.; Gentil, E.; Hauschild, M.Z.; Christensen, T.H. Review of LCA studies of solid waste management systems—Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste Manag.* 2014, págs. 34, 573–588.
- Manfredi, S.; Christensen, T.H. Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling. *Waste Manag.* 2009, págs. 29, 32–43.
- Margallo, M.; Ziegler-Rodríguez, K.; Vázquez-Rowe, I.; Aldaco, R.; Irabien, Á.; Kahhat, R. Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective: A review for policy support. *Sci. Total, Environ.* 2019, 689, 1255–1275.
- Martínez, C.I.P.; Piña, W.A. Solid waste management in Bogotá: The role of recycling associations as investigated through SWOT analysis. *Environ. Dev. Sustain.* 2016, 19, 1067–1086.
- Martínez, J. Outlook of Municipal Solid Waste in Bogota (Colombia). *Am. J. Eng. Appl. Sci.* 2016, pág. 9.
- Medina, M. Scavenger cooperatives in Asia and Latin America. *Resour. Conserv. Recycl.* 2000, PÁGS. 31, 51–69.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. Estrategia Nacional Economía Circular: Cierre de Ciclos de Materiales, Innovación, Tecnológica, Colaboración y Nuevos Modelos de Negocio, Transformación Productiva y Cierre de Ciclos de Materiales; Gobierno de Colombia: Bogotá, Colombia, 2019.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico: Título B. Sistemas de acueducto. Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico, 2ª ed.; Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados—CIACUA, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes: Bogotá, Colombia, 2010.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico: Título F. Sistemas de Aseo Urbano, 2ª ed.; Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico: Bogotá, Colombia, 2012.

- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Resolución 754 de 2014.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos.
- Molano Camargo, F. El relleno sanitario Doña Juana en Bogotá: La producción política de un paisaje tóxico, 1988–2019. *Hist. Crítica* 2019, 74, 127–149.
- Ochoa, M. Barrido, recolección, Conceptualización y análisis de la gestión integral de residuos en Colombia. En *Gestión Integral de Residuos. Análisis Normativo y Herramientas Para su Implementación*; Universidad del Rosario: Bogotá, Colombia, 2018.
- Padilla, A.J.; Trujillo, J.C. Waste disposal and households' heterogeneity. Identifying factors shaping attitudes towards source-separated recycling in Bogotá, Colombia. *Waste Manag.* 2018, págs. 74, 16–33.
- Patwa, A.; Parde, D.; Dohare, D.; Vijay, R.; Kumar, R. Solid waste characterization and treatment technologies in rural areas: An Indian and international review. *Environ. Technol. Innov.* 2020, 20, 101066.
- Ramírez, O. Identificación de problemáticas ambientales en Colombia a partir de la percepción social de estudiantes universitarios localizados en diferentes zonas del país. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 2015, págs. 31, 293–310.
- Solano Meza, J.K.; Orjuela Yepes, D.; Rodrigo-Illari, J.; Cassiraga, E. Predictive analysis of urban waste generation for the city of Bogotá, Colombia, through the implementation of decision trees-based machine learning, support vector machines and artificial neural networks. *Heliyon* 2019, 5, e02810.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Disposición Final de Residual Sólidos Informe Nacional—2018, 11ª ed.; Superservicios: Bogotá, Colombia, 2019.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Informe Sectorial de la Actividad de Aprovechamiento 2018, 11ª ed.; Superservicios: Bogotá, Colombia, 2019.
- Vaccari, M.; Torretta, V.; Collivignarelli, C. Effect of Improving Environmental Sustainability in Developing Countries by Upgrading Solid Waste Management Techniques: A Case Study. *Sustainability.* 2012, 4, 2852–2861.
- Vaccari, M.; Tudor, T.; Vinti, G. Characteristics of leachate from landfills and dumpsites in Asia, Africa and Latin America: An overview. *Waste Manag.* 2019, págs. 95, 416–431.
- Valenzuela-Levi, N. Waste Political Settlements in Colombia and Chile: Power, Inequality and Informality in Recycling. *Dev. Chang Dev. Chang.* 2020, 51, 1098–1122.

- Velis, C. Waste pickers in Global South: Informal recycling sector in a circular economy era. *Waste Manag. Res.* 2017, págs. 35, 329–331.
- Wagner, T.; Arnold, P. A new model for solid waste management: An analysis of the Nova Scotia MSW strategy. *J. Clean. Prod.* 2008, págs. 16, 410–421.
- Wang, F.; Cheng, Z.; Reisner, A.; Liu, Y. Compliance with household solid waste management in rural villages in developing countries. *J. Clean. Prod.* 2018, 202, 293–298.
- Wilson, D.C.; Rodic, L.; Scheinberg, A.; Velis, C.A.; Alabastro, G. Comparative analysis of solid waste management in 20 cities. *Waste Manag. Res.* 2012, págs. 30, 237–254.
- Wilson, D.C.; Velis, C.; Cheeseman, C. Role of informal sector recycling in waste management in developing countries. *Habitat Int.* 2006, págs. 30, 797–808.
- Yıldız-Geyhan, E.; Yılan, G.; Altun-Çiftçiog˘lu, G.A.; Nes et-Kadırgan, M.A. Environmental and social life cycle sustainability assessment of different packaging waste collection systems. *Resour. Conserv. Recycl.* 2019, págs. 143, 119–132.
- Z' elazi n'ski, T. Properties of Biocomposites from Rapeseed Meal, Fruit Pomace and Microcrystalline Cellulose Made by Press Pressing: Mechanical and Physicochemical Characteristics. *Materiales* 2021, 14, 890.
- Zhang, D.Q.; Tan, S.K.; Gersberg, R.M. Municipal solid waste management in China: Status, problems and challenges. *J. Environ. Manag.* 2010, 91, 1623–1633.
- Zurbrügg, C.; Caniato, M.; Vaccari, M. How Assessment Methods Can Support Solid Waste Management in Developing Countries—A Critical Review. *Sustainability* 2014, 6, 545–570.

3. M-GRCT: un modelo dinámico de economía circular para el óptimo diseño de sistemas de gestión de residuos en municipios de economía deprimida

Vargas-Terranova, C.-A.; Rodrigo-Illarri, J.; Rodrigo-Clavero, M.-E.; Rozo-Arango, M.-A. M-GRCT: A Dynamic Circular Economy Model for the Optimal Design of Waste Management Systems in Low-Income Municipalities. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022**, *19*, 2681. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052681>.

Resumen

A continuación, se presenta M-GRCT, un modelo de economía circular de apoyo en la toma de decisiones para el diseño de sistemas de gestión de residuos reciclables en municipios de economía deprimida. El modelo permite realizar cálculos sobre un conjunto de dos escenarios integrando una evaluación de dinámicas socioculturales, que son un rasgo característico de este tipo de municipios. El modelo también integra el análisis de las variables restantes generalmente abordadas en los esquemas de gestión de residuos sólidos, al tiempo que considera temas como la reducción de la huella de carbono debido a actividades como el transporte de materiales reciclables, la generación de lixiviados, la generación de gases de efecto invernadero y la promoción de un incremento del número de recicladores asociados y rutas selectivas. La evaluación económica de los diferentes escenarios de implementación es compatible con una herramienta dinámica llamada DATA4 (una matriz tipo macro acompañada de dos paneles de control programados en Visual Basic y paneles de Power BI®). M-GRCT constituye una herramienta para la promoción de buenas prácticas ambientales y la identificación de estrategias para la promoción de mecanismos de desarrollo local. Los resultados proporcionados por el modelo

contrastan los obtenidos con los enfoques tradicionales de economía lineal. El modelo se utilizó para simular el sistema de gestión de residuos sólidos urbanos del municipio de Guateque (Colombia). Los resultados muestran la importancia de integrar los costos económicos y ambientales para asignar de manera óptima los recursos gubernamentales y privados cuando se espera que la tasa de reciclaje aumente en los próximos 10 años.

Siglas

UE: Unión Europea.

PIB: Producto interno bruto.

GEI: Gases de efecto invernadero.

PPC: Producción per cápita.

PGIRS: Plan(es) Gestión Integral de Residuos Sólidos.

M-GRCT: Modelo conceptual y numérico para la gestión de residuos sólidos aprovechables bajo un enfoque de economía circular.

DATA4: Interfaz ofimática soporte del modelo M-GRCT.

GHG: Greenhouse gases/Gases de efecto invernadero.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change/Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Colombia.

EPA: Environmental Protection Agency/Agencia de protección ambiental, USA.

LANDGEM: Landfill gas emissions model/Modelo de emisiones de gases de vertedero.

SUI: Sistema único de información-Superintendencia de servicios públicos, Colombia.

VPN: Valor presente neto.

TIR: Tasa interna de retorno.

TIO: Tasa interna de oportunidad.

3.1. Introducción y Objetivos

La creciente demanda de recursos naturales, causada por el crecimiento de la población, induce una tendencia creciente hacia la promoción de un uso eficiente de los recursos disponibles (Hina et al., 2022; Velenturf, y Purnell, 2017). Esto hace que muchos critiquen la economía lineal, ya que sólo busca el crecimiento económico sin tener en cuenta los impactos sociales y ambientales (Machado y Morioka, 2021; Geissdoerfer, 2018; Millar, 2019). La economía circular surge como una alternativa a la actual economía lineal (Comisión Europea, 2014; Korhonen et al., 2018; Snellix, 2021), con el objetivo de alargar la vida útil de los productos y de los componentes y materiales en circulación, sin pérdida de valor, minimizando el rechazo de residuos (Parque Nacional Bocken, 2017; Sariarli, 2017).

La importancia de implementar una estrategia de economía circular también se destaca por haber sido declarada una de las soluciones clave para ayudar a cumplir los objetivos

del Acuerdo de París (PACE, 2021). También se considera una estrategia clave para alcanzar los objetivos climáticos de la UE (Comisión Europea, 2021) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Vanhuvse et al., 2021; Schroeder et al., 2018). Incluso podría ayudar a aumentar el PIB, mejorar las oportunidades de empleo y reducir las emisiones de GEI (Aguilar et al., 2021).

Sin embargo, también existen limitaciones en la aplicación de modelos de economía circular (Ashby et al., 2019). Actualmente, la economía circular presenta una visión tecnológica y económicamente rentable de crecimiento continuo en un mundo con escasos recursos (Hobson y Lynch, 2016), sin considerar las implicaciones sociales y políticas (Winans et al., 2017) y sin analizar exhaustivamente las condiciones sociales e institucionales necesarias (Hobson y Lynch, 2016; Moreau et al., 2017). Otra limitación importante es la existencia de un sesgo de los países en desarrollo hacia la economía circular, que permite un crecimiento económico, industrial y mundial continuo sin reflejar los impactos en los países en desarrollo (Winans et al., 2017). Sólo los enfoques muy recientes se han centrado en incorporar la dimensión social en los modelos de economía circular (Ashby, 2019; Murray et al., 2017).

La gestión de residuos sólidos juega un papel fundamental en la implantación de esta nueva economía, ya que la economía circular es un mecanismo económico cuyo principal objetivo es erradicar los residuos y garantizar un uso óptimo de los recursos. Para construir esta estructura de circuito cerrado, las tareas clave en la economía circular son la reutilización, restauración, remanufactura y reciclaje. De esta manera, se pretende reducir el insumo y el desperdicio de recursos y, como consecuencia, la contaminación (Petkovic et al., 2021; Dong et al., 2021). La aplicación de enfoques de economía circular en los sistemas de gestión de residuos proporciona los siguientes beneficios (Patel et al., 2021): (i) prestación de servicios asequibles de recogida de residuos a todas las zonas de ingresos, (ii) aumento de la cantidad de residuos recogidos y reciclados, (iii) mejora de la salud a nivel doméstico, (iv) reducción de las emisiones de GEI, (v) creación indirecta de empleo y (vi) aumento de la aplicación de compost para mejorar la fertilidad del suelo agrícola.

En los últimos años, se han realizado varios intentos para implementar los principios de la economía circular en la gestión integral de los residuos sólidos urbanos (Savini, 2021; Romero y Romero, 2018; Pavolová et al., 2020; Plastinina, 2019; Ezeudu et al., 2021; Hemidat et al., 2022; Zaleski y Chawla, 2020), siguiendo las directrices de la normativa europea (Lee et al., 2017). Algunos de estos intentos se basan en la aplicación de modelos matemáticos que permiten optimizar y mejorar el tratamiento de residuos, minimizando la eliminación en vertederos y promoviendo la recirculación y el reciclaje de residuos. Los residuos se han considerado otro recurso. Por ejemplo, algunos autores propusieron un modelo de optimización secuencial que permite conocer los roles que desempeñan los municipios y las empresas de reciclaje, respectivamente, en la mejora de la clasificación, recolección y reutilización de residuos, considerando el impacto económico (Allevi et al., 2021). Otra investigación analizó un sistema egipcio de gestión de residuos y su

potencial de prevención y recuperación, contribuyendo a destacar el mejor método de recolección que conduce al menor costo y máximo beneficio para todas las partes interesadas en los sistemas de gestión de residuos en Egipto al considerar directamente y beneficios indirectos para lograr la sostenibilidad (Zeller et al., 2019). También se busca que la gestión sostenible de los residuos sea rentable (Taleb y Al Farooque, 2021), mediante la aplicación de un modelo económico que optimice la gestión de residuos dirigiéndola al "vertido cero".

Estudios recientes muestran la importancia de implementar técnicas de economía circular en áreas rurales (Rodrigo et al., 2021; Tovar, 2018; Gue et al., 2020; Arroyo, 2018). El objetivo de este trabajo es presentar un nuevo modelo dinámico de economía circular, denominado M-GRCT, que sea aplicable a los municipios de renta baja y que permita analizar los beneficios e inconvenientes de la economía circular enfocándose en la comparación con la economía lineal. Las secciones de este documento están organizadas de la siguiente manera:

La Sección 3.2, "Materiales y Métodos", describe las principales características de los municipios de bajos ingresos (Sección 3.2.1) que se han tenido en cuenta en el diseño del modelo numérico M-GRCT (Sección 3.2.2). La descripción detallada del modelo se proporciona en las Secciones 3.2.3–3.2.7. La sección 3.3, "Estudio de caso", muestra una aplicación del modelo a un municipio de bajos ingresos en Colombia. Las secciones 3.4 y 3.5 incluyen la discusión de los resultados, las principales conclusiones y las futuras líneas de investigación.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Municipios de bajos ingresos: características generales

En Colombia existe una ley nacional (número 617) que establece la clasificación de las municipalidades y fija la renta corriente anual de acuerdo con esto. El artículo 6 de la ley establece cantidades específicas de dinero anual entregado por el gobierno central (Congreso de la república, 2000). Esta categorización permite ciertos tipos de funciones administrativas como el acceso a la inversión, la mejora de la gestión pública y la asignación y distribución de las transferencias nacionales (Duque, 2017). Para ser clasificado dentro de la quinta categoría, un municipio debe tener una población entre 10.001 y 20.000 habitantes o presentar unos ingresos corrientes entre 15.000 y 25.000 veces el salario mínimo legal mensual (228 euros en enero de 2022) (Contaduría General de la Nación, 2021).

El modelo M-GRCT se desarrolló para ser utilizado en municipios de bajos ingresos (quinta y sexta categoría) cuyos ingresos medios anuales no superan los 3.000.000 de euros al año. Otras características de estos municipios incluyen (i) una población inferior a 20.000 habitantes y (ii) una producción per cápita (PPC) inferior a 0,70 kg/persona-día (Contaduría General de la Nación, 2021). Por lo general, estos municipios se ubican

alejados de los grandes núcleos urbanos, donde se acentúa la vulnerabilidad socioeconómica y notoria la falta de cobertura en la prestación de los servicios públicos, especialmente aquellos servicios relacionados con el agua potable, alcantarillado y limpieza (Recalde et al., 2016).

Esta falta de cobertura de los servicios públicos esenciales se debe principalmente a la falta de gestión político-administrativa por parte de las autoridades competentes, que en principio deberían encargarse de los mismos. No garantizar la prestación de servicios no sólo viola los derechos colectivos de estas poblaciones, sino que también afecta su desarrollo socioeconómico. En estas áreas, hay una falta significativa de ofertas de empleo y la inversión privada es baja (Sánchez y Usaquén, 2012).

En concreto, en relación con el servicio de limpieza pública, la prestación del servicio puede no estar disponible o puede carecer de capacidad técnica y administrativa para proporcionar una gestión integral de los residuos sólidos. Esto induce la eliminación de residuos municipales en vertederos / vertederos incontrolados o incluso su incineración como quemas a cielo abierto. Los problemas de salud pública y los impactos ambientales negativos se producen generalmente debido a la proliferación de plagas, la generación y no tratamiento de lixiviados y la emisión de gases de efecto invernadero (Hernández y Corredor, 2016).

3.2.2. M-GRCT: Un modelo numérico para la simulación de sistemas de gestión de residuos sólidos reciclables

M-GRCT es un modelo numérico para la simulación de sistemas de gestión de residuos sólidos reciclables basado en un esquema de economía circular. El modelo proporciona una herramienta de toma de decisiones para los municipios en estudio, permitiéndoles estudiar la implementación de estrategias de gestión de residuos reciclables al aplicar una economía circular. Esto se hace mediante el cálculo de indicadores financieros que miden la viabilidad económica de la comercialización de este tipo de residuos.

El modelo fue diseñado para analizar los siguientes cuatro componentes del sistema de gestión de residuos: (i) generación y segregación de residuos sólidos reciclables (G), (ii) recolección de residuos reciclables (R), (iii) clasificación y almacenamiento temporal en centros de acopio (C) y (iv) transferencia a gerentes externos y retorno a la cadena de producción (T). La figura 3.1 muestra el esquema conceptual del modelo M-GRCT.

Como se muestra en la figura 3.1, los sistemas de gestión de residuos deben considerar la extracción de materias primas/existencia de recursos como una Etapa 0 para la producción de bienes y servicios. Esta etapa inicial también implica la generación de residuos. Posteriormente, si se dispone de un sistema lineal convencional en el municipio, los residuos suelen ser recogidos por el servicio de limpieza pública utilizando vehículos no técnicos y finalmente se eliminan (eventualmente después de algún tipo de tratamiento) en un relleno sanitario.

Por el contrario, el modelo circular propuesto considera la segregación de los principales tipos de residuos. Los residuos orgánicos y no utilizables no son considerados por M-GRCT, ya que solo considera los residuos reciclables como un objetivo. El fundamento del modelo circular se basa fuertemente en la alianza y participación activa de los recicladores que potencialmente llevan a cabo las actividades de reciclaje en ciudades económicamente deprimidas con pocas oportunidades de trabajo. Además, es necesaria la evaluación de las posibilidades económicas y comercializables reales de los residuos reciclables. Las actividades de clasificación y almacenamiento de residuos se pueden realizar en centros de acopio temporales que pueden o no existir en estos municipios. Finalmente, los productos reciclados son devueltos a las cadenas de producción.

Otros elementos identificados en el esquema conceptual del modelo incluyen los impactos generados por la disposición final de residuos si no se dispone de un servicio de limpieza pública prestado por vehículos técnicos. En tal caso, la quema incontrolada de residuos se sigue utilizando en estos municipios, induciendo importantes problemas ambientales y sanitarios.

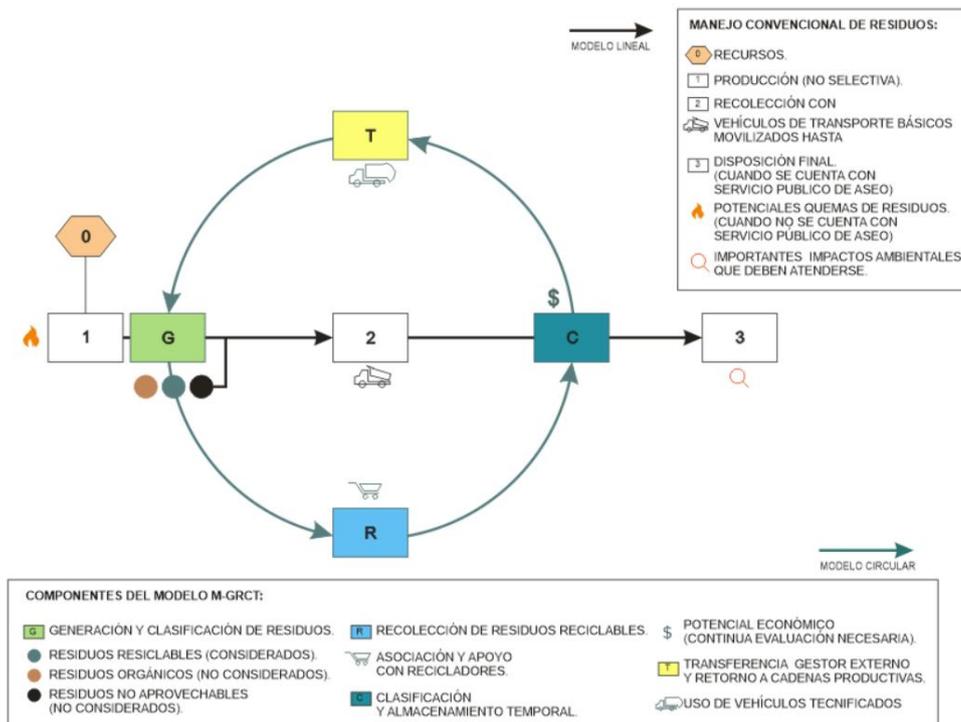


Figura 3.1. Esquema conceptual del modelo M-GRCT

La implementación de un enfoque circular como el considerado por el modelo M-GRCT permite evitar la generación de impactos ambientales o económicos negativos significativos asociados a modelos de gestión de residuos basados en esquemas de economía lineal, en los que los residuos se eliminan finalmente en rellenos sanitarios y un mayor potencial que descarta las alternativas de uso. M-GRCT considera la existencia de rentas económicas relacionadas con (i) impuestos o tasas específicas sobre la recolección y transporte de residuos reciclables o (ii) la comercialización de productos reciclables por parte de gerentes terceros. Además, el modelo considera la existencia de actividades de supervisión en cada etapa de gestión que promueven continuamente la mejora del sistema.

A partir de toda la información disponible, M-GRCT permite simular diferentes escenarios para diseñar de manera óptima el sistema de gestión de residuos en los municipios económicamente deprimidos. Los cuatro componentes del modelo se describen a continuación.

3.2.2.1. Generación y segregación de residuos sólidos reciclables (G)

El primer componente (G) del M-GRCT determina las fuentes de generación de residuos sólidos reciclables para cada municipio que pueden ser valoradas con el modelo. Estas fuentes suelen corresponder a los sectores doméstico, comercial, industrial y oficial, como se muestra en la figura 3.2. En cada una de estas fuentes de generación de residuos reciclables, es fundamental aplicar técnicas de segregación, es decir, la selección y separación específica de cada tipo de residuo reciclable. Si esta segregación se lleva a cabo en la práctica, se facilita considerablemente el reciclado de residuos (Korhonen, 2018).

Los residuos reciclables generalmente se clasifican en cinco categorías: papel, cartón, plástico, vidrio y chatarra, cada una de las cuales se subdivide en subcategorías, como se muestra en la figura 3.3. Esta información se utiliza para recopilar datos sobre la producción anual de residuos reciclables al tiempo que permite estimar la reducción de los residuos reciclables eliminados en los rellenos sanitarios y los beneficios económicos derivados de su posible comercialización.

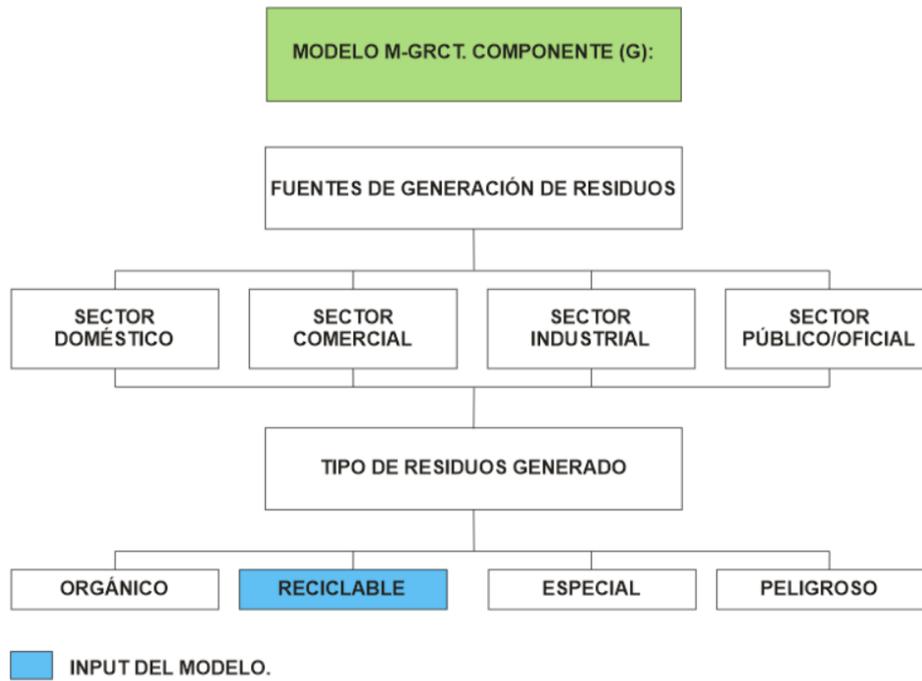


Figura 3.2. Fuentes de generación de residuos reciclables consideradas por el modelo M-GRCT: componente (G)

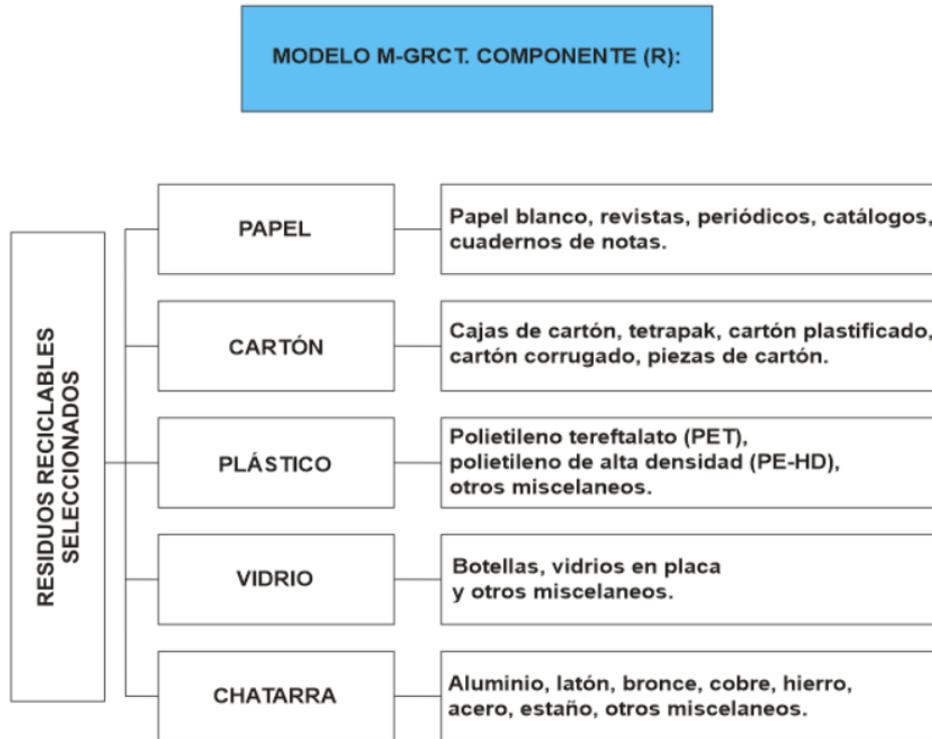


Figura 3.3. Clasificación de residuos reciclables considerada por el modelo M-GRCT: componente (R).

3.2.2.2. Recogida de residuos reciclables (R)

El segundo componente (R) del M-GRCT describe el sistema de recogida de residuos reciclables y realiza un censo de recicladores clasificados por categoría de residuos. Estos recicladores son los que realmente llevan a cabo la recogida de residuos en municipios de bajos ingresos. Además, sobre la base de las categorías de residuos reciclables que se muestran en la figura 3.3, es importante que se fomenten las iniciativas ciudadanas a través de la educación ambiental, de modo que se promueva la recopilación de residuos sólidos. Como se explicó anteriormente, si los residuos se almacenan en condiciones favorables, se pueden recolectar de manera eficiente (García et al., 2019).

Además, desde una perspectiva técnica, es importante que se definan las rutas de recogida selectiva y que se implemente la correcta separación de residuos en origen, especialmente con los residuos reciclables. Estas acciones garantizan que la aplicación de modelos de economía circular y la aplicación de tecnologías de tratamiento de residuos sean operativas y generen resultados satisfactorios, de modo que los residuos potencialmente utilizables no se descarten como materia prima. Por estas razones, es importante

implementar modelos de economía circular para los recicladores profesionales o las asociaciones de recicladores en los municipios de bajos ingresos. En los municipios de bajos ingresos se ha visto que los recicladores no son suficientes para que puedan desarrollar su actividad de forma permanente. Los sindicatos más grandes con mayor control administrativo suelen encontrar empresas privadas de reciclaje que dominan y controlan el mercado (SSPD, 2020).

3.2.2.3. Clasificación y Almacenamiento Temporal en Centros de Acopio (C)

El tercer componente (C) del M-GRCT realiza una caracterización de los centros de recogida donde se clasifican los residuos reciclables. Las principales características técnicas, las divisiones y la organización administrativa del centro se detallan como se muestra en la figura 3.4. Con base en esta información, el modelo M-CGRT clasifica los centros de acopio y la infraestructura de gestión de residuos sólidos.

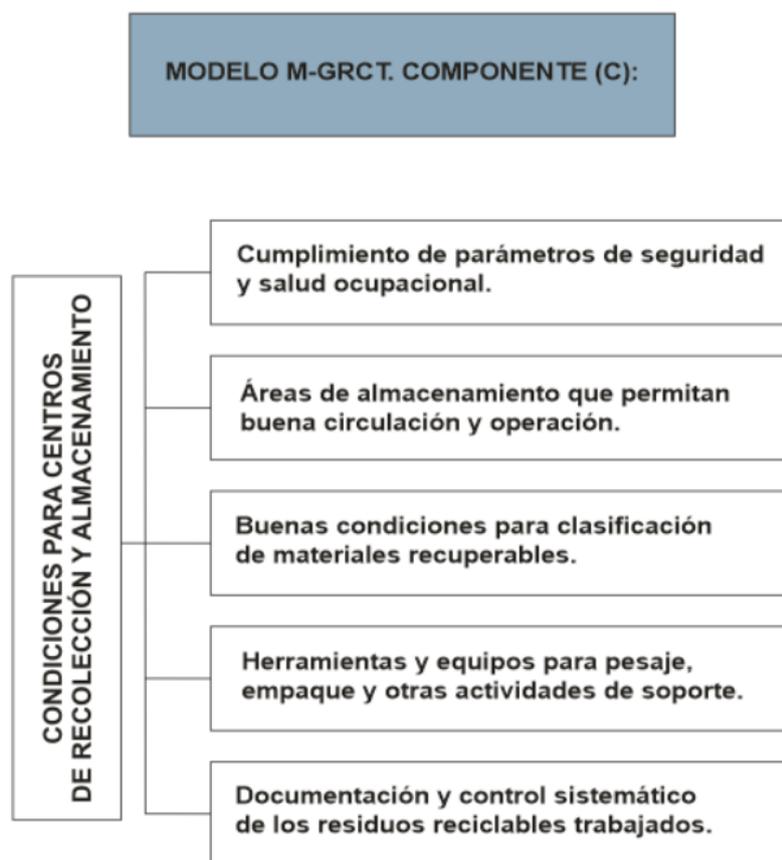


Figura 3.4. Características logísticas y administrativas de un centro de recogida de residuos. Modelo M-GRCT: componente (C).

Dentro de los centros de acopio, los procesos de recepción, pesaje, clasificación y almacenamiento de residuos reciclables se realizan de manera sistemática e integral. Estas actividades se llevan a cabo a través de sistemas de operación manuales, mecánicos o mixtos por parte de recuperadores ambientales que tienen como objetivo principal la realización de un tratamiento preliminar a los residuos con el fin de reducir la cantidad final eliminada en un relleno sanitario (Sembiring y Nitivattananon, 2010).

3.2.2.4. Transferencia a Gerentes Externos y Repaso a la Cadena de Producción (T)

El cuarto componente (T) del M-GRCT considera el cierre del ciclo de la economía circular. Los residuos reciclables se transfieren a gestores externos, lo que permite y promueve la prolongación de la vida útil de los subproductos obtenidos de los residuos y, por lo tanto, aumenta su cantidad y utilidad (Bocken et al., 2016).

Por este motivo, estrategias como la reutilización o el ecodiseño permiten mantener los residuos reciclables durante más tiempo en la cadena de producción debido a su potencial de uso, así como a su durabilidad, generando un aumento del valor residual y la posibilidad de que sean reintroducido en diferentes líneas de producción como materia prima (Rodríguez et al., 2020).

La economía circular se caracteriza por tres niveles de investigación diferentes dependiendo de la escala del análisis (Prieto et al., 2017). A nivel municipal, la economía circular está muy centrada en el desarrollo de eco-ciudades o eco-municipios a través del desarrollo de políticas ambientales y la participación administrativa de los gobiernos. Esa es la razón por la que la implementación de estrategias de economía circular en los municipios de bajos ingresos aumenta la probabilidad de que los modelos de negocio mejoren su economía local e induzcan beneficios en términos de ingresos económicos de las empresas locales y las pequeñas empresas a mediano plazo.

3.2.3. DATA4: La herramienta de soporte informático M-GRCT

M-GRCT se implementó en una herramienta informática llamada DATA4 que permite desarrollar la comparación económica entre la implementación de un modelo de gestión de residuos sólidos basado en la economía lineal y el establecimiento de un modelo que aplica la economía circular. DATA4 se construyó en Excel® permitiendo macros con referencias absolutas para facilitar la interacción del usuario con su interfaz (Milios, 2018). DATA4 tiene en cuenta los siguientes factores técnico-operativos de los sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos: (i) costos de operación, (ii) costos de recolección, (iii) costos de transporte al sitio de disposición final, (iv) costos de distribución final, (v) costos de infraestructura, (vi) caracterización socioeconómica del municipio, y (vii) volumen de residuos de residuos reciclables. La figura 3.5 muestra una vista general del menú principal de la herramienta DATA4.

Toda la información se introduce en una segunda hoja que contiene un registro con los siguientes datos: (i) departamento, (ii) municipio, (iii) categoría, (iv) empresa proveedora de servicios públicos, (v) número de estaciones de reciclaje por área de rango, (vi)

residuos reciclables anuales y vii) información financiera de la empresa de servicios de limpieza (cotejo total del año anterior, gastos, nómina administrativa, nómina de trabajadores, dotación de personal, coste de recogida y transporte hasta la disposición final y coste de la disposición final).

La información financiera es un insumo para la valoración económica del proceso de gestión de residuos actualmente desarrollado. Sobre la base de esta información, posteriormente se lleva a cabo el análisis costo-beneficio de la aplicación modelo (Lett, 2014; Prieto et al., 2018; Amelot, 2011). Una macro programada de Visual Basic® procesa toda esta información, que se almacena en un lugar específico (tercer bloque de la herramienta DATA4). Esto permite la clasificación en escenarios a través de un condicional que describe la infraestructura existente por municipio y el tipo de sistema de recolección de residuos. DATA 4 permite al usuario analizar dos escenarios predefinidos que fueron diseñados para representar el sistema de gestión de residuos reciclables de un municipio de bajos ingresos. Estos escenarios se diseñaron teniendo en cuenta la disponibilidad real de instalaciones de residuos reciclables en el municipio.

2021	
2022	LINEA BASE DEL SERVICIO PÚBLICO DE ASEO
Departamento/Estado	CUNDINAMARCA
Municipio	FOMEQUE
	Total recolección en el año anterior (\$ COP) \$ 190,788,000
	Total gastos del año anterior (\$ COP)
INFORMACIÓN DEL RECICLAJE	
Papel (%)	11.2%
Cartón (%)	13.9%
PET (%)	9.8%
Vidrio (%)	3.1%
Chatarra (%)	0.0%
Peso de residuos reciclables dispuestos en relleno (t/año)	417
Descarte en centro de recolección (%)	20%
Número de recicladores	2
Número de recicladores asociados	0
Número de rutas selectivas para residuos reciclables	0
	Distancia hasta sitio disposición final (km) 91
	Número de vehículos de recolección 1
	Frecuencia de recolección de residuos (#/semana) 1
	Peso de residuos dispuesto en relleno sanitario (t/año) 1064
LINEA BASE DEL SERVICIO PÚBLICO DE ASEO	
	Cuenta con centro de recolección y clasificación? Presione si o no NO
	Centro de recolección de área menor a 150 m2 2
	Centro de recolección de área entre 150 & 999 m2 0
	Centro de recolección de área mayor 1000 m2 0

Figura 3.5. Vista general del menú principal de la herramienta DATA4

- El escenario 1 corresponde a municipios que no cuentan con infraestructura física y maquinaria para realizar cualquier operación de reciclaje que se clasifique como mediano o gran generador de residuos reciclables. Consideraciones reales sobre la construcción y operación infraestructura de tratamiento de residuos dependen del presupuesto municipal y las características del municipio. En concreto, la definición de las dimensiones de la infraestructura de tratamiento de residuos está directamente relacionada con la población, la generación de

residuos y el presupuesto municipal. Dos áreas predeterminadas que fueron consideradas son: centros de acopio de 200 y 350 m². Para estimar los costes económicos de la obra, fueron tomadas como base las directrices propuestas por Villamil et al. (2017).

- El escenario 2 corresponde a municipios con centros de reciclaje existentes equipados con maquinaria y considerados por DATA4 como grandes recolectores. La mejora de estas infraestructuras se refiere a la instalación de suelos rígidos, sistemas de control de emisiones de olores, sistemas de prevención y control de incendios, separación de zonas para actividades tales como recepción de residuos, pesaje, selección y clasificación y almacenamiento temporal de materiales reciclables.

Los rangos de clasificación de residuos reciclables fueron predefinidos de la siguiente manera: pequeños recolectores (0–1020 t/año), medianos recolectores (1021–3100 t/año) y grandes recolectores (>3101 t/año). Estos rangos se definieron aplicando el algoritmo de Jenks (método de roturas naturales de Arcgis®) (Moreira et al., 2021) para la muestra del volumen de residuos reciclables almacenados en rellenos sanitarios y en lugares con situaciones socioeconómicas similares a las de los municipios de bajos ingresos en estudio.

DATA4 exporta automáticamente los resultados obtenidos de forma compatible al formato de los datos desarrollados en las macros a través de Power BI®. Posteriormente, las relaciones entre las variables se visualizan a través de gráficos para unificar y sintetizar toda esta información.

La figura 3.6 muestra un ejemplo de las dos ventanas del panel DATA4 (Power BI®) diseñado para obtener resultados gráficos.

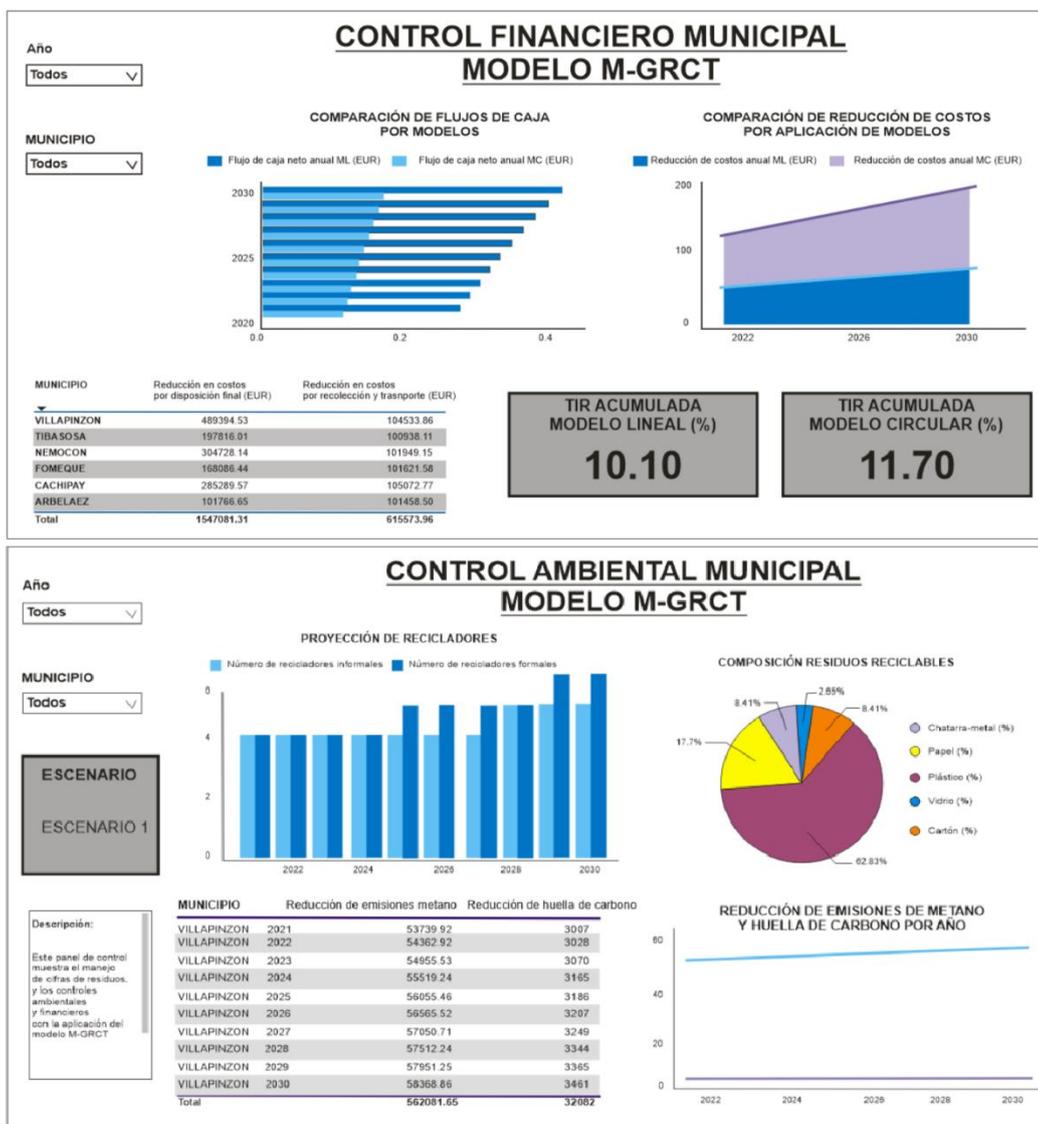


Figura 3.6. Panel de control DATA4

La interfaz gráfica de DATA4 permite visualizar los resultados obtenidos cuando se ejecuta el modelo. En particular, un conjunto de tendencias financieras, la composición de los residuos reciclables, la tendencia de reducción de la huella de carbono y el proyecto de que los recicladores se unan al proceso permiten al usuario identificar con más fuerza

las ventajas del modelo M-GRCT. Todas las variables visibles en el tablero se comparan con el modelo lineal tradicional, lo que permite un análisis práctico para promover la toma de decisiones para significar la implementación del modelo en municipios de bajos ingresos. El panel de control se actualiza automáticamente con la entrada de datos en el menú principal de DATA4.

3.2.4. Definición de escenarios basados en criterios de gestión de residuos reciclables

Los escenarios de simulación se consideran como el contexto en el que el modelo M-GRCT podría implementarse en municipios de bajos ingresos (Oliveira et al., 2020). En otras palabras, la definición de escenarios de simulación requiere establecer las condiciones que garanticen su aplicabilidad. Estas condiciones dependen de los criterios de gestión de residuos reciclables registrados en Componentes G) y R). M-GRCT obtiene los siguientes modelos basados en estos dos componentes almacenados anteriormente: (i) la existencia, el uso y las características de la infraestructura, (ii) los residuos reciclables recogidos y almacenados en los lugares de disposición final y iii) la disponibilidad de maquinaria para actividades de reciclado. La tabla 3.1 muestra la lista completa de parámetros de la herramienta DATA4.

Tabla 3.1. Lista de parámetros: DATA4

Bloque 1. Menú principal		Bloque 2. Información registrada		Bloque 3. Base de datos y escenario de clasificación	
Variable	Unidad	Variable	Unidad	Variable	Unidad
1. Residuos reciclados, primera entrada de datos	--	1. Ingresos y gastos totales de la recolección de residuos (modelo lineal)	Euros	1. Presencia de estaciones de valorización de residuos	Si/No
2. Implementación del monitoreo de escenarios	--	2. Presencia de estaciones de clasificación de residuos	Si/No	2. Tipo de recolección de residuos reciclables (Pequeño/Mediano/Grande)	T/año
		3. Generación anual de residuos reciclables	T/año		
		4. Infraestructura de clasificación de residuos	Si/No		

Bloque 4. Resultados de la evaluación económica		Bloque 5. Panel de control financiero		Bloque 6. Implementación del escenario del panel de supervisión	
Variable	Unidad	Variable	Unidad	Variable	Unidad
1. Escenario	--	1. Tasa de reciclaje	%	1. Número total de recicladores	#
2. Estructura de costos de la empresa prestadora del servicio de limpieza	Euros	2. Ingresos y gastos totales del sistema de recolección de residuos (modelo lineal/circular)	Euros	2. Número total de recicladores asociados	#
3. Presupuesto operativo anual	Euros	3. Reducción de costes debido a la aplicación de escenarios	Euros	3. Número total de recicladores formalizados	#
4. Costos de construcción de nuevas infraestructuras	Euros	4. TIR del sistema de gestión de residuos (modelo lineal/circular)	%	4. Número de rutas selectivas de recolección	
5. Costos de rehabilitación de la infraestructura	Euros	5. Período de retorno de la inversión	años		

3.2.5. Procesamiento de matrices de tipo macro

Dentro de la matriz considerada en la hoja macro, el modelo evalúa dos grandes modificaciones: un contexto ambiental y un contexto financiero. Esto debe lograrse dentro de la implementación del modelo circular. Cada uno de los dos módulos incluye un conjunto de características que infieren los procesos aritméticos que realiza la interfaz.

El resumen de estas características y procesos matemáticos relacionados se muestra en las Tablas 3.2 y 3.3.

Tabla 3.2. Lista de parámetros y procesos matemáticos: DATA4

Función	Variable	Unidad	Proceso matemático
	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de operación (a) 	T	Capacidad 1 = Capacidad compactador (m ³) * Densidad de compactación de residuos Capacidad 2 = Capacidad del vehículo (m ³) * Densidad de los residuos no compactos $a = \sum \text{capacidad } 1 + \sum \text{capacidad } 2$
1. Reducción de la huella de carbono mediante el transporte	<ul style="list-style-type: none"> - Proyección anual del peso de los residuos reciclables dispuestos en rellenos sanitarios (b) - Porcentaje de rechazo (c) - Peso de los residuos reciclables procesados (d) - Frecuencia anual hasta el relleno (e) - Distancia hasta el relleno (f) - Distancia hasta el lugar de transformación (g) - Distancia recorrida por año (h) - Factor de emisión GHG-IPCC (i) - Reducción de la huella de carbono mediante el transporte (j) 	T/año % T/año #/año km km km KgCO ₂ e/km KgCO ₂ e	Porcentaje de incremento (2%/año) después de implementar el modelo circular $= 20\% \text{ del total reportado en el menú principal}$ $= b * c$ = Datos registrados en el menú principal = Datos registrados en el menú principal = 5 km por defecto $= e * (f-g)$ $= 0.68653 \text{ KgCO}_2\text{e/km por defecto asumiendo camiones (IPCC)}$ $= h * i$
2. Reducción de la huella de carbono debido a la generación de lixiviados	<ul style="list-style-type: none"> - Proyección anual del peso de los residuos reciclables eliminados en rellenos - Factor de emisión GHG-IDEAM (k) - Reducción de la huella de carbono debido a la generación de lixiviados (l) 	T/año KgCO ₂ e/t KgCO ₂ e	$= b$ $= 0.022 \text{ KgCO}_2\text{e/t por defecto asumiendo los criterios del IDEAM}$ $= b * k$
3. Reducción de la huella de carbono por generación de gases	<ul style="list-style-type: none"> - Emisiones de gas metano en rellenos(m) - Proporción de residuos municipales reciclables/residuos totales en rellenos(n) - Emisiones municipales de gas metano (o) - Factor de emisión GHG-IPCC (p) - Huella de carbono debido a la generación de gas (q) 	T/año T/año KgCO ₂ e/t KgCO ₂ e	Modelo de relleno EPA Landgem: $Q_{CH4} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^* KLo * \left(\frac{Mt}{10}\right) * e^{-k * t / j}$ $= b / \text{datos notificados en la SUJ y almacenados en DATA4}$ $= m * n$ $= 21 \text{ KgCO}_2\text{e/t por defecto asumiendo los criterios del IPCC}$ $= o * p$
4. Promoción y aumento del número de recicladores asociados	<ul style="list-style-type: none"> - Peso de los residuos reciclables transformados - Proporción de recicladores profesionales/t. de residuos reciclables (t) - Relación recicladores/t de residuos reciclables (s) - Número de recicladores profesionales o informales (u) - Número de recicladores asociados (u) 	T/año #/T #/T # #	$= d$ $= \text{Datos registrados en el menú principal} / d$ $= \text{Datos registrados en el menú principal} / d$ $= \text{Datos registrados en el menú principal}$ $= \text{Datos registrados en el menú principal}$
5. Promoción y aumento del número de rutas selectivas	<ul style="list-style-type: none"> - Peso de los residuos reciclables procesados - Número de rutas selectivas (veces) - Relación rutas selectivas/Tonelada de residuos reciclables 	T/año # #/T	$= d$ $= \text{Datos registrados en el menú principal}$ $= \text{Datos registrados en el menú principal} / d$

Desarrollo de un modelo de economía circular para la gestión de residuos sólidos

Función	Variable	Proceso matemático
1. Estructura de salida del modelo lineal	- Ingresos	= producción media mensual de residuos reciclables + presupuesto municipal mensual
	- Gastos	= costos operacionales + gastos
2. M-GRCT Estructura del modelo de salida	- Ingresos	= producción media mensual de residuos reciclables + presupuesto municipal mensual + ajuste de tarifas + recuperación de residuos utilizables
	- Gastos	Simulación escenario 1 = costos operacionales + gastos + inversión en infraestructura + costos operativos de construcción Simulación escenario 2 = costos operacionales + gastos + inversión en infraestructura + costos operativos de construcción
	- Rescate económico	Corresponde al valor asignado por el fondo nacional de participación de Colombia para el funcionamiento de las empresas de servicios públicos de aseo, porque tienen un presupuesto bajo y no tiene los recursos necesarios para su funcionamiento.
3. Requisitos de financiación	- Reembolso	Pago (tasa de interés; plazo; capital)
	- Intereses	Capital*tasa de efectivo anual
4. Coeficientes financieros	- Valor Presente Neto (VPN)	Tasa; Periodos; Flujo total de dinero
	- Tasa Interna de Retorno (TIR)	Periodos; Flujo total de dinero; flujo total de dinero neto a 10 años
	- Tasa Interna de Oportunidad (TIO)	Valor asumido de 10%
	- Relación costo-beneficio	= Ingresos-Gastos

3.2.6. Ejecución del modelo M-GRCT mediante DATA4

El Componente M-GRCT (G) está integrado en el Bloque 2 de la herramienta DATA4 para registrar la caracterización de residuos reciclables. Se solicita la producción anual (t/año) de cada tipo de residuo reciclable (tabla 3.4). El objetivo del modelo es estimar el aumento de la generación anual de residuos reciclables para cada escenario de simulación.

Tabla 3.4. Caracterización de residuos reciclables DATA4.

Residuo	Unidad de medida
Cartón	t/año
Plástico	t/año
Papel	t/año
Vidrio	t/año
Otros plásticos	t/año
Metales	t/año

El peso de los residuos reciclables por año que se producen para su disposición final (t/año) se incorpora como Componente (R) en el modelo (tabla 3.5). Estos valores se almacenan en el bloque de registro de información de DATA4. El componente (R) es utilizado por la macro para clasificar los municipios según el tipo de colector

mencionado en el Bloque 3 de la tabla 3.1. Del mismo modo, el panel de control de seguimiento realiza una comparación plurianual entre la recogida de residuos reciclables (t), el número de recicladores y el número de rutas selectivas tras la ejecución de diferentes escenarios para el año de referencia.

Tabla 3.5. Registro de información relacionado con el componente (R): DATA4

Variable	Unidad de medida	Bloque-Data4
Residuos reciclables recogidos al año	t/año	2
Número de recicladores independientes	#/año	6
Número de recicladores asociados	#/año	6
Número de recicladores formalizados	#/año	6
Número de rutas selectivas de residuos	#/año	6

Una categorización potencial del municipio (tabla 3.6) es esencial para determinar las dimensiones del centro de recolección y almacenamiento temporal (C), ya que está directamente relacionado con la población, la tasa de generación de residuos y el presupuesto municipal.

Tabla 3.6. Registro de información relacionada con el componente (C): DATA4.

Área del centro de acopio			Residuos reciclables	Tipo de escenario	Escenario
Centro existente m ²	Centro inexistente				
	200 m ²	350 m ²			
#	#	#	t/año	Pequeño/Mediano/Grande	1 o 2

Posteriormente, se deberán definir los escenarios de simulación (tal y como se establece en el apartado 3.2.4). DATA4 desarrolla una evaluación económica de la implementación de cada escenario, considerando un período de operación de 10 años de un centro de recolección de residuos reciclables y evaluando la viabilidad económica a través de indicadores financieros como la tasa interna de retorno (TIR), el valor presente neto (VPN) y el período de retorno de la inversión.

Un factor condicionante para la evaluación utilizando el VPN es realizar un flujo de caja básico (estimación de ingresos y gastos anuales) ya que, si los gastos son mayores que los ingresos, el VPN será negativo. En tal caso, la evaluación financiera se estima únicamente utilizando la proyección de flujo de caja.

El retorno de residuos al ciclo productivo (T) es una variable considerada en el panel de control que muestra los resultados de la evaluación económica. Este panel incluye los siguientes indicadores: reducción de costes por la implantación de escenarios, TIR para los modelos lineales y circulares de gestión de residuos y VPN para el modelo lineal y circular de gestión de residuos. Estos resultados son dependientes y proporcionales al porcentaje anual de residuos (que se incrementa progresivamente en DATA4 del 1% al 10%) y a la proyección de ventas de cada tipo de residuo reciclable (tabla 3.7).

Tabla 3.7. Información relacionada con el componente (T)-DATA4.

Variable	Unidad de medida	Bloque-Data4
Tasa de reciclaje	%	5
Ventas por tipo de residuo reciclable		
a. Cartón		
b. Plástico		
c. Papel	Euros	5
d. Vidrio		
e. Otros plásticos		
f. Metal		

3.2.7. Viabilidad financiera del modelo de economía circular

La viabilidad financiera de un modelo de economía circular está representada por indicadores financieros como el VPN, la tasa interna de oportunidad (TIO), la TIR y el porcentaje de rendimiento o amortización. El VPN está relacionado con la diferencia entre la inversión de capital en un proyecto y sus gastos; por lo tanto, los proyectos con un VPN positivo serán más factibles económicamente en comparación con los proyectos con un VPN negativo (Prieto et al., 2018). De la misma manera, un proyecto es más rentable en términos económicos si su TIR es mayor que el costo de oportunidad de capital (TIO), porque las oportunidades de inversión en las que el costo de oportunidad es menor que las tasas de retorno garantizan mayores ganancias. En cuanto al período de amortización, la teoría económica indica que los proyectos en los que el capital invertido se recupera en menos tiempo aumentan la posibilidad de éxito financiero (Myers, 2010).

En cuanto a los resultados de la valoración económica de los modelos lineales y circulares de gestión de residuos sólidos considerados en este trabajo, se analizan a través de un balance costo-beneficio y la valoración de los indicadores financieros antes

mencionados. Los resultados se muestran en el panel de control de DATA4. Dependen de la tasa de reciclaje, que se incrementa progresivamente automáticamente por DATA4 teniendo en cuenta un análisis de tendencia de los municipios en estudio.

El tablero de control muestra la comparación (gráfico de barras) entre el valor de los ingresos y gastos totales de recolección de residuos para el modelo lineal y los estimados para cada escenario simulado del modelo circular. Además, el cuadro de mando indica (utilizando un gráfico lineal) la reducción de costes para la implementación de un escenario específico, su viabilidad económica analizada según la TIR y el período de retorno de la inversión para su implementación.

El cuadro de control de seguimiento realiza una comparación plurianual entre los residuos reciclables finalmente almacenados en el relleno sanitario tras la ejecución de cualquiera de los escenarios y los valores correspondientes para el año base. Esta comparación se realiza utilizando diagramas de barras. Del mismo modo, el cuadro de mando muestra la cantidad anual de residuos que entran en el centro de acopio por tipo de residuo (papel, cartón, plástico, vidrio y chatarra), su porcentaje en un diagrama circular y los ingresos económicos obtenidos por las ventas en un gráfico de barra horizontal 2D.

Toda la simulación utilizando M-GRCT permite obtener una evaluación financiera del sistema de gestión de residuos de acuerdo con los principios de la economía circular: vincular las nuevas estrategias de producción al servicio de limpieza de residuos, garantizar la sostenibilidad económica y ambiental y ofrecer una vida útil suficientemente larga (Ferasso et al., 2020).

3.3. Estudio de caso: Uso del modelo M-GRCT en el municipio de Guateque (Colombia)

3.3.1. Descripción del área de estudio y selección de escenarios

Con el fin de demostrar la aplicabilidad del modelo en un estudio de caso específico, se utilizó el M-GRCT para analizar el sistema de gestión de residuos del municipio de Guateque, ubicado en el departamento de Boyacá (figura 3.7). Tiene una superficie aproximada de 36,04 km² y, según datos oficiales del año 2020, una población de 10.904 habitantes (Hospital regional II nivel de atención Valle de Tenza, 2020). Desde una perspectiva económica, Guateque no es un municipio que muestre un crecimiento económico significativo, como resultado de la alta dependencia de la economía de la agricultura sin mayor desarrollo tecnológico, la virtual inexistencia de un sector industrial y la presencia de un sector comercial y de servicios débil en el que no hay oportunidades de empleo para retener la población que tiende a migrar a ciudades más grandes (Gobernación de Boyacá, 2017).

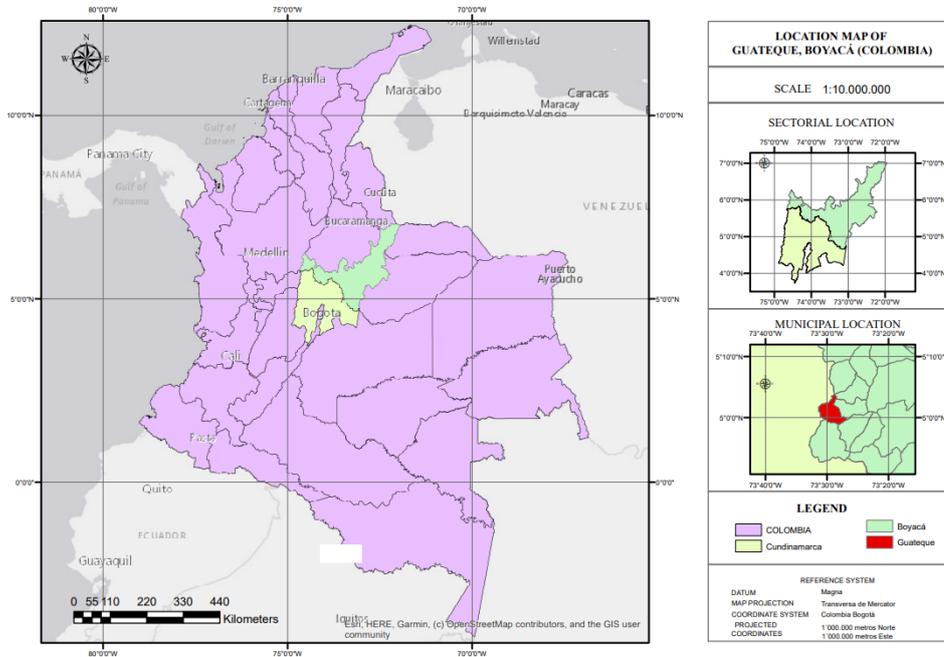


Figura 3.7. Ubicación geográfica del municipio de Guateque

La tabla 3.8 muestra el registro municipal, reportando información general del servicio de limpieza, incluyendo ubicación, categoría, línea base del servicio de limpieza pública y detalles técnicos.

La figura 3.8 muestra los atributos y variables incluidos en la herramienta DATA4 para el estudio de caso.

Guateque es un municipio de bajos ingresos incluido en la sexta categoría de la clasificación colombiana. Algunas de sus principales características son: (i) bajos ingresos otorgados por el gobierno nacional; ii) una baja producción de residuos reciclables; iii) ausencia de buenas prácticas para la segregación y/o el uso de residuos y otros elementos considerados para el modelo. Estas propiedades implican que la simulación se desarrolle en el Escenario 1 de DATA4 (construcción y operación de un centro de almacenamiento o infraestructura de tratamiento de residuos).

Tabla 3.8. Registro e información general del municipio de Guateque.

	Parámetro	Valor	Unidad
Información general	Departamento	Boyacá	--
	Municipio	Guateque	--
	Categoría económica	6	#
	Empresa recolectora de residuos	Empresa de servicios públicos y aseo de Guateque	--
Información de reciclaje	Residuos reciclables recogidos al año	49	t/año
	Centro de acopio existente	NO	SI/NO
	Recicladores registrados	-	#
	Área del centro de acopio simulado	350	m ²

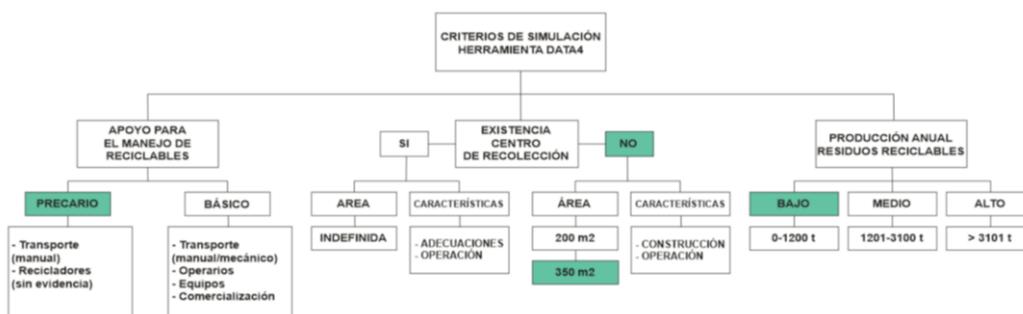


Figura 3.8. Atributos y variables incluidos en la herramienta DATA4 para el caso de estudio

3.3.2. Descripción del área de estudio y selección de escenarios

El municipio de Guateque ha desarrollado un Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) para el período 2017-2028 que considera una cobertura de recolección de residuos del 50% en una frecuencia de recolección semanal (Alcaldía de Guateque, 2017). Los residuos recogidos son transportados y desmontados en el vertedero de Pirgua, que se encuentra a 92 km del municipio. El promedio mensual de producción de residuos es de 264 toneladas. No cuenta con un esquema para el desarrollo del uso del material reciclable, no existe un censo de la población recicladora y no hay infraestructura instalada para el desarrollo de la actividad.

Se ha propuesto un programa centrado en la segregación en la fuente, considerando una eficiencia igual al 80%. También se han considerado algunos avances en las actividades de compostaje y la generación de fertilizantes orgánicos que se distribuyen en proyectos agrícolas con algunos incentivos económicos (Alcaldía de Guatemala, 2017).

La tabla 3.9 muestra la composición de los residuos reciclables en el municipio de Guatemala.

La producción total anual de residuos reciclables es igual a 61,60 t/año. Aunque las cantidades de producción son bajas, la cercanía del municipio a otros centros poblados del estado con mayores posibilidades para la comercialización de reciclables (el modelo de gestión regional podría ser exitoso) promueve la práctica de la segregación y el apoyo del modelo con ella en la gestión de residuos.

Tabla 3.9. Composición de residuos reciclables: Guatemala

Residuos	Producción (t/año)
Cartón	11,13
Plástico	29,57
Papel	13,14
Vidrio	9,13
Otros plásticos	0,12
Metales	0,51

3.3.3. Estudio de caso: componente (G)

DATA4 utiliza los datos proporcionados por la empresa municipal de servicios de limpieza de la municipalidad de Guatemala. En cuanto a la evaluación del servicio de recolección, se ha establecido que el coste anual de recogida es de 13.505,77 euros y la previsión de reducción a un horizonte de 10 años es de 2341,06 euros, lo que supone un importante beneficio económico y medioambiental al reducir los gastos y considerar mejoras en la gestión de residuos reutilizables.

Adicionalmente, con base en los datos reportados por el municipio, se realizó una proyección de la recolección de residuos reciclables para un periodo de 10 años a partir de 2020. Esta proyección consideró que la tasa de reciclaje aumentaría progresivamente del 1% al 10%, como se muestra en la figura 3.9.

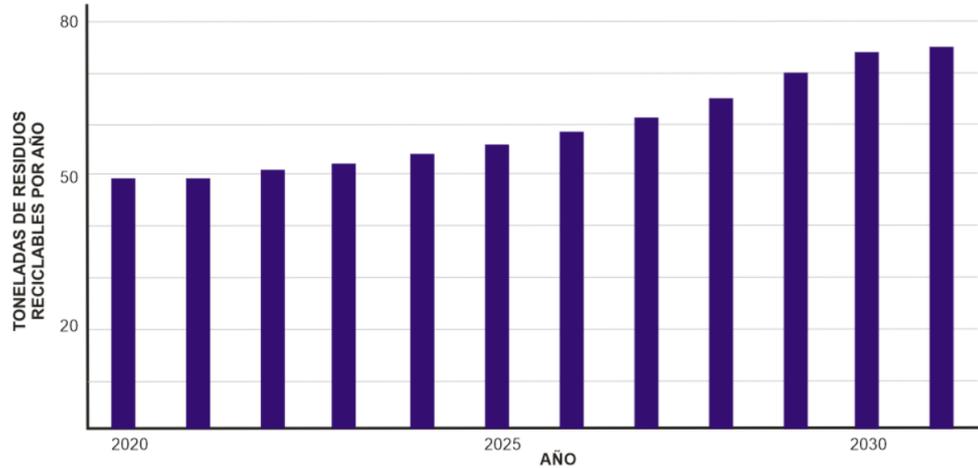


Figura 3.9. Proyección de la tasa de reciclaje en Guatemala (2020-2031)

Además, se realizó una comparación entre la gestión de residuos reciclables a través de un modelo de economía lineal y un modelo de economía circular. El análisis incluyó el número de recicladores por tipo de prestación de servicios, distinguiendo si son de oficio, si están formalizados o si pertenecen a una asociación. Los resultados muestran que el número de recicladores formalizados aumentará gradualmente, disminuyendo los del comercio y manteniendo los que se unen a las asociaciones, como se ilustra en la figura 3.10. Estos resultados muestran que el modelo de economía circular mejora la capacidad técnica y la gestión administrativa de las actividades de limpieza y reciclaje, legalizando y desarrollando gradualmente el servicio prestado por los recicladores.

Adicionalmente, en la comparación entre estos dos modelos económicos sobre la gestión de residuos reciclables, considera la relación de reciclador por vía selectiva recomendada por Corredor en su guía ambiental para la gestión de residuos (Corredor, 2013), las rutas selectivas se proyectaron hasta 2031 como el año en el que se realizan las rutas de recolección selectiva de residuos reciclables debe ser mayor en el modelo circular en comparación con el modelo lineal. Esto explica cómo el modelo circular propone un aumento de los recicladores formalizados encargados de estas rutas selectivas. Mientras que para un enfoque de economía circular el número estimado de rutas es de 12, para un enfoque de economía lineal este número disminuye a solo 3.

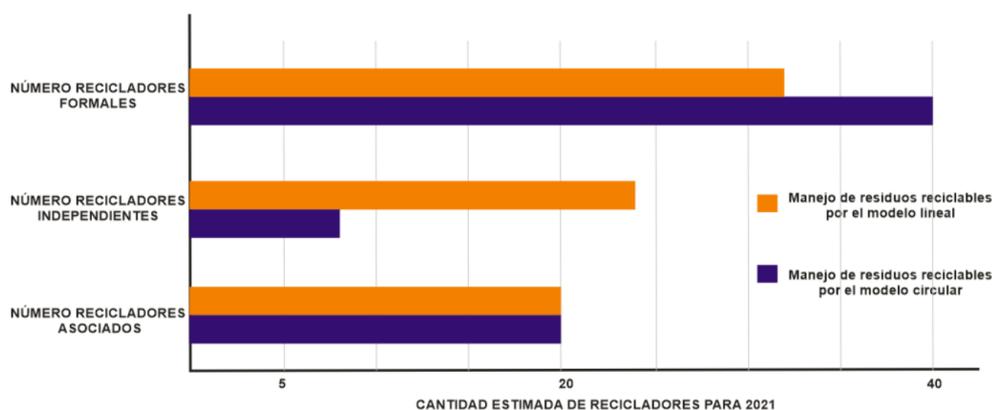


Figura 3.10. Número estimado de recicladores por tipo en el municipio de Guatemala

3.3.4. Estudio de caso: componente (C)

La clasificación de los centros de acopio en DATA4 viene dada por los rangos establecidos por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (MVCT, 2014). Teniendo en cuenta la información mostrada en la tabla 3.4 y siguiendo los atributos y clasificaciones de variables que se muestran en la figura 3.8 y la tabla 3.8. La tabla 3.10 muestra la configuración del centro de recolección simulado que debe construirse para el estudio de caso.

Tabla 3.10. Datos relacionados con el componente (C): DATA4.

Área del centro de acopio			Residuos reciclables (t/año)	Tipo de escenario	Escenario
Centro existente m ²	Centro inexistente				
	200 m ²	350 m ²			
0	0	1	49	Pequeño	1

3.3.5. Estudio de caso: componente (T)

La figura 3.11 muestra los resultados de la valoración económica considerando un aumento gradual en la tasa anual de reciclaje del municipio de Guatemala de 1% a 10%. Con base en esta información y la proyección de los residuos reciclables recolectados que se muestra en la figura 3.9, se obtuvieron ventas por tipo de residuo reciclable proyectado hasta 2031. Estos resultados son producto de los precios proyectados en 2031 de los

materiales utilizables mencionados en la metodología Gómez-Franco (Gómez, 2018). En esta proyección, los tipos de residuos reciclables con mayor valor económico son el PET y el papel, siendo estos los más generados según La tabla 3.5.

A partir de los resultados mostrados por el componente (T), un objetivo general es consolidar la unión de gestores externos de residuos reciclables en municipios de bajos ingresos. Esta unión ya se ha logrado a nivel nacional en Colombia con los gestores de residuos orgánicos y peligrosos. En el caso de los residuos orgánicos, algunas organizaciones ya han creado y consolidado alianzas con grandes empresas para gestionar los residuos obtenidos de diferentes procesos productivos. Un ejemplo es el IIA-Ingeniería, Investigación y Medio Ambiente, a través de tecnologías como el compostaje, la reutilización y el tratamiento de aceites vegetales usados y la compactación de residuos. Han logrado introducir o aplicar estrategias de economía circular para evitar que estos residuos se eliminen en rellenos sanitarios (Sembiring y Nitivattananon, 2018).

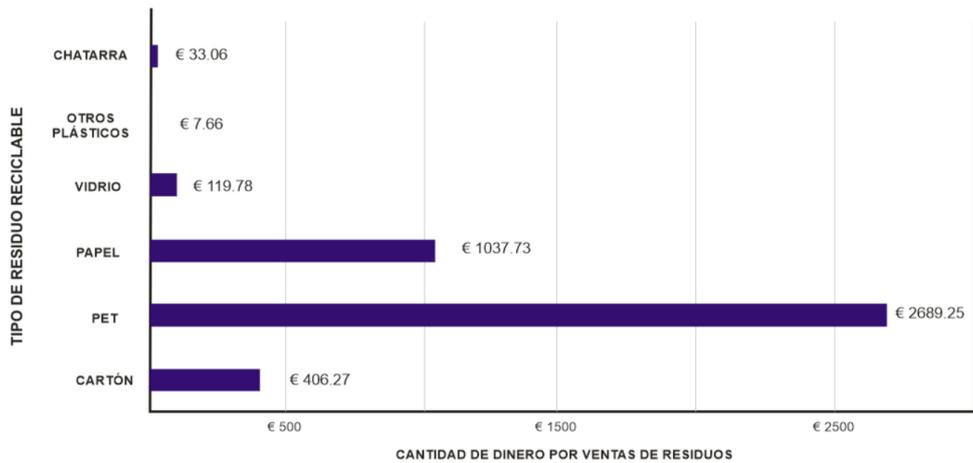


Figura 3.11. Resultados del cuadro de mando financiero en DATA4: Ventas proyectadas por tipo de residuo reciclable con una tasa de reciclaje anual del 1% al 10%.

3.3.6. Resultados del modelo y análisis de la viabilidad financiera

El análisis del flujo de caja consideró los costos de los componentes de recolección, transporte y disposición final, incluido el mantenimiento de la flota automotriz y la nómina operativa y administrativa. Durante la construcción del centro de acopio se asumió la suma de los costos de los salarios de los trabajadores por 17 meses (tiempo estimado de construcción). Los 17 meses corresponden al periodo medio de construcción que puede tomar una obra civil de las dimensiones consideradas para un centro de acopio, tanto como las definido en la simulación con el modelo basado en DNP (2018). También se consideraron los costos de trabajos preliminares, cimentaciones, estructuración y

obras complementarias como instalaciones hidráulicas. Sin embargo, el costo de compra de la tierra no estaba incluido. La base presupuestal del proyecto se tomó según lo establecido por García-Batista et al. (García-Batista et al., 2019), con una tasa de inflación nacional de 0,59% establecida por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia (DANE) para mayo de 2021. La proyección se realizó para el periodo 2021-2031 (10 años) tomando como referencia estudios realizados por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT, 2015).

Se obtuvo un flujo de caja para los modelos de gestión de residuos basados en la economía lineal y la economía circular. Los resultados se comparan en el tablero de control financiero (figura 3.12), lo que indica que en el primer año los ingresos fueron superiores a los gastos. Sin embargo, este efecto sólo se debió a la asignación de 1.200.000 EUR de la UE en recursos gubernamentales como fuente de financiación. Del mismo modo, se estimó la reducción de costes para la recogida, transporte y disposición final de residuos reciclables considerando la diferencia entre el flujo de caja del modelo de economía circular y el del modelo de economía lineal, como se muestra en la figura 3.13.

Siguiendo los flujos de efectivo antes mencionados, los indicadores financieros se muestran en la tabla 3.11. Los resultados demuestran que la aplicación del modelo de economía lineal es más viable en términos económicos, debido a que presenta mayores valores de tasa de retorno interno y relación costo-beneficio. Sin embargo, al comparar los resultados de los otros indicadores como el valor presente neto o la tasa interna de oportunidad, se obtuvieron valores más favorables como resultado del mayor flujo de caja del escenario de construcción y operación de un centro de acopio. A pesar de lo anterior, la implementación de este último es menos rentable económicamente, porque la TIR y la relación costo-beneficio son criterios con mayor ponderación económica que el VPN y el período de retorno, según la investigación de economía circular realizada por Prieto-Sandoval et al. (Prieto-Sandoval, 2018).

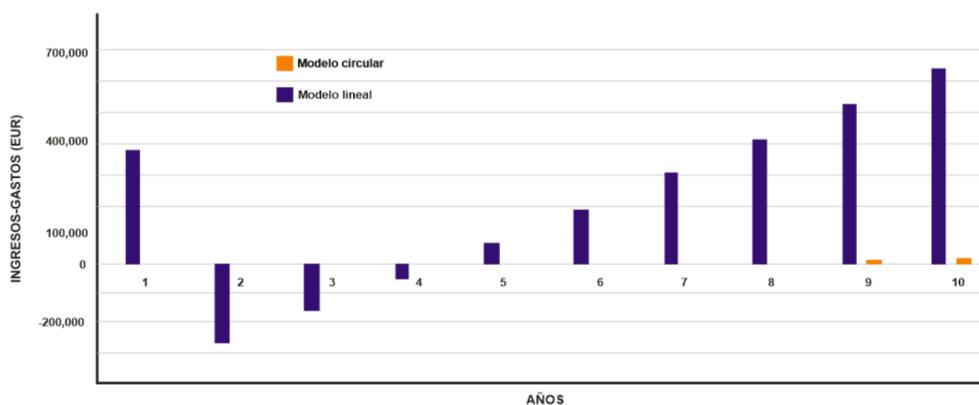


Figura 3.12. Resultados del cuadro de mando financiero en DATA4: Proyección de flujo de caja (ingresos-gastos) para el modelo de economía lineal y el escenario de simulación de economía circular.

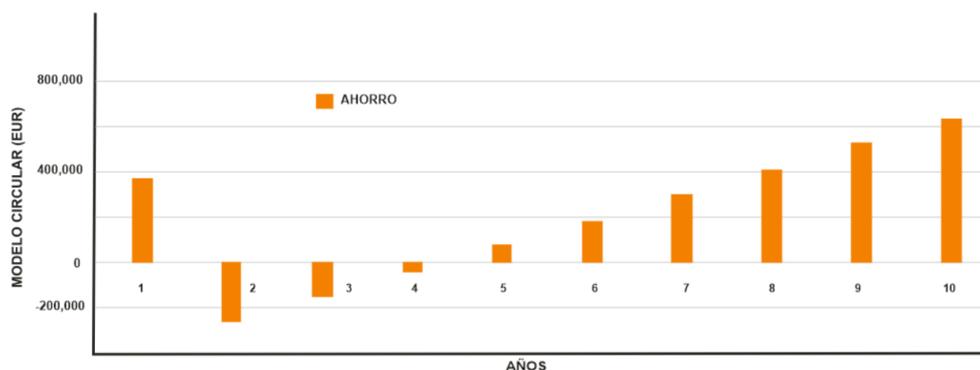


Figura 3.13. Resultados del cuadro de mando financiero en DATA4: Reducción de costes de recogida, transporte y disposición final de residuos utilizables implementados en el escenario de simulación (modelo de economía circular).

Tabla 3.11. Viabilidad financiera evaluada a 10 años (2021-2031) del modelo simulado y del modelo de economía lineal.

Indicador financiero	Modelo de gestión de residuos basado en la economía lineal	Modelo de gestión de residuos basado en la economía circular
VPN	€ 12.364,88	€ 649.154,69
IRR	1,28%	1.14%
IRO	10%	10%
CBR	17%	9%
Tiempo de recuperación	8,3 años	5,2 años

3.4. Discusión

Para que el modelo de economía circular se considere rentable y de interés para las partes interesadas, es necesario evaluar el rendimiento financiero y garantizar la rentabilidad. Si el modelo también incluye efectos relevantes sobre el medio ambiente, existe incertidumbre sobre si "vale la pena ser ecológico" o si "ser ecológico no es digno". En algunos modelos, los costos de materiales y energía se reducen porque no inducen expensas significativas. Sin embargo, existen otros modelos en los que el bajo coste de los materiales puede ser tanto su mayor ventaja como su mayor obstáculo (SSPD, 2020).

La optimización del modelo de economía circular en términos de generación de nuevas oportunidades comerciales debe considerar que la reutilización de productos, la refabricación y el reacondicionamiento suelen requerir menos recursos y energía que el

reciclaje convencional de materiales, ya que estos materiales a menudo permanecen en stock y no generan ningún tipo de rentabilidad (Tovar, 2018).

El uso de herramientas numéricas como M-GRCT para diseñar modelos de economía circular en sistemas de gestión de residuos reciclables permite reducir los materiales que permanecen en stock al hacer un uso intensivo de los recursos y minimizar los impactos ambientales derivados de la explotación y sobreproducción de recursos. Además, la implementación de modelos de economía circular permite impulsar nuevas oportunidades de negocio, añadiendo valor a las cadenas productivas a través de la innovación y la aparición de nuevos modelos de negocio que aporten no solo recursos económicos sino sociales y beneficios medioambientales (Gue et al., 2020).

En efecto, la inclusión de modelos de economía circular conlleva un cambio de paradigma a todos los niveles, empezando por el cambio de las políticas públicas para adoptar paulatinamente el concepto de economía circular a nivel legislativo en detrimento de la persistencia de la linealidad en relación con la economía actual. En otras palabras, los productos se convierten casi determinísticamente en residuos (Arroyo, 2018), particularmente en el caso de los residuos sólidos, seguidos por la población, que con el cambio de hábitos y las mejoras en su forma de consumo generan soluciones; lo mismo es cierto para las empresas, que deben generar sostenibilidad ambiental y financiera, así como para la academia, cuya investigación aporta grandes conocimientos e ideas para una mejor inclusión (Arroyo, 2018).

De hecho, la inclusión de modelos de economía circular en el ámbito de la gestión de residuos conlleva un paradigma que debe basarse en nuevas políticas públicas que adopten gradualmente el concepto de economía circular, evitando la linealidad de la economía actual en la que los productos en residuos (Arroyo, 2018). Todo esto es particularmente cierto en el caso de los sistemas de gestión de residuos sólidos. Los enfoques de economía circular también deben cambiar y mejorar los hábitos de consumo de la población. Igualmente, las empresas deben implementar modalidades circulares que garanticen la sostenibilidad ambiental y financiera. Por último, la contribución del mundo académico, basada en los resultados de la investigación, debe proporcionar conocimientos e ideas para una mejor inclusión de modelos basados en la economía circular (Arroyo, 2018).

Por ello, es fundamental que la administración asuma un papel relevante en la implementación de un marco legislativo y administrativo que permita impulsar el desarrollo de estrategias basadas en el reciclaje y la valorización de materiales a partir de los residuos que se generan diariamente. Todo ello debe, además, garantizar la generación de beneficios económicos para las empresas y a la vez que aporten soluciones a los municipios que aplican esos mecanismos a la gestión de los residuos sólidos domésticos e industriales (IIA, 2021).

El desarrollo de modelos como M-GCRT y herramientas numéricas como DATA4 representa un desafío en Colombia debido a la falta de información sobre la prestación de servicios de limpieza pública en municipios de bajos ingresos. La principal ventaja de

integrar el modelo de economía circular en una herramienta como DATA4 es su interfaz fácil de usar que no requiere ninguna licencia para implementarlo. Como inconvenientes podemos señalar que la valoración económica se realizó de forma estandarizada teniendo en cuenta que el terreno donde se va a construir el centro de acopio de residuos tiene bajos costes de adaptación. Como para cualquier modelo numérico, se necesita una calibración previa, lo que se evidencia en la clasificación de escenarios de simulación en DATA4.

Durante la ejecución de la herramienta DATA4, con la información del municipio de Guatemala, se verificó la viabilidad económica tanto para los modelos lineales (actuales) como circulares de gestión de residuos sólidos, considerando los valores positivos de VAN obtenidos de las simulaciones. Sin embargo, la TIR del escenario de construcción y operación de un centro de recolección de residuos o infraestructura es menor que la TIR en el modelo basado en la economía de lineal, lo que indica que el proyecto no es rentable. Esto podría explicarse porque los ingresos de la valoración económica no incluyen costes como el ajuste tarifario para la recuperación de residuos aprobado por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) ni beneficios como la creación de empleo, el impulso de la economía local y las estrategias de mercado basadas en residuos reciclables cuyo destino final es un relleno sanitario. Del mismo modo, entre otros impactos ambientales positivos, la aplicación de estos modelos en municipios de bajos ingresos induciría una reducción en la emisión de gases como el CO². Estos últimos beneficios ambientales se estimarán mediante la evaluación económica de los impactos en una futura versión de DATA4 (Ecocapital, 2021).

3.5. Conclusiones

En los municipios de bajos ingresos, se identificaron deficiencias en el desarrollo local y el comercio, así como prácticas tradicionales inadecuadas para la gestión de residuos. Los gobiernos locales de estos municipios deben promover la reducción de los impactos ambientales asociados con tales prácticas (por ejemplo, la quema) mediante la implementación de modelos de gestión de residuos.

Los sistemas de gestión de residuos basados en modelos de economía lineal favorecen algunos elementos de la cadena de gestión, pero perpetúan los problemas asociados a los vertederos finales e incluso pueden inducir problemas financieros que pueden evitarse estratégicamente mediante modelos circulares. Los sistemas de gestión de residuos basados en modelos de economía circular requieren voluntad política y un funcionamiento administrativo eficiente junto con la participación activa de la comunidad. Este trabajo presenta M-GRCT, un nuevo modelo de gestión de residuos basado en la economía circular que es aplicable a la mejora de la gestión de residuos en municipios de bajos ingresos con un nivel socioeconómico desfavorable. Los componentes del modelo sugieren la coordinación de las partes interesadas involucradas para aumentar la separación de residuos reciclables en la fuente, se aclara que el modelo no incluye la gestión de residuos orgánicos.

M-GRCT considera importante la participación de los recicladores y la promoción de canales de creación entre ellos, el sector productivo y los servicios de limpieza. Estas actividades refuerzan las operaciones de gestión de residuos y promueven el desarrollo municipal. El modelo M-GRCT se utilizó con éxito para analizar la gestión de residuos reciclables en el municipio de Guateque (Colombia). Los resultados muestran que la implementación de un modelo basado en la economía circular induciría un mayor aumento de los ingresos y de la TIR que el modelo lineal. Para realizar una interpretación correcta y completa de los resultados del modelo, también habría que considerar que la implantación de un modelo basado en la economía circular induce a una reducción de los impactos ambientales de una manera muy importante. La evaluación económica de estos impactos aún no se ha incorporado al modelo. Algunos de estos impactos positivos son la reducción de lixiviados y gases de efecto invernadero, la reducción de la degradación del suelo, la generación de empleos para las comunidades locales, el impulso a la economía local y regional y las mejoras sociales para las asociaciones de recicladores. Las futuras versiones de M-GRCT y DATA4 incorporarán la evaluación de estos impactos ambientales positivos.

3.6. Referencias

- Aguilar-Hernández, G.A.; Dias Rodrigues, J.F.; Tukker, A. Macroeconomic, social and environmental impacts of a circular economy up to 2050: A meta-analysis of prospective studies. *J. Clean. Prod.* 2021, 278, 123421.
- Alcaldía de Guateque, PGIRS Guateque Basura Cero 2017–2028.
- Allevi, E.; Gnudi, A.; Konnov, I.; Oggioni, G. Gestión de residuos sólidos urbanos en economía circular: Un modelo de optimización secuencial. *Econ de Energía.* 2021, 100, 105383.
- Amelot, M. VBA Excel 2010: Programación de la Interfaz de Usuario; *Eni Ediciones: Barcelona, España*, 2011.
- Arroyo, F. The circular economy as a sustainable development factor of the productive sector. *INNOVA Res. J.* 2018, págs. 3, 78–98.
- Ashby, A.; Callegaro, A.M.; Adeyeye, K.; Granados, M. The Spiral Economy: A Socially Progressive Circular Economy Model? In Sustainable Development Goals and Sustainable Supply Chains in the Post-Global Economy. Greening of Industry Networks Studies; *Yakovleva, N., Frei, R., Rama Murthy, S., Eds.; Springer: Cham, Germany* 2019; Volume 7.
- Bocken, N.; de Pauw, I.; Bakker, C.; van der Grinten, B.; Lifset, R. Product design and business model strategies for a circular economy. *J. Ind. Prod. Eng.* 2016, págs. 33, 308–320.

- Bocken, N.M.P.; Olivetti, E.A.; Cullen, J.M.; Potting, J.; Lifset, R. Taking the circularity to the next level: A special issue on the circular economy. *J. Ind. Ecol.* 2017, 21, 476–482.
- Circle Economy. The Circularity Gap Report 2021. Platform for Accelerating the Circular Economy (PACE).
- Congreso de Colombia. Ley 617 de 2000.
- Congreso de la República. Ley 617 de 2000.
- Contaduría General de la Nación. Categorización de Departamentos, Distritos y Municipios.
- Corredor, A. Guía Ambiental para el Manejo de Residuos Sólidos en las Bodegas de Reciclaje—Caso Piloto Bogotá—EN el Marco de la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Tesis de Maestría, Universidad Libre, Bogotá, Colombia, 2013.
- Departamento Nacional de Planeación. Lineamientos para la construcción de estación de clasificación y aprovechamiento de residuos sólidos—ECA. Subdirección Territorial y de Inversiones Públicas 2018, 42.
- Departamento Nacional de Planeación. Sistema de Estadística Territoriales TerriData.
- Dong, L.; Liu, Z.; Bian, Y. Match circular economy and urban sustainability: Re-investigating circular economy under sustainable development goals (SDGs). *Circ. Econ. Sostener.* 2021, págs. 1, 243–256.
- Duque, N. Importancia de la Categorización Territorial para la Descentralización y las Relaciones Intergubernamentales en Colombia. *Derecho Estado* 2017, 38, 67–95. (consultado el 16 de mayo de 2021).
- Ecocapital.
- European Commission. New Circular Economy Action Plan. 2020.
- European Commission. Towards a Circular Economy: A Zero Waste Programme for Europe. In Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions; European Commission: Brussels, Belgium, 2014.
- Ezeudu, O.B.; Ezeudu, T.S.; Ugochukwu, Estados.C.; Agunwamba, J.C.; Oraelosi, T.C. Enablers and barriers to implementation of circular economy in solid waste valorization: The case of urban markets in Anambra, Southeast Nigeria. *Environ. Sustain. Indic.* 2021, 12, 100150.
- Ferasso, M.; Beliaeva, T.; Kraus, S.; Clauss, T.; Ribeiro-Soriano, D. Circular economy business models: The state of research and avenues ahead. *Bus. Strat Environ.* 2020, págs. 29, 1–19.

- García-Batista, R.-M.; Socorro-Castro, A.-R.; Maldonado, A.-V V. Control and environmental management of solid waste, case study. *Univ. Soc.* 2019, págs. 11, 265–271.
- Geissdoerfer, M.; Morioka, S.N.; Monteiro de Carvalho, M. Business models and supply chains for the circular economy. *J. Clean. Prod.* 2018, págs. 190, 712–721.
- Gobernación de Boyacá, Características Socioeconómicas Generales de la Provincia de Oriente y del Municipio de Guateque, Municipio de Guateque. 2017
- Gómez-Franco, M. Methodological Proposal for the Realization of Investment Projects as a Process of Transfer and Assimilation of Technologies; Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas: Santa Clara, Cuba, 2018.
- Gue, I.; Promentilla, M.A.; Tan, R.; Ubando, A. Sector perception of circular economy driver interrelationships. *J. Clean. Prod.* 2020, 276, 123204.
- Hemidat, S.; Achouri, O.; El Fels, L.; Elagroudy, S.; Hafidi, M.; Chaouki, B.; Ahmed, M.; Hodgkinson, I.; Guo, J. Solid Waste Management in the Context of a Circular Economy in the MENA Region. *Sustainability.* 2022, 14, 480.
- Hernández, S.; Corredor, L. Reflections on the economic and environmental importance of global waste management in the XXI century. *J. Technol.l.* 2016, págs. 15, 57–76.
- Hina, M.; Chauhan, C.; Kaur, P.; Kraus, S.; Dhir, A. Drivers and barriers of circular economy business models: Where we are now, and where we are heading. *J. Clean. Prod.* 2022, 333, 130049.
- Hobson, K.; Lynch, N. Diversifying and de-growing the circular economy: Radical social transformation in a resource-scarce world. *Futures* 2016, 82, 15–25.
- Hospital Regional II Nivel de Atención Valle de Tenza, E.S.E. Sede Guateque, 2020. Análisis de Situación de Salud Con el Modelo de los Determinantes Sociales de Salud, Municipio de Guateque Boyacá; 2020.
- IIA Ingeniería, Investigación y Ambiente, Servicios Ambientales.
- Korhonen, J.; Honkasalo, A.; Seppälä, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecol. Econ.* 2018, págs. 143, 37–46.
- Korhonen, J.; Nuur, C.; Feldmann, A.; Birkie, S.E. Circular economy as an essentially contested concept. *J. Clean. Prod.* 2018, págs. 175, 544–552.
- Lee, P.; Sims, E.; Bertham, O.; Symington, H.; Bell, N.; Pfaltzgraff, Los Ángeles; Sjögren, P.; Wilts, C.H.; O'brien, M. Towards a circular economy: Waste management in the EU. In European Parliament, Science and Technology Options Assessment Study; European Parliamentary Research Service: *Luxembourg*, 2017.

- Lett, L. Global threats, waste recycling and the circular economy concept. *Rev. Argent. Microbiol.* 2014, págs. 46, 1–2.
- Lotero, L. The management of the quality of the projects under the perspective of the Circular Economy. *Rev. Cub. Cien. Inform.* 2018, págs. 12, 71–88.
- Machado, N.; Morioka, S.N. Contributions of modularity to the circular economy: A systematic review of literature. *J. Build. Eng.* 2021, 44, 103322.
- Milios, L. Advancing to a Circular Economy: Three essential ingredients for a comprehensive policy mix. *Sustain. Sci* 2018, 13, 861–878.
- Millar, N.; McLaughlin, E.; Börger, T. The Circular Economy: Swings and Roundabouts? *Ecol. Econ.* 2019, págs. 158, 11–19.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Decreto 1077 de 2015.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Resolución 754 de 2014.
- Moreau, V.; Sahakian, M.; Van Griethuysen, P.; Vuille, F. Coming full circle: Why social and institutional dimensions matter for the circular economy. *J. Ind. Ecol.* 2017, págs. 21, 497–506.
- Moreira, L.L.; de Brito, M.M.; Kobiyama, M. Effects of Different Normalization, Aggregation, and Classification Methods on the Construction of Flood Vulnerability Indexes. *Water* 2021, 13, 98.
- Murray, A.; Skene, K.; Haynes, K. The circular economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *J. Bus. Ethics* 2017, 140, 369–380.
- Myers, B. Principios de Finanzas Corporativas. *Mc Graw Hills*. 2010.
- Oliveira, F.; dos Santos, S.; Braga, S.; Duncan, L. Strategies and Challenges for the Circular Economy: A Case Study in Portugal and a Panorama for Brazil. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 2020, 63, 180646.
- Patel, M.; Kumari, S.; Kumari, N.; Ghosh, A. Understanding Circular Economy in Solid Waste Management. In *Handbook of Solid Waste Management*; Baskar, C., Ramakrishna, S., Baskar, S., Sharma, R., Chinnappan, A., Sehwat, R., Eds.; Springer: Singapore, 2021.
- Pavolová, H.; Lacko, R.; Hajduová, Z.; Šimková, Z.; Rovňák, M. The Circular Model in Disposal with Municipal Waste. A Case Study of Slovakia. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 1839.
- Petkovic', B.; Agdas, A.S.; Zandi, Y.; Nikolic', I.; Denic', N.; Radenkovic, S.D.; Almojil, S. F.; Roco-V idela, A.; Kojic', N.; Zlatkovic', D.; et al. Neuro Evaluation of Circular Economy Based on Waste Generation, Recycling, *Renewable Energy, Biomass and Soil Pollution. Rhizosphere.* 2021, 19, 100418.

- Plastinina, I.; Teslyuk, L.; Dukmasova, N.; Pikalova, E. Implementation of Circular Economy Principles in Regional Solid Municipal Waste Management: The Case of Sverdlovskaya Oblast (Russian Federation). *Resource* 2019, 8, 90.
- Prieto-Sandoval, V.; Jaca, C.; Ormazabal, M. Towards a consensus on the circular economy. *J. Clean. Prod.* 2018, págs. 179, 605–615.
- Prieto-Sandoval, V.; Jaca, C.; Ormazabal, M. Circular economy: Relationship with the evolution of the concept of sustainability and strategies for its implementation. *Mem. Investig. Ing.* 2017, págs. 15, 85–95.
- Recalde, G. Equitable Access to Safe Drinking Water and Sanitation: An Opportunity for Judicial and Social Activism at Local Level. *Rev. Derecho* 2016, 46, 257–291.
- Rodrigo-Illari, J.; Vargas-Terranova, C.-A.; Rodrigo-Clavero, M.-E.; Bustos-Castro, P.-A. Advances on the Implementation of Circular Economy Techniques in Rural Areas in Colombia under a Sustainable Development Framework. *Sustainability* 2021, 13, 3816.
- Rodríguez-Martín, A.; Palomo-Zurdo, R.; González-Sánchez, F. Transparency and circular economy: Analysis and assessment of municipal management of urban solid waste. CIRIEC-España. *Rev. Econ. Pública Soc. Coop.* 2020, págs. 99, 233–272.
- Romero-Hernández, O.; Romero, S. Maximizing the value of waste: From waste management to the circular economy. *Thunderbird Int. Bus. Rev.* 2018, págs. 60, 757–764.
- Sánchez, M.; Usaquén, M.I. Economy of domestic public services, beyond the market and the State. *Equidad Desarrollo* 2012, 17, 31–56.
- Sariarli, F. Linear economy versus circular Economy: A comparative and analyzer study for optimization of economy for sustainability. *Visegrad. J. Bioecon. Sustain. Dev.* 2017, págs. 6, 31–34.
- Savini, F. The circular economy of waste: Recovery, incineration and urban reuse. *J. Environ. Plan. Manag.* 2021, 64, 2114–2132.
- Schroeder, P.; Anggraeni, K.; Weber, U. The relevance of circular economy practices to the sustainable development goals. *J. Ind. Ecol.* 2018, págs. 23, 77–95.
- Sembiring, E.; Nitivattananon, V. Sustainable solid waste management toward an inclusive society: Integration of the informal sector. *Resour. Conserv. Recycl.* 2010, págs. 54, 802–809.
- Snellix, S.; Meensel, J.V.; Farahbakhsh, S.; Bourgeois, L.; Mertens, A.; Lauwers, L.; Buysse, J. Waste treatment company decisionmaking in a complex system of markets influenced by the circular economy. *J. Clean. Prod.* 2021, 328, 129672.

- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Informe Sectorial de la Actividad de Aprovechamiento 2018, 11^a ed.; Superservicios: Bogotá, Colombia, 2019.
- Taleb, M.A.; Al Farooque, O. Towards a circular economy for sustainable development: An application of full cost accounting to municipal waste recyclables. *J. Clean. Prod.* 2021, 280, 124047.
- Tovar, L. Formalization of Organizations of Recyclers by Trade in Bogota: Reflections from Popular Economy. *Íconos Rev. Cien. Soc.* 2018, págs. 62, 39–63.
- Vanhuyse, F.; Fejzic', E.; Ddiba, D.; Henrysson, M. The lack of social impact considerations in transitioning towards urban circular economies: A scoping review. *Sustain. Cities Soc.* 2021, 75, 103394.
- Velenturf, A.P.; Purnell, P. Resource recovery from waste: Restoring the balance between resource scarcity and waste overload. *Sustainability* 2017, 9, 1603.
- Villamil, O.; Larrotta, J.; Cortés, N.; Porras, PMBOK approach to the structure of project management. *Tecnol. Investig. Acad.* 2017, págs. 5, 111–120.
- Winans, K.; Kendall, A.; Deng, H. The history and current applications of the circular economy concept. *Renew. Sustain. Energ. Rev* 2017, págs. 68, 825–833.
- Zaleski, P.; Chawla, Y. Circular Economy in Poland: Profitability Analysis for Two Methods of Waste Processing in Small Municipalities. *Energies* 2020, 13, 5166.
- Zeller, V.; Towa, E.; Degrez, M.; Achten, W.M.J. Urban waste flows and their potential for a circular economy model at city-region level. *Waste Manag.* 2019, págs. 83, 83–94.

4. Implementación de técnicas de economía circular para la gestión óptima de residuos sólidos reciclables utilizando el modelo de apoyo a la decisión M-GRCT

Vargas-Terranova, C.-A.; Rodrigo-Ilarri, J.; Rodrigo-Clavero, M.-E.; Parra-Saad, A. Implementing Circular Economy Techniques for the Optimal Management of Recyclable Solid Waste Using the M-GRCT Decision Support Model. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 8072. <https://doi.org/10.3390/app12168072>.

Resumen

Este artículo analiza la implementación de un modelo de economía circular para el manejo de residuos sólidos reutilizables en los municipios colombianos de Arbeláez (departamento de Cundinamarca) y Tibasosa (departamento de Boyacá). El análisis se realiza utilizando M-GRCT, un modelo de apoyo a la decisión de economía circular para el diseño de sistemas de gestión de residuos reciclables en municipios de bajos ingresos. El modelo permite realizar cálculos sobre un conjunto de dos escenarios que integran una evaluación de la dinámica sociocultural, siendo este un rasgo característico de este tipo de municipios. Los resultados muestran que tanto los modelos lineales como los circulares de gestión de residuos son económicamente viables. Sin embargo, las condiciones particulares de cada municipio, el sistema tarifario, el número de abonados y las variaciones de los costes y de la inflación en cada municipio afectan a los resultados de la viabilidad económica. Además, la escala de producción de residuos y los volúmenes de residuos valorizables también afectan a los resultados. Todos estos factores se reflejan en los escenarios analizados. En cuanto a la viabilidad económica, el modelo circular presenta mejores resultados en Arbeláez, mientras que, en el municipio de Tibasosa, los mejores resultados se obtienen con una economía lineal.

Siglas

M-GRCT: Modelo conceptual y numérico para la gestión de residuos sólidos aprovechables bajo un enfoque de economía circular.

DATA4: Interfaz ofimática soporte del modelo M-GRCT.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change/Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

EUR: Euro.

COP: Peso colombiano.

VPN: Valor presente neto.

TIR: Tasa interna de retorno.

TIO: Tasa interna de oportunidad.

B/C: Relación beneficio-costo.

PGIRS: Plan(es) Gestión Integral de Residuos Sólidos.

CF: Carbon footprint/Huella de carbono.

4.1. Introducción y objetivos

La disminución de los recursos naturales y el aumento de la generación de residuos han llevado a la aparición del concepto de "economía circular" como un nuevo paradigma opuesto a la "economía lineal" estándar (Bongers y Casas, 2022). Sin embargo, las ideas centrales de la economía circular surgieron en la década de 1960 y se han discutido desde entonces (Kirchherr et al., 2018).

A pesar de todos los estudios e investigaciones existentes, la economía circular no tiene una definición rigurosa e inequívoca (Reike et al., 2018). De hecho, se han recopilado más de un centenar de definiciones y todas con cierto grado de ambigüedad (Kirchherr et al., 2017).

En aplicaciones prácticas, la economía circular se centra en mejorar las cadenas de valor de los productos a través de estrategias de reducción, reutilización y reciclaje. Las estrategias de circularidad van desde la expansión y/o intensificación del uso de productos (bienes y servicios) hasta el reciclaje de materiales e incluso la minería de vertederos (Moreau, et al., 2017).

Varias economías, como la Unión Europea, Japón y China, han incorporado la economía circular en sus políticas ambientales y de crecimiento económico (Geissdoerfer et al., 2017), considerándola uno de los pilares fundamentales del desarrollo sostenible (Andrews, 2015; Bocken et al., 2016).

Actualmente, existe un debate abierto sobre la relación entre la economía circular y la sostenibilidad, las diferentes formas de promoverla y los sectores cruciales para su implementación (Bongers y Casas, 2022). Algunos autores concluyen que la única forma posible de mejorar el medio ambiente la cual consiste en aumentar la tasa de reciclado

(George et al., 2015), ya que los residuos tienen un valor distinto de cero y pueden generar nuevo material para nuevas actividades de producción/consumo (Lin, 2020).

En Colombia, los avances en la implementación de la economía circular en los últimos años han ido en aumento de acuerdo con lo descrito en la Estrategia de Economía Circular 2019 (Gobierno de la República de Colombia, 2019). Sin embargo, existen algunos obstáculos que merecen ser analizados y superados (Zapata-Bravo et al., 2021): (i) la deficiencia de las políticas públicas establecidas para fomentar el reciclaje; (ii) el alto costo de la inversión en tecnología para aplicar estrategias de remanufactura, rediseño y reutilización; y (iii) la falta de inclusión de los recicladores en toda la cadena productiva, un papel esencial en el uso de los residuos que pasa desapercibido para la sociedad y para los reguladores.

Algunos estudios destacan la importancia de promover la separación en la fuente, no solo en los hogares sino también en los lugares públicos (Taghipour et al., 2022). De esta manera, al implementar estrategias de economía circular dentro de todo el ciclo de explotación, tanto el desempeño ambiental como el financiero serían mayores al tener más material.

En los países sudamericanos, materiales como el cobre y el aluminio se obtienen en gran medida del uso de residuos eléctricos y electrónicos, a través de lo que se denomina "minería urbana" (Mulder y Albaladejo, 2020). Sin embargo, predomina la industria extractiva, por lo que destacan que la valorización de los residuos como materias primas subsiguientes depende de la rentabilidad y la viabilidad técnica, que comienza cuando se separan los residuos, y de la capacidad tecnológica y financiera para aprovechar los residuos.

Los modelos de economía circular deben contemplar estrategias, tanto a nivel empresarial como institucional, para alargar la vida útil de los productos y la desmaterialización (Salvador et al., 2021). A la hora de implementar modelos de economía circular, es necesario determinar el sector al que son aplicables para determinar las relaciones y asociaciones que son esenciales para que estos modelos circulares funcionen. Actualmente, existen modelos de economía circular en muchos campos diferentes, como las economías de los países en desarrollo (Ahmed et al., 2022), la agricultura y la ganadería (Wang et al., 2020), las aguas residuales (Preisner et al., 2022), los neumáticos (Araujo-Morera et al., 2021), los procesos industriales (Piscitell et al., 2021), el biometano (D'Adamo et al., 2021; Rodrigo-Ilarri et al., 2020) o gestión de residuos (Vargas-Terranova et al., 2022), entre otros.

En particular, la gestión de residuos desempeña un papel importante en la aplicación de la economía circular (Chen, 2022). Sin embargo, la falta de información precisa sobre la composición real de los residuos, la recogida y el tratamiento es uno de los principales obstáculos para planificar dicha gestión (Tisserant et al., 2017). El reciclaje de residuos sigue siendo un desafío por varias razones, como la incorrecta gestión, el cumplimiento, las disparidades regulatorias, la falta de infraestructura y el alto costo de los sistemas de

reciclaje, que pueden tener una salud pública asociada e impactos ambientales (Taleb y Farooque, 2021).

A pesar de las dificultades existentes, los estudios y análisis destinados a mejorar el diseño de técnicas y modelos de reciclaje han aumentado en los últimos años (Kuo, et al., 2021; Allevi et al., 2021). Incluso hay investigaciones centradas en el desarrollo de modelos de economía circular para el reciclaje de residuos muy específicos: madera de construcción (Kromoser et al., 2022), acero (Taghipour et al., 2022), fibras de carbono (Naqvi et al., 2018), residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (Pan et al., 2022), residuos de construcción y demolición (Liu, et al., 2022) o textiles (Ribul et al., 2021).

En las zonas urbanas, se espera que las futuras ciudades inteligentes lleven a cabo el reciclaje automatizado de residuos, ayudando a la transición hacia un medio ambiente sostenible (Ajwang et al., 2021). El objetivo es lograr una clasificación y separación efectiva de los diversos tipos de residuos, de modo que el reciclaje inteligente y automático mejore el funcionamiento de las ciudades del futuro (Pardini et al., 2020; Alqahtani et al., 2020).

Sin embargo, un reto mucho más difícil es permitir que las economías emergentes alcancen las tasas de reciclaje de los países desarrollados (Duan et al., 2021). Hay dos problemas fundamentales que deben resolverse para lograr este objetivo: un sistema de gestión de residuos deficiente (Esmailizadeh et al., 2020) y una baja eficiencia en su tratamiento (Valizadeh, y Hakimian, 2019). Actualmente, los esfuerzos de reciclaje y las economías circulares en América Latina aún están en desarrollo (Feronato et al., 2022). Específicamente, en Colombia, los desafíos en la implementación de sistemas adecuados de gestión de RSU se deben a la sostenibilidad financiera, el reciclaje inclusivo y el marco legal actual (Calderón Márquez y Rutkowski, 2020).

Considerando las dificultades antes mencionadas, este artículo analiza, a nivel teórico y práctico, la implementación de un modelo de economía circular para la gestión de residuos sólidos reutilizables en los municipios colombianos de Arbeláez (departamento de Cundinamarca) y Tibasosa (departamento de Boyacá). Los resultados obtenidos proporcionan el primer intento de mejorar el sistema de gestión de residuos sólidos urbanos bajo paradigmas de economía circular en la región.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. DATA4: La herramienta de soporte informático M-GRCT

Esta investigación se realizó utilizando M-GRCT (Vargas-Terranova et al., 2022), un modelo dinámico de economía circular para el diseño óptimo de sistemas de gestión de residuos en municipios de bajos ingresos. A partir de la conceptualización del modelo de economía circular M-GRCT, se desarrolló la herramienta informática DATA4.

DATA4 permite una comparación del modelo económico actual (lineal) y el modelo de economía circular en la gestión de residuos sólidos reutilizables. Esta herramienta compara dos escenarios que determinan la viabilidad del modelo considerando tanto las perspectivas ambientales como las financieras.

El escenario 1 incluye municipios que no cuentan con la infraestructura física y la maquinaria necesaria para gestionar los residuos reciclables o reutilizables. Estos municipios son considerados como pequeños o medianos recolectores y el escenario 2 corresponde a los municipios que cuentan con centros de acopio de residuos sólidos aprovechables y que cuentan con la maquinaria adecuada. Estos municipios se consideran grandes recolectores. En el caso de estudio analizado en esta investigación, y según la matriz de selección, Tibasosa se clasifica dentro del Escenario 1 y Arbeláez dentro del Escenario 2.

4.2.1.1. Procedimiento de control ambiental M-GRCT

El procedimiento de control ambiental considerado por el modelo M-GRCT se muestra en la figura 4.1. Este procedimiento considera un conjunto de criterios para comparar y determinar la viabilidad de los dos escenarios para los municipios seleccionados: la proyección de los recicladores basada en el censo de residuos reciclables, la reducción de las emisiones de metano y la reducción de la huella de carbono.

La proyección de recicladores tanto oficiales como formalizados entre 2021 y 2030 se realizó analizando la relación entre la cantidad de residuos sólidos reutilizables y la producción per cápita, como se muestra en las Ecuaciones (4.2.1.1) y (4.2.1.2).

$$PPC = \frac{\text{Producción de residuos } \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}}\right)}{\text{Número de habitantes}} \quad (4.2.1.1)$$

$$P_R = \frac{\text{Producción de residuos } \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}}\right)}{PPC_0} * PPC_1 \quad (4.2.1.2)$$

donde PPC = producción de residuos per cápita (kg/(persona-día)), P_R = proyección del reciclador, PPC_0 = producción de residuos per cápita en el año en curso (kg/(día-persona)) y PPC_1 = producción de residuos per cápita en el año siguiente (kg/(día-persona)).

Para determinar la reducción de las emisiones de metano, se utilizó el modelo LandGEM (Alexander, et al., 2005). Este modelo calcula las emisiones de metano de los municipios y su factor equivalente en las emisiones de CO₂ (21 kg CO₂ eq/t), según los criterios establecidos por el IPCC (IPCC, 2007). Se utilizaron las ecuaciones (4.2.1.3) y (4.2.1.4) para calcular las emisiones de metano en los municipios:

$$CF_{CH_4} = E * F_e \quad (4.2.1.3)$$

$$E = E_{CH_4} * R \quad (4.2.1.4)$$

donde CF_{CH_4} = reducción de las emisiones de metano (kg CO₂ eq), E = emisiones de metano producido por el municipio (kg CO₂ eq), F_e = factor equivalente, E_{CH_4} = emisiones de metano en cada sitio de disposición final y R = residuo reciclable / proporción total de residuos.

Para analizar la huella de carbono, se tomaron en cuenta las emisiones generadas por el transporte de residuos sólidos teniendo en cuenta la diferencia entre la distancia calculada entre el centro de acopio y el sitio de disposición final.

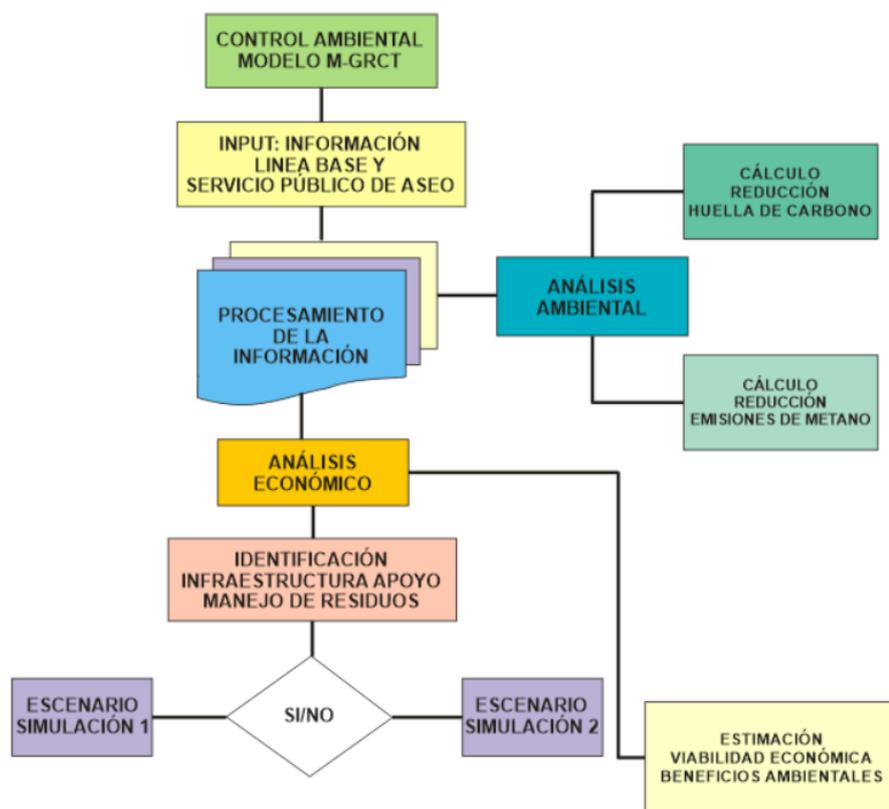


Figura 4.1. Definición de criterios para el procedimiento de control ambiental en el modelo M-GRCT

En primer lugar, se consolidó la frecuencia de recogida y la capacidad de los vehículos de recogida (13 t). Una vez calculadas las distancias, su valor se multiplicó por el factor de emisión de gases de efecto invernadero establecido por el IPCC (0,68653 kg CO₂ eq/km). La ecuación (4.2.1.5) muestra la metodología de cálculo de la reducción de la huella de carbono de la transpiración:

$$CF_{Tr} = (D_0 - D_A) * F_r * F \quad (4.2.1.5)$$

donde CF_{Tr} = reducción de la huella de carbono del transporte (kg CO₂ eq/km), D_0 = distancia entre el centro de acopio y el sitio de disposición final (km), D_A = distancia entre el municipio y el centro de recolección (km), F_R = frecuencia de recolección y F = factor de emisión (kg CO₂ eq/km).

Para calcular la reducción de la huella de carbono generada por los lixiviados, se tuvo en cuenta, el peso de los residuos reciclables procesados y el factor de emisión de gases de efecto invernadero establecido por el IPCC (0,022 kg de CO₂ eq/t) se utilizó. La ecuación (4.2.1.6) muestra la metodología de cálculo de la reducción de la huella de carbono de lixiviados:

$$CF_L = (Peso\ residual\ reciclable) * F_L \quad (4.2.1.6)$$

donde CF_L = reducción de la huella de carbono de lixiviados (kg CO₂ e) y F_L = gas de efecto invernadero factor de emisión (kg CO₂ e/t).

Teniendo en cuenta toda esta información, la reducción total de la huella de gases de efecto invernadero se puede obtener sumando los tres términos anteriores, como se muestra en la Ecuación (4.2.1.7).

$$CF_T = CF_{CH_4} * CF_{Tr} * CF_L \quad (4.2.1.7)$$

4.2.1.2. Control Financiero M-GRCT

Los criterios de viabilidad económica del modelo M-GRCT (Vargas-Terranova et al., 2022) se construyeron a partir de dos modelos de negocio de gestión de residuos. El primer modelo se definió considerando una estrategia lineal de gestión de residuos, en la que la operación consiste en un sistema de recogida y vertido final sin obtener materiales reciclados. El segundo modelo se basa en técnicas de economía circular, que considera la obtención de subproductos reciclados y su reincorporación a las cadenas productivas. El modelo se aplicó a dos municipios (Arbeláez y Tibasosa), por lo que, en total, se analizaron los siguientes cuatro escenarios: (i) valoración económica del modelo lineal en Arbeláez; (ii) valoración económica del modelo circular en Arbeláez; (iii) valoración económica del modelo lineal en Tibasosa; y (iv) valoración económica del modelo circular en Tibasosa.

Para la construcción de los escenarios lineales en cada municipio se utilizaron las cifras de ingresos y costes comunicadas por los alcaldes de Arbeláez y Tibasosa, y las correspondientes se elaboraron proyecciones. Para la construcción de los escenarios del modelo circular con M-GRCT, se elaboraron estimaciones de ingresos, costos e inversiones para la implantación de plantas de reciclaje para el uso de materiales recuperados. Además, para todos los escenarios, se construyeron los flujos de efectivo correspondientes con un horizonte de evaluación de 10 años. Se utilizó una tasa de oportunidad del 10% (o rendimiento mínimo esperado). Los resultados se expresan en EUR, tomando un tipo de cambio de referencia de COP 4545,45 (pesos colombianos) por cada EUR.

Además, para el cálculo de los flujos de efectivo, se asumió un componente de financiamiento a través del crédito bancario, ya que los municipios con bajos niveles de ingresos no cuentan con recursos suficientes para realizar la inversión con recursos propios.

Los criterios de valoración económica utilizados son el valor presente neto (VPN), la tasa de retorno interna (TIR), la relación beneficio-costo (B/C) y el período de retorno (Payback). Estos criterios son ampliamente utilizados en la literatura de valoración económica para la selección y/o priorización de proyectos o alternativas de inversión (Maric et al., 2011; Keca et al., 2012; Zizlavsky, 2014; Mellichamp, 2017; Gasparis-Wieloch, 2019). El VPN se calculó según la Ecuación (4.2.1.8) y la TIR según la Ecuación (4.2.1.9).

$$VPN = -INV_0 - \sum_{j=0}^N \frac{C_j}{(1+OR)^j} + \sum_{j=0}^N \frac{B_j}{(1+OR)^j} \quad (4.2.1.8)$$

$$0 = \sum_{j=0}^N \frac{B_j}{(1+iIRR)^j} + \sum_{j=0}^N \frac{C_j}{(1+iIRR)^j} \quad (4.2.1.9)$$

Cuando el VPN se defina como el valor neto de los flujos de efectivo futuros expresados en el año de base, INV_0 es la inversión en el momento inicial, C_j es el saldo neto de gastos en el período j , B_j es el saldo neto de beneficios en el período j , O es la tasa de oportunidad para un valor de retorno del 10% (este porcentaje se establece como referencia, teniendo en cuenta la rentabilidad media de los fondos de inversión en Colombia), j es el período de la evaluación horizonte (10 años), y \sum_N es la suma de los flujos de efectivo expresados en el año de base. Por otro lado, i_{IRR} es la tasa de retorno interna y se define como la tasa que convierte el VPN a cero y representa la tasa a la que regresa la inversión. La TIR se calcula mediante interpolación utilizando los datos de entrada para calcular el VPN. Para estimar la relación costo-beneficio (B/C), se utilizó la ecuación (4.2.1.10):

$$B/C = \frac{\sum_{j=0}^N \frac{B_j}{(1+TO)^j}}{\sum_{j=0}^N \frac{C_j}{(1+TO)^j}} \quad (4.2.1.10)$$

Donde B/C representa los beneficios obtenidos por cada EUR de coste en la operación y se define como el cociente del valor actual de los ingresos sobre el valor actual de los costes.

Para estimar el período de recuperación, se utilizó la ecuación (4.2.1.11). Payback representa el período (años) en el que se recupera la inversión:

$$Payback = A_{n-1} + \frac{FC_j}{FCa_{j-1}} \quad (4.2.1.11)$$

Donde A_{n-1} es el número del período inmediatamente anterior hasta que se recupere el desembolso inicial, FC_j es el valor del flujo de caja en el período en el que se recupera el

desembolso inicial, y $F_{caj 1}$ es el valor de los flujos de efectivo acumulados en el período inmediatamente anterior hasta que se recupera el desembolso inicial.

Estos criterios de evaluación económica deben compararse con un conjunto de criterios de decisión estándar sobre la viabilidad de cada escenario. En el análisis se consideraron los siguientes tres criterios:

- Debe verificarse un valor positivo de VPN para validar la decisión de aceptar la implementación y operación del modelo de negocio, si se trata de (i) una línea de tratamiento de residuos con eliminación final de residuos sin más uso o (ii) un modelo de gestión de la economía circular con uso de residuos inorgánicos reciclables.
- Debe realizarse otro análisis basado en el valor de la TIR. El criterio de decisión se basa en la comparación de la TIR con el TIO, validando la decisión de aceptar el modelo circular si $TIR > TIO$.
- Por último, como tercer criterio, debe verificarse que $B/C > 1$, lo que indica que cada EUR asignado al coste está cubierto por los ingresos.

El período de retorno no tiene un estándar de comparación, ya que indica el período de tiempo en el que se recupera la inversión, que es un signo del tiempo de vencimiento de las inversiones. La tabla 4.1 muestra los posibles resultados de los criterios de decisión de la aplicación de los criterios de VPN, TIR y relación B/C definidos anteriormente.

Tabla 4.1. Criterios de decisión sobre la viabilidad de las alternativas de inversión económica

Criterio de interpretación VPN	Criterio de interpretación TIR	Criterio de interpretación B/C
$VPN > 0 \rightarrow$ Aceptar	$TIR > TIO \rightarrow$ Aceptar	$RB/C > 1 \rightarrow$ Aceptar
$VPN < 0 \rightarrow$ Rechazar	$TIR < TIO \rightarrow$ Rechaza	$RB/C < 1 \rightarrow$ Rechazar
$VPN = 0 \rightarrow$ Decisión	$TIR = TIO \rightarrow$ Decisión	$RB/C = 1 \rightarrow$ Decisión
Indiferente	Indiferente	Indiferente

4.2.2. Selección de Municipios

En Colombia, los municipios se clasifican a través de seis categorías, dependiendo del número de habitantes y el ingreso promedio per cápita. En el país, casi el 90% de los municipios se encuentran en la cuarta, quinta y sexta categoría. Estos municipios son los que tienen mayores dificultades en la gestión integral del servicio público de saneamiento, especialmente en el componente de reciclaje (Rodrigo-Illarri et al., 2021).

Los municipios fueron seleccionados a partir del uso de una matriz de selección de criterios ponderados (tabla 4.2) en la que se evaluaron los siguientes cuatro componentes:

- Componente administrativo: existencia de un PGIRS e implementación de estrategias para el uso de residuos en el desarrollo del plan municipal;
- Componente ambiental: existencia de un centro de recolección y clasificación de residuos;
- Componente económico: inclusión de las actividades de reciclaje en el presupuesto municipal y en las proyecciones financieras PGIRS;
- Componente social: la existencia de actividades realizadas por participación ciudadana en actividades de reciclaje.

Tabla 4.2. Criterios ponderados matriz de selección de municipios

Componente	Criterio	Escala	Valor
Administrativos	El plan de desarrollo municipal contempla estrategias para la gestión de residuos sólidos aprovechables.	Sí	3
		No	1
	El municipio tiene un plan de gestión integral de residuos sólidos.	Sí	5
		No	1
Ambientales	El municipio cuenta con un centro de acopio para los residuos sólidos aprovechables.	Sí	10
		No	1
	El municipio identifica y/o clasifica los residuos sólidos aprovechables.	Sí	3
		No	1
Económicos	Dentro del presupuesto municipal se considera dentro de los rubros la recolección de residuos aprovechables.	Sí	5
		No	3
		No se conoce	1
	Dentro del PGIRS en la proyección financiera de los componentes del servicio público de aseo, se tienen contemplado destinar algún monto a actividades desarrolladas por recuperadores ambientales.	Sí	10
		No	1
Sociales	La recolección de residuos sólidos aprovechables es realizada por asociaciones de recicladores o recicladores de oficio.	Sí	10
		No	1
	La participación de la población ubicada tanto en cabecera municipal como zona rural es constante e inclusiva.	Sí	3
		No	1

Teniendo en cuenta esta matriz de selección, en este estudio se analizó un conjunto total de seis municipios. Finalmente, los municipios de Arbeláez (ubicado en el departamento de Cundinamarca, población = 10.005 para 2018) y Tibasosa (ubicado en el departamento de Boyacá, población = 11,023 para 2018) fueron seleccionados, obteniendo una calificación de 50 y 45, respectivamente. Su ubicación dentro de Colombia se muestra en la figura 4.2.

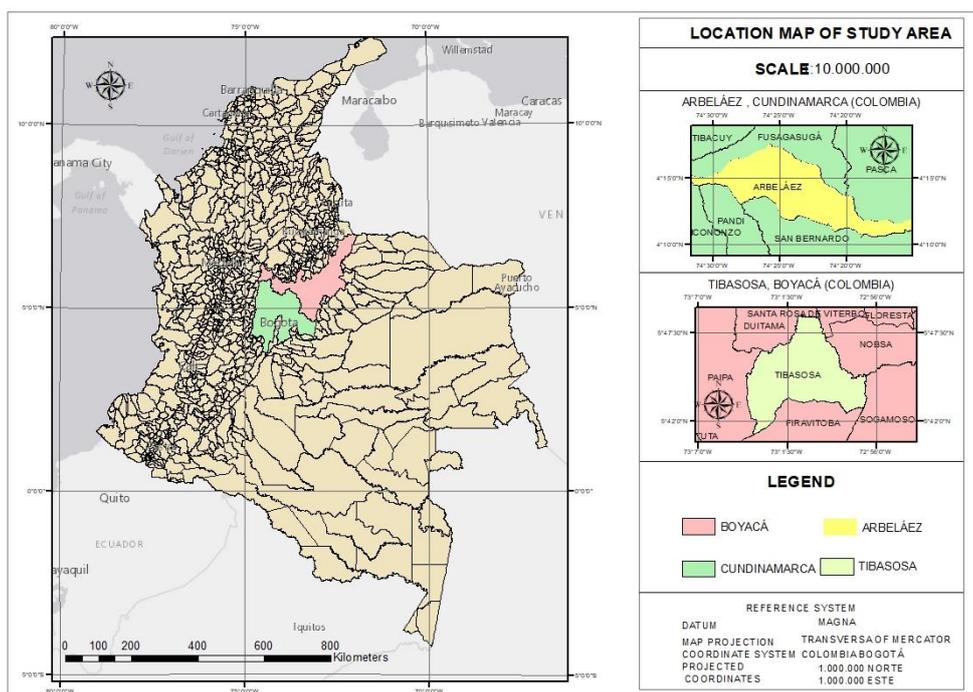


Figura 4.2. Ubicación geográfica de los municipios de Tibasosa y Arbeláez dentro de las regiones de Cundinamarca y Boyacá (Colombia)

4.2.3. Selección de Municipios

Los planes integrales de gestión de residuos sólidos (PGIRS) fueron evaluados a través de un análisis DAFO, identificando las debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas relacionadas con la población, los operadores de servicios y la administración municipal en condiciones del servicio público de limpieza (tabla 4.3).

Tabla 4.3. Evaluación PGIRS: Matriz DAFO

Fortalezas	Debilidades
F1. Control en la prestación del servicio público de aseo.	D1. La información no se actualiza periódicamente.
F2. Información general sobre cada actividad en la gestión de residuos sólidos.	D2. Limitación en el presupuesto para la elaboración del PGIRS y para el desarrollo de actividades.
F3. Definición de las rutas de recolección de residuos sólidos.	D3. No cumplimiento de las metas propuestas.
Oportunidades	Amenazas
O1. Oferta en el aprovechamiento de residuos por parte de la comunidad o de actores externos.	A1. Capacidad y vida útil de los rellenos sanitarios.
O2. Participación de la población urbana y rural en la gestión.	A2. Error en proyección por un Aumento o disminución en el número de habitantes en el municipio.
O3. Introducción de residuos en nuevas cadenas de producción como materiales partir de la clasificación.	A3. No participación en campañas de sensibilización.

La información recolectada del PGIRS fue el principal insumo para el diagnóstico y elaboración de las diferentes proyecciones dentro del modelo. Sin embargo, algunos de estos planes no cuentan con toda la información requerida para la aplicación del modelo, y en algunos casos, esta información no fue actualizada, por lo que se utilizaron fuentes primarias de información. Para obtener esta información, se realizaron solicitudes formales a través de encuestas y trabajo de campo, estableciendo comunicación presencial con las empresas municipales de servicios públicos.

4.3. Resultados

4.3.1. M-GRCT Control Ambiental en Municipios

4.3.1.1. Generación Anual de Residuos Reciclables

El municipio de Tibasosa está clasificado como Escenario 1. La tendencia en la generación anual de residuos sólidos reciclables muestra porcentajes similares para plástico, papel, cartón y el vidrio y, en menor medida, para el metal. Por otra parte, en el municipio de Arbeláez, clasificado como Escenario 2, hay evidencia de una mayor generación de plásticos, seguidos de metal (no hierro), cartón, vidrio, papel y, finalmente, hierro metal.

La comparación entre la producción anual de residuos reciclables (2021-2030) y su composición media en ambos municipios se muestra en la figura 4.3. La producción total de los residuos reciclados es más alta en Tibasosa que en Arbeláez. Tibasosa produce

alrededor de 30 t/año de papel, cartón, vidrio plástico y metal no ferroso, donde en Arbeláez, la producción de todos estos componentes es inferior a 20 t/año (excepto el plástico, para el que la producción anual es superior a 50 t/año).

La composición media de los residuos reciclados en Tibasosa muestra que las cantidades de cada componente se distribuyen equitativamente entre papel (25,41%), cartón (23,04%), plástico (27,39%) y vidrio (22,10%). Solo se encuentra una cantidad muy pequeña de metal (2,06%). En realidad, en Arbeláez, la cantidad de los componentes de los residuos no es igualmente distribuido. Se encuentran mayores cantidades de plástico (39,53%) junto con metal no ferroso (18,60%), cartón (13,95%), vidrio (11,63%), papel (9,30%) y metal ferroso (6,98%).

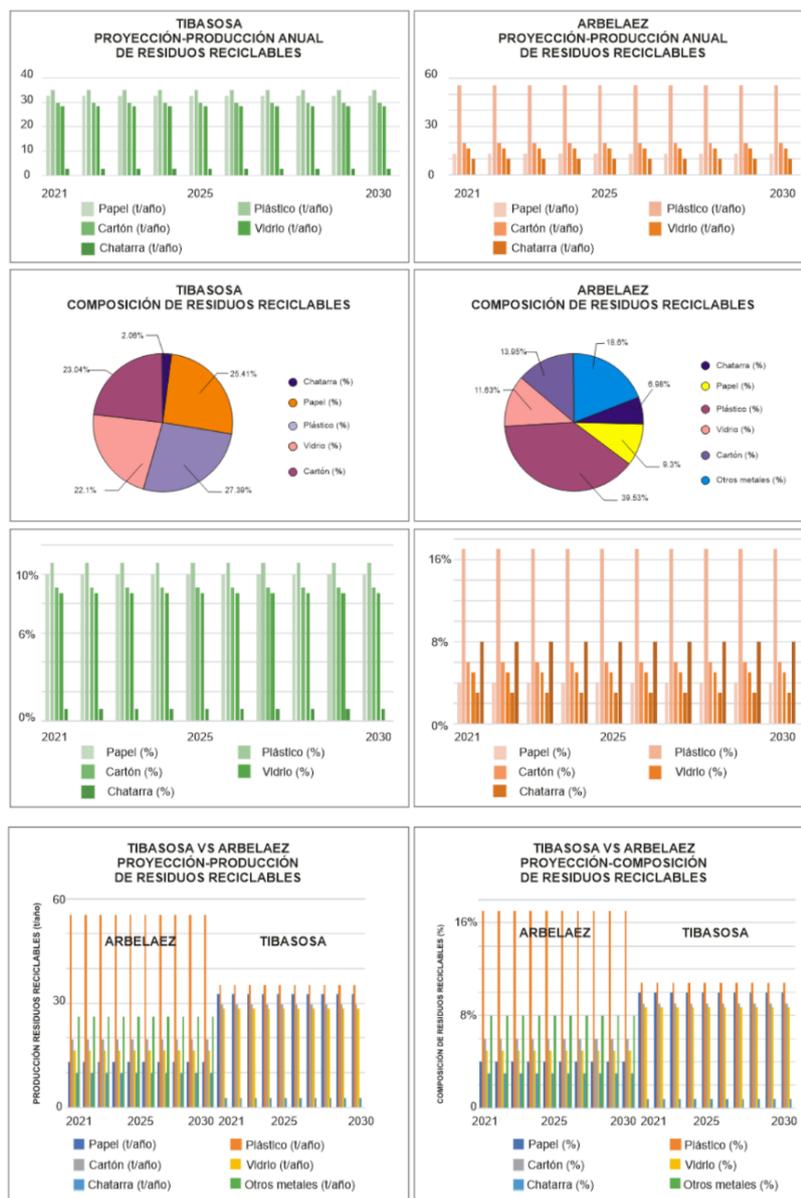


Figura 4.3. Producción de residuos reciclables y características proyectadas, (izquierda) Escenario 1: Tibasosa; (derecha) Escenario 2: Arbeláez.

Línea 1. Proyecciones de producción anual de residuos reciclables. Línea 2. Composición porcentual de residuos reciclables generados (2021). Línea 3. Proyecciones de composición porcentual anual de residuos reciclables. Línea 4. Contraste de proyecciones de producción y composición porcentual anual entre municipios.

4.3.1.2. Proyección del número de recicladores de residuos

La proyección para los recicladores de residuos en el municipio de Tibasosa para 2030 es de aproximadamente 17 recicladores profesionales y 20 recicladores formalizados. Se observó un aumento en la una tendencia de un reciclador por año para cada tipo de reciclador. Para el municipio de Arbeláez, según la proyección de recicladores, un incremento de 1 reciclador al año, aunque el número total de recicladores es menor que en la población de Tibasosa, con un total de 13 recicladores profesionales y 15 recicladores formalizados. La evolución del número total de recicladores en ambos municipios se muestra en la figura 4.4.

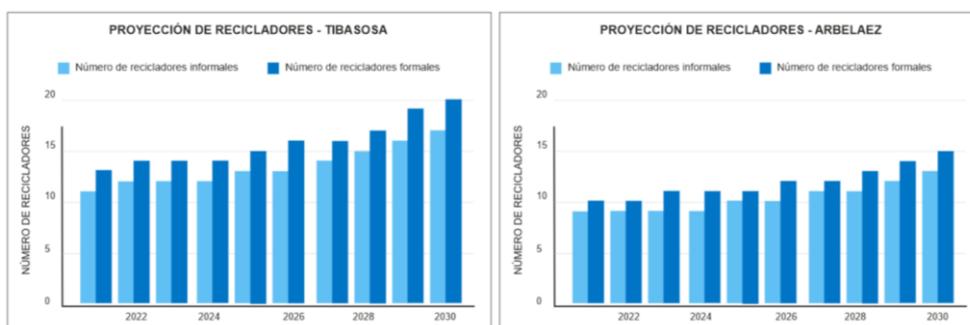


Figura 4.4. Proyección del número de recicladores, (izquierda) Escenario 1: Tibasosa; (derecha) Escenario 2: Arbeláez

4.3.1.3. Reducción anual de las emisiones de metano

Para ambos municipios de Tibasosa y Arbeláez, se observó una tendencia a reducir las emisiones de metano. Esta reducción se justifica por las menores cantidades de residuos sólidos reutilizables, papel y cartón que finalmente se eliminan en el relleno sanitario cuando es recuperado en la planta de clasificación. La figura 4.5 muestra las estimaciones obtenidas por el modelo M-GRCT en el horizonte 2030.

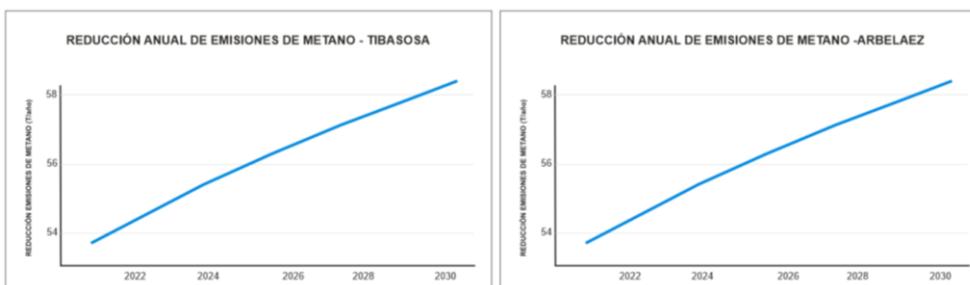


Figura 4.5. Emisiones de metano en reducciones de rellenos sanitarios, (izquierda) Escenario 1: Tibasosa; (derecha) Escenario 2: Arbeláez

4.3.1.4. Reducción anual de la huella de carbono

La reducción de la huella anual de carbón debido al transporte, generación de lixiviados y emisiones de metano se debe principalmente a las menores distancias recorridas por los camiones de recolección y la menor cantidad de residuos sólidos que llegarán al relleno sanitario desde los centros de acopio. La figura 4.6 muestra la tendencia en la reducción de la huella de carbono anual para el municipio de Tibasosa y Arbeláez.

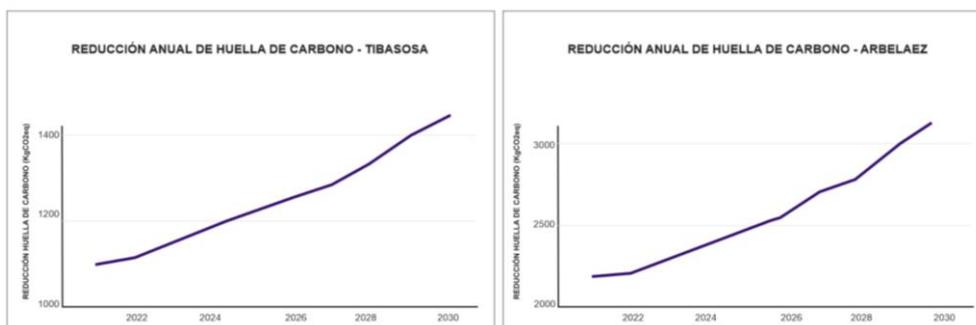


Figura 4.6. Reducción anual de la huella de carbono, (izquierda) Escenario 1: Tibasosa; (derecha) Escenario 2: Arbeláez

4.3.2. Control financiero de M-GRCT en ambos municipios

En la tabla 4.4 se registran los insumos de flujo de caja y los valores de referencia en cada escenario utilizado para proporcionar las proyecciones económicas consideradas por el modelo M-GRCT.

Los resultados de la evaluación financiera de cada municipio, al operar de manera convencional (modelo lineal) y al implementar un modelo de negocio basado en la gestión y uso de residuos inorgánicos reciclables (modelo circular), se muestran en la tabla 4.4. Los resultados muestran que el VAN más alto se encuentra para un escenario lineal en Tibasosa (325.415 euros), mientras que, para un escenario de economía circular, el VAN es menor (109.398 euros). Sin embargo, para el municipio de Arbeláez, el VAN más alto se encuentra para un escenario de economía circular (180.494 euros), y este valor es menor bajo un modelo de gestión lineal (110.172 euros).

Tabla 4.4. Criterios de evaluación de los modelos de gestión lineal y circular (M-GRCT)

Municipio	Arbeláez		Tibasosa	
	Lineal	Circular	Lineal	Circular
Modelo	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Criterios de evaluación				
VPN	110.172€	180.494€	325.415€	109.398€
TIR	34,2%	33,4%	77,6%	26,7%
RB/C	0,00035€	0,00054€	0,00038€	0,00045€
Payback (años)	6,7	8,6	2,6	9,8

Nota: VAN y B/C en EUR; VAN: Valor Actual Neto; TIR: Tasa de retorno interna; B/C: Relación Beneficio-Costo; Payback: Periodo de devolución.

Se observó que las tasas de reciclaje más altas en ambos municipios se encontraron en el plástico. Las eficiencias de reciclaje del 17% en Arbeláez y del 10,8% en Tibasosa fueron determinadas por el modelo M-GRCT. Además, ambos municipios mostraron una cantidad anual similar de residuos reciclables dispuestos en vertederos (407,6 t/año en Arbeláez y 439,3 t/año en Tibasosa). Sin embargo, hubo una diferencia notable en los ingresos totales por servicios de limpieza al comparar los valores en ambos municipios (COP 13.160.986 en Arbeláez y COP 143.886.022 en Tibasosa), como se muestra en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Entradas de flujo de caja y valores de referencia en cada escenario

	Arbeláez	Tibasosa
	(Modelo lineal)	(Modelo circular)
Tasas de reciclaje (%)		
Papel	4,0	10,0
Plástico	17,0	10,8
Cartón	6,0	9,1
Vidrio	5,0	8,7
Metal	3,0	0,8
Metal no férnico	8,0	0,0
Otra información de reciclaje		
Peso de residuos reciclables dispuestos en rellenos sanitarios (t/año)	407,6	439,3
Porcentaje de rechazo en las ECAS	0,2	1,0
Cantidad de recicladores de oficio o informales (# de personas)	6	5
Cantidad de asociaciones de recicladores (# de personas)	0	5
Número de rutas selectivas de recolección de residuos reciclables	1	0
Línea base de servicio de aseo		
Recaudo total en el año base (\$COP)	13.160.986	143.886.022
Distancia desde el centroide hasta el sitio de disposición final (km)	99	28
Número de vehículos recolectores	253	284
Frecuencia de recolección de residuos (# veces/semana)	4	4
Peso anual de residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios (n/año)	948	1116
Estaciones de clasificación y aprovechamiento		
Cuenta con estación de clasificación y aprovechamiento	No	Sí
Estaciones de aprovechamiento (Área < 150 m ²)	0	1
Estaciones de aprovechamiento (151 m ² < Área < 999 m ²)	0	0
Estaciones de aprovechamiento (Área > 1000 m ²)	0	0
Información adicional para las proyecciones de los flujos de caja		
Tasa de cambio peso COP por Euro (COP\$ x 1€)	Valores	
Tasa de inflación	4545,45	
Tasa de interés de oportunidad (TIO)	4,17%	
	10%	

Nota: Las cifras referidas para el año base (2022)

4.4. Discusión

Desde la perspectiva del control ambiental, los cuatro factores evaluados muestran mejoras y beneficios sustanciales con respecto a la gestión de residuos sólidos. En cuanto a la generación de residuos, se observa un comportamiento similar (figura 4.3), teniendo en cuenta que los dos municipios están incluidos en diferentes escenarios, ya que Arbeláez es considerado un medio productor y Tibasosa un gran productor.

En cuanto a los recicladores, si bien la normativa colombiana está orientada a formalizar legalmente a los recicladores con el fin de tener un mayor control de la actividad de reutilización y brindar garantías laborales y económicas, esto no ha llevado a los resultados esperados, y el proceso es muy lento. Por lo tanto, en el modelado, se hace una distinción entre recicladores formalizados y recicladores profesionales. Los resultados muestran que es evidente que los recicladores aumentarán gradualmente con el tiempo para mejorar el uso de los residuos sólidos. Todo ello favorece una actividad económica más sólida que permitirá generar empleo en estos municipios.

El modelo predice una clara reducción en las emisiones de metano. Según la proyección realizada, esta reducción se debe a la disminución de los residuos de cartón y papel que se eliminarían en un relleno sanitario. Con la implantación de técnicas de reciclaje, se incrementará la reutilización de este tipo de residuos en ambos municipios.

El modelo también predice una reducción de la huella de carbono para ambos municipios. Esta reducción incluye las emisiones de metano, la generación de lixiviados y las emisiones producidas por el transporte. Las reducciones inducidas por los efectos de la implantación de técnicas de reciclaje en el transporte se deben a que los residuos sólidos inorgánicos tendrán un emplazamiento de clasificación, y los centros de recogida se ubicarán a no más de 5 km de distancia del centro del casco urbano, por lo que disminuirá la distancia recorrida hasta su disposición final. Por otro lado, con el tiempo, la flota de vehículos se transformará en una con mejor tecnología, lo que ayudará a reducir las emisiones, como se muestra en la figura 4.6.

En cuanto al control financiero, el valor presente neto en todos los casos es positivo. Sin embargo, se observa una diferencia importante al comparar los resultados obtenidos para el municipio de Arbeláez y Tibasosa. En Arbeláez, la implantación del modelo circular de residuos genera un VAN más elevado (VAN = 180.494 euros), es decir, se generan mayores beneficios netos de los esperados a priori.

Sin embargo, en Tibasosa ocurre lo contrario, y el actual sistema de recogida y eliminación de residuos en vertederos sin residuos resulta ser la mejor alternativa desde el punto de vista económico ((VAN = 325.415 euros), que es 2,9 veces superior al VAN del modelo circular en este municipio (109.398 euros)). Este resultado se justifica porque, en este escenario, no se requieren nuevas inversiones, ya que no es necesaria la implementación de una planta de procesamiento y aprovechamiento de residuos, lo que se traduce en una estructura de menores costos.

Además, los ingresos procedentes de la tasa de recogida de residuos y otros ingresos derivados de las transferencias del Fondo Nacional de Participación que Tibasosa percibe del gobierno nacional colombiano es mucho más alto que los registrados en Arbeláez porque el municipio de Tibasosa tiene una población mayor, lo que significa una mayor proporción de abonados al servicio de recogida de residuos.

En cuanto a la viabilidad económica, los resultados muestran que la TIR, tanto en el modelo lineal como en el modelo circular, tiene un comportamiento similar en el municipio de Arbeláez, registrando rendimientos de la inversión del 34,2% y 33,4%, respectivamente, superando ampliamente lo esperado rentabilidad mínima (OR = 10%). Estos resultados infieren la capacidad del modelo circular para generar mayores beneficios, ya que al requerir un mayor nivel de inversión (123.605 euros más que en el modelo lineal), los rendimientos de la inversión siguen siendo muy similares, mostrando una diferencia inferior al 1% entre ellos. En el caso del municipio de Tibasosa, la TIR en el modelo circular es del 26,7%, mostrando un comportamiento similar al del modelo circular en Arbeláez.

Esto demuestra una vez más la viabilidad económica del modelo con la reutilización de residuos. Sin embargo, debido a los mayores requisitos de inversión y estructura de costos, la TIR disminuye en este escenario. La TIR en el modelo lineal es del 77,6%, una cifra que, aunque es significativamente mayor, se explica por la falta de inversión en este escenario. En esta situación, los costes estructurales son notablemente menores en relación con el escenario circular en este municipio. La relación B/C muestra resultados muy similares en los cuatro escenarios analizados, mostrando una ligera diferencia a favor de los modelos circulares en Arbeláez y Tibasosa. Esto demuestra que cada EUR de coste es recuperado por los ingresos derivados de la gestión y uso de residuos, confirmando la viabilidad económica de la implementación de modelos de economía circular en ambos municipios. El valor B/C más alto corresponde al escenario 2, es decir, el modelo de economía circular en el municipio de Arbeláez, en el que $B/C = 0,00054$ EUR.

Por último, en relación con el retorno de la inversión, se observa que los modelos lineales muestran un tiempo más corto (6,7 años en Arbeláez y 2,6 años en Tibasosa). Como se indicó anteriormente, esto se explica, ya que en los escenarios 1 y 3, no se contempla ningún desembolso de inversión, ya que no hay reutilización de residuos.

Por otro lado, en los escenarios 2 y 4, el desembolso de inversión es igual a 55.405 euros y 36.889 euros, respectivamente. Esta inversión se utiliza para la construcción de los centros de acopio de residuos. Por tanto, los plazos de devolución son más largos (8,6 años en Arbeláez y 9,6 años en Arbeláez y 9,6 años en Tibasosa). Estos tiempos de recuperación se consideran dentro de los intervalos de recuperación comunes (Chang y Starcher, 2019).

4.5. Conclusiones

El modelo M-GRCT desarrollado a través de la herramienta informática DATA4 para el estudio del uso de residuos sólidos en escenarios de economía lineal y circular se aplicó a Arbeláez y Tibasosa, dos municipios con economías deprimidas en Colombia. La aplicación del modelo presenta grandes ventajas tanto a nivel ambiental como económico.

Las diferencias asignadas en los criterios de evaluación para cada escenario pueden atribuirse a las variaciones en la capacidad de recaudación de ingresos, dadas las diferentes poblaciones afectadas y las diferencias en la estructura de gastos en cada escenario. Además, los escenarios del modelo lineal no incluyen inversiones, ya que no se va a llevar a cabo la reutilización de residuos. Por otro lado, en los escenarios de economía circular se incluyen los gastos relacionados con la inversión necesaria para construir las infraestructuras de reciclaje de residuos.

Los resultados muestran que tanto los modelos lineales como los circulares de gestión de residuos son económicamente viables. Sin embargo, las condiciones particulares de cada municipio, el sistema tarifario, el número de abonados y las variaciones de los costes y de la inflación en cada municipio afectan a los resultados de la viabilidad económica. Además, la escala de producción de residuos y los volúmenes de residuos valorizables también afectan a los resultados. Todos estos factores se reflejan en los escenarios analizados. En términos de viabilidad económica, el modelo circular presenta mejor resultados en Arbeláez, mientras que, en el municipio de Tibasosa, los mejores resultados se obtienen con un enfoque de economía lineal.

Aunque el modelo M-GRCT fue concebido originalmente con el objetivo de proponer soluciones al problema de la gestión integral de residuos sólidos en municipios con economías deprimidas, es posible utilizarlo en grupos de municipios (en una escala regional), incluso en aquellos casos en los que la adopción del modelo de gestión a nivel municipal no sea económicamente rentable, teniendo en cuenta las condiciones de los escenarios. Este uso del modelo a escala regional debe realizarse en condiciones similares a las del Escenario 1, en términos de distancias a la planta de transformación, porcentajes de rechazo e inversión en maquinaria técnica.

El modelo M-GRCT fue concebido para la correcta gestión y recuperación de residuos sólidos urbanos en economías deprimidas, integrando el proceso de reciclaje en el modelo tradicional de gestión de residuos sólidos urbanos y evaluando los componentes que pueden ser reciclados y reintroducidos en el ciclo productivo. La investigación futura se centrará en el uso de M-GRCT para la gestión de residuos industriales, para lo cual la interfaz DATA-4 debe adaptarse adecuadamente. Por ejemplo, en el caso particular de los residuos industriales en Colombia, la adaptación del modelo debe realizarse de tal manera que se tomen en cuenta los tres esquemas de gestión de residuos industriales que actualmente se consideran en el país (incineración, disposición final en relleno sanitario y reciclaje). Actualmente, en Colombia, solo un porcentaje muy bajo de residuos

industriales puede ser reintroducido en el ciclo de producción a través de un mecanismo conocido como BORSI (Intercambio de Residuos y Subproductos Industriales).

4.6. Referencias

- Ahmed, Z.; Mahmud, S.; Acet, H. Circular economy model for developing countries: Evidence from Bangladesh. *Heliyon*. 2022, 8, 09530.
- Ajwang, S.O.; Abila, J.O.; Tajero-Dakay, I. Adoption conceptual model for intelligent waste management in smart cities: Theoretical review. *Int. J. Comp. Sci. Res.* 2021, 5, 426–440.
- Alexander, A.; Burklin, C.; Singleton, A. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide; *USEPA EPA-600/R05/047; United States Environmental Protection Agency: Washington, DC, USA*, 2005.
- Allevi, E.; Gnudi, A.; Konnov, I.V.; Oggioni, G. Municipal solid waste management in circular economy: A sequential optimization model. *Energy Econ.* 2021, 100, 105383.
- Alqahtani, F.; Al-Makhadmeh, Z.; Tolba, A.; Said, W. Internet of things-based urban waste management system for smart cities using a Cuckoo search algorithm. *Clust. Comput.* 2020, 23, 1769–1780.
- Andrews, D. The circular economy, design thinking and education for sustainability. *Local Econ.* 2015, 30, 305–315.
- Araujo-Morera, J.; Verdejo, R.; López-Manchado, M.A.; Hernández Santana, M. Sustainable mobility: The route of tires through the circular economy model. *Waste Manag.* 2021, 126, 309–322.
- Bocken, N.M.P.; de Pauw, I.; Bakker, C.; van der Grinten, B. Product design and business model strategies for a circular economy. *J. Ind. Prod. Eng.* 2016, 33, 308–320.
- Bongers, A.; Casas, P. The circular economy and the optimal recycling rate: A macroeconomic approach. *Ecol. Econ.* 2022, 199, 107504.
- Calderón Márquez, A.J.; Rutkowski, E.W. Waste management drivers towards a circular economy in the global south—The Colombian case. *Waste Manag.* 2020, 110, 53–65.
- Chang, B.; Starcher, K. Evaluation of wind and solar energy investments in Texas. *Renew. Energy.* 2019, 132, 1348–1359.
- Chen, X. Machine learning approach for a circular economy with waste recycling in smart cities. *Energy Rep.* 2022, 8, 3127–3140.

- D'Adamo, I.; Falcone, P.M.; Huisingsh, D.; Morone, P. A circular economy model based on biomethane: What are the opportunities for the municipality of Rome and beyond? *Renew. Energy*. 2021, 163, 1660–1672.
- Duan, H.; Zhao, Q.; Song, J.; Duan, Z. Identifying opportunities for initiating waste recycling: Experiences of typical developed countries. *J. Clean. Prod.* 2021, 324, 129190.
- Esmailzadeh, S.; Shaghghi, A.; Taghipour, H. Key informants' perspectives on the challenges of municipal solid waste management in Iran: A mixed method study. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2020, 22, 1284–1298.
- Ferronato, N.; Guisbert Lizarazu, E.G.; Valencia Vargas, D.J.; Pasinetti, R.; Torretta, V. Investigation on the solid waste recyclers' perspective in La Paz, Bolivia. *Hábitat Intern.* 2022, 123, 102542.
- Gaspars-Wieloch, H. Project Net Present Value estimation under uncertainty. *Cent. Eur. J. Oper. Res.* 2019, 27, 179–197.
- Geissdoerfer, M.; Savaget, P.; Bocken, N.M.P.; Hultink, E.J. The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *J. Clean. Prod.* 2017, 143, 757–768.
- George, D.A.R.; Lin, B.C.; Chen, Y. A circular economy model of economic growth. *Environ. Model. Softw.* 2015, 73, 60–63.
- Gobierno de la República de Colombia. Bogotá (Colombia). Estrategia Nacional de Economía Circular: *Cierre de Ciclos de Materiales, Innovación Tecnológica, Colaboración y Nuevos Modelos de Negocio*; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo: Bogotá, Colombia. ISBN 978-958-5551-16-9, 2019.
- IPCC AR4 SYR; Core Writing Team; Pachauri, R.K.; Reisinger, A. (Eds.) Climate Change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; *IPCC: Geneva, Switzerland*, ISBN 978-92-9169-122-7, 2007.
- Keca, L.; Keca, N.; Pantic, D. Net Present Value and Internal Rate of Return as indicators for assessment of cost-efficiency of poplar plantations: A Serbian case study. *Int. For. Rev.* 2012, 14, 145–156.
- Kirchherr, J.; Piscicelli, L.; Bour, R.; Kostense-Smit, E.; Muller, J.; Huibrechtse-Truijens, A.; Hekkert, M. Barriers to the Circular Economy: Evidence from the European Union (EU). *Ecol. Econ.* 2018, 150, 265–272.
- Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resour. Conserv. Recycl.* 2017, 127, 221–232.
- Kromoser, B.; Reichenbach, S.; Hellmayr, R.; Myna, R.; Wimmer, R. Circular economy in wood construction—Additive manufacturing of fully recyclable walls made

- from renewables: Proof of concept and preliminary data. *Constr. Build. Mater.* 2022, 34, 128219.
- Kuo, T.; Hsu, N.; Wattimena, R.; Hong, I.; Chao, C.; Herlianto, J. Toward a circular economy: A system dynamic model of recycling framework for aseptic paper packaging waste in Indonesia. *J. Clean. Prod.* 2021, 280, 126901.
- Lin, B.C. Sustainable Growth: A Circular Economy Perspective. *J. Econ. Issues.* 2020, 54, 465–471.
- Liu, J.; Wu, P.; Jiang, Y.; Wang, X. Explore potential barriers of applying circular economy in construction and demolition waste recycling. *J. Clean. Prod.* 2021, 326, 129400.
- Maric, B.; Kamberovic, B.; Radlovacki, V.; Delic, M.; Zubanov, V. Observing the dependence between dynamic indicators of investment profitability-Relative net present value and internal rate of return. *Afr. J. Bus. Manag.* 2011, 5, 10331–10337.
- Mellichamp, D.A. Internal rate of return: Good and bad features, and a new way of interpreting the historic measure. *Comput. Chem. Eng.* 2017, 106, 396–406.
- Moreau, V.; Sahakian, M.; van Griethuysen, P.; Vuille, F. Coming Full Circle: Why Social and Institutional Dimensions Matter for the Circular Economy. *J. Ind. Ecol.* 2017, 21, 497–506.
- Mulder, N.; Albaladejo, M. El Comercio Internacional y la Economía Circular en América Latina y el Caribe; Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL): *Santiago, Chile*. ISSN 1680-872X, 2020.
- Naqvi, S.R.; Prabhakara, H.M.; Brammer, E.A.; Dierkes, W.; Akkerman, R.; Brem, G. A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy. *Resour. Conserv. Recycl.* 2018, 136, 118–129.
- Pan, X.; Wong, C.W.Y.; Li, C. Circular economy practices in the waste electrical and electronic equipment (WEEE) industry: A systematic review and future research agendas. *J. Clean. Prod.* 2022, 365, 132671.
- Pardini, K.; Rodrigues, J.J.; Diallo, O.; Das, A.K.; de Albuquerque, V.H.C.; Kozlov, S.A. A smart waste management solution geared towards citizens. *Sensors* 2020, 20, 2380.
- Piscitelli, G.; Ferazzoli, A.; Prettillo, A.; Cioffi, R.; Parmentola, A.; Travaglini, M. Circular economy models in the industry 4.0 Era: A review of the last decade. *Procedia Manuf.* 2020, 42, 227–234.
- Preisner, M.; Smol, M.; Horttnainen, M.; Deviatkin, I.; Havukainen, J.; Klavins, M.; Ozola-Davidane, R.; Kruopiené, J.; Szatkowska, B.; Appels, L.; et al. Indicators

- for resource recovery monitoring within the circular economy model implementation in the wastewater sector. *J. Environ. Manag.* 2022, 304, 114261.
- Reike, D.; Vermeulen, W.J.V.; Witjes, S. The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resour. Conserv. Recycl.* 2018, 135, 246–264.
- Ribul, M.; Lanot, A.; Pisapia, C.T.; Purnell, P.; McQueen-Mason, S.J.; Baurley, S. Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *J. Clean. Prod.* 2021, 326, 129325.
- Rodrigo-Ilarri, J.; Rodrigo-Clavero, M.E.; Cassiraga, E. BIOLEACH: A New Decision Support Model for the Real-Time Management of Municipal Solid Waste Bioreactor Landfills. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2020, 17, 1675.
- Rodrigo-Ilarri, J.; Vargas-Terranova, C.-A.; Rodrigo-Clavero, M.-E.; Bustos-Castro, P.-A. Advances on the Implementation of Circular Economy Techniques in Rural Areas in Colombia under a Sustainable Development Framework. *Sustainability.* 2021, 13, 3816.
- Salvador, R.; Barros, M.; Freire, F.; Halog, A.; Piekarski, C.; De Francisco, A. Circular economy strategies on business modelling: Identifying the greatest influences. *J. Clean. Prod.* 2021, 299, 126918.
- Taghipour, A.; Akkatham, W.; Eaknarajindawat, N.; Stefanakis, A.I. The impact of government policies and steel recycling companies' performance on sustainable management in a circular economy. *Resour. Policy.* 2022, 77, 102663.
- Taleb, M.A.; Farooque, O.A. Towards a circular economy for sustainable development: An application of full cost accounting to municipal waste recyclables. *J. Clean. Prod.* 2021, 280, 124047.
- Tisserant, A.; Pauliuk, S.; Merciai, S.; Schmidt, J.; Fry, J.; Wood, R.; Tukker, A. Solid waste and the circular economy: A global analysis of waste treatment and waste footprints. *J. Ind. Ecol.* 2017, 3, 628–640.
- Valizadeh, S.; Hakimian, H. Evaluation of waste management options using rapid impact assessment matrix and Iranian Leopold matrix in Birjand. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2019, 16, 3337–3354.
- Vargas-Terranova, C.A.; Rodrigo-Ilarri, J.; Rodrigo-Clavero, M.E.; Rozo-Arango, M.A. M-GRCT: A Dynamic Circular Economy Model for the Optimal Design of Waste Management Systems in Low-Income Municipalities. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2022, 19, 2681.

- Wang, Q.; Liu, M.; Tang, Y.; Yuan, X.; Ma, Q. Evaluation and advancement of the integrated circular economy model of farming and stock raising. *Chin. J. Popul. Resour. Environ.* 2020, 18, 350–360.
- Zapata-Bravo, A.; Vieira-Escobar, V.; Zapata-Domínguez, A.; Rodríguez-Ramírez, A. The Circular Economy of PET bottles in Colombia. *Cuad. De Adm.* 2021, 37.
- Zizlavsky, O. Net present value approach: Method for economic assessment of innovation projects. In Proceedings of the 19th International Scientific Conference Economics and Management, *Riga, Latvia*, 2014, 23–25; Volume 156, pp. 506–512.

5. Conclusiones y líneas de futura investigación

Tras el desarrollo de la investigación realizada en la presente tesis doctoral se han cubierto los objetivos marcados. En este sentido, podemos concluir los siguientes aspectos:

- La principal aportación de la tesis es la concepción, implementación y puesta en funcionamiento del modelo M-GRCT, el cual tiene por objeto promover mejores prácticas ambientales de gestión de residuos sólidos aprovechables en contextos municipales desfavorecidos (municipalidades de economía deprimida).
- M-GRCT es un importante instrumento técnico que brinda soporte a la gestión de residuos municipales con un enfoque de promoción de la economía circular. El modelo está soportado en una herramienta ofimática dinámica que se ha programado para calcular variables de dos grandes módulos en escenarios predefinidos de simulación, con el objetivo de evaluar su eficiencia comparando el modelo tradicional de gestión de residuos reciclables (lineal) y el promocionado (circular).
- El modelo desarrollado surge como una propuesta de apoyo a sectores sociales marginados, tomando como caso de estudio un país latinoamericano (Colombia). En estos contextos socioambientales, aún se hace evidente la carencia de apoyo institucional público o privado conducentes a mitigar los impactos asociados a las malas prácticas de gestión de residuos, a pesar del marco normativo local e internacional que supone evidencias de un proceso de gestión de los mismos.

- Para el caso de Colombia es claro que, en las administraciones locales de municipios de economía deprimida, son prioritarios los aspectos de saneamiento. Desafortunadamente ante la carencia en la prestación de servicios públicos (abastecimiento de agua potable, existencia de alcantarillados, especialmente); la gestión de residuos sólidos sigue considerándose en un segundo plano de priorización.
- Las diversas formas de producción y consumo permiten seguir reconociendo importantes cantidades de residuos aprovechables, aun cuando los niveles de empleabilidad o fuentes de ingreso de las personas no sean las mejores. Para el caso particular de los residuos aprovechables no orgánicos con los que se articuló el modelo M-GRCT, es importante reconocer que se convierten en fuentes precisamente de ingresos para muchas personas, lo que redundaría en la importancia de los recicladores de oficio, los canales de compra y venta de los mismos que hace evidente un esquema circular que debe ser prioritario y soportado continuamente por la investigación.
- Los resultados alcanzados con la investigación lograda al concebir, articular y poner en funcionamiento en fase experimental el modelo, permiten identificar contrastes importantes de eficiencia económica y ambiental entre el modelo lineal de manejo de residuos (aún muy evidente en los municipios experimentales) y el modelo circular que promueva la utilidad de residuos sólidos aprovechables. En varias ocasiones fue necesario realizar un análisis costo-beneficio que concluyera en la viabilidad de uno u otro escenario, reconociendo volúmenes de generación, actores involucrados en el proceso, proyección de costos y reducción de huellas de carbono.
- Acciones encaminadas a lograr una efectiva gestión de residuos, exponen aún espacios donde la investigación puede seguir aportando a las decisiones de carácter político y económico. Aparentemente el umbral de conocimiento y de aplicación de técnicas para atender el tema residuos ha sido suficiente, pero la realidad muestra lo contrario. M-GRCT se constituye en uno de esos escenarios investigativos que busca aportaciones con potencialidad de aplicación.

Tras la conclusión de la tesis doctoral, y como líneas de futura investigación, se plantea la realización de las siguientes mejoras en el modelo:

- La interfaz gráfica de apoyo (Data4) puede ser actualizada periódicamente con nuevas versiones y/o versiones alternas de softwares para mejor la exposición de resultados del modelo y con ello fortalecer la toma de decisiones en el contexto en el que se aplique.
- El modelo puede ser enriquecido con otras variables para la gestión de residuos aprovechables, pero esto puede llegar a significar el desarrollo de spin offs, que

sugieren configuraciones informáticas/re-programación constante de las hojas macro base. De forma especial variables ambientales que le den más robustez como es el caso de afinidad con cumplimiento de ODS.

- Un proceso de calibración del modelo hace parte del proceso inmediato de continuidad de la investigación. Muchas de las variables consideradas inicialmente, son piezas claves en la formulación de métricas. Actividades en paralelo de sistematización de la captura de información, acompañamiento a las actividades de recolección selectivas y otros desarrollos, se consideran también para un proceso paralelo de validación de los modelos.
- Es inminente seguir trabajando con el modelo en una versión de integración municipal dadas las circunstancias de municipios desfavorecidos en el contexto colombiano. Algunos resultados preliminares dejan entrever mejores resultados en contexto de regionalización.
- La investigación contará con una revisión permanente de aspectos que son condicionantes de su eficiencia. Entre otros se identifican: análisis de sensibilidad a los procesos de selección de municipios objeto de aplicación; flujos de caja más robustos; contaste económico entre la implementación del modelo y las implicaciones de ejecución para empresarios y administraciones municipales; valoración financiera más fuerte de los beneficios ambientales y fortalecimiento en la dignificación de la actividad de recuperadores de oficio.
- El modelo debe iniciar un proceso de evaluación inicialmente simulada, en otros contextos mundiales, que permitan seguir consiguiendo mayor significancia del mismo. En paralelo puede llegar a ser importante una configuración del modelo que incluya aprovechamiento de residuos orgánicos.

6. Contribuciones científicas

Artículos publicados en revistas indexadas JCR

Rodrigo-Ilarri, J.; Vargas-Terranova, C.-A.; Rodrigo-Clavero, M.-E.; Bustos-Castro, P.-A. Advances on the Implementation of Circular Economy Techniques in Rural Areas in Colombia under a Sustainable Development Framework. *Sustainability* **2021**, *13*, 3816. <https://doi.org/10.3390/su13073816>.

Vargas-Terranova, C.-A.; Rodrigo-Ilarri, J.; Rodrigo-Clavero, M.-E.; Rozo-Arango, M.-A. M-GRCT: A Dynamic Circular Economy Model for the Optimal Design of Waste Management Systems in Low-Income Municipalities. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022**, *19*, 2681. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052681>.

Vargas-Terranova, C.-A.; Rodrigo-Ilarri, J.; Rodrigo-Clavero, M.-E.; Parra-Saad, A. Implementing Circular Economy Techniques for the Optimal Management of Recyclable Solid Waste Using the M-GRCT Decision Support Model. *Appl. Sci.* **2022**, *12*, 8072. <https://doi.org/10.3390/app12168072>.

Contribuciones en congresos internacionales

C. A. Vargas-Terranova, J. Rodrigo-Ilarri, P. A. Bustos-Castro “Experiencias en gestión de residuos aprovechables para la promoción de modelos de economía circular en los municipios de Tabio y Sibate-Colombia”, en *63º Congreso Internacional del Agua, Saneamiento, Ambiente y Energía Renovables*, Cartagena-Colombia, 2021.

C. A. Vargas-Terranova, J. Rodrigo-Ilarri “Improving The Municipal Solid Waste Management Plan Of The Municipality Of Nemocón (Colombia)”, en *European Geosciences Union. General Assembly (EGU) 2020*, Viena-Austri, 2020.

C. A. Vargas-Terranova, J. Rodrigo-Ilarri, M. E. Rodrigo-Clavero, P. A. Bustos-Castro “Proposal of a circular model for the management of usable waste in low-income municipalities in Colombia”, en *European Geosciences Union. General Assembly (EGU) 2021*, Viena-Austria, 2021.

Propiedad intelectual (copyright)

J. Rodrigo-Ilarri, C. Vargas-Terranova, M. E. Rodrigo-Clavero, “MGRCT: Modelo para la evaluación de sistemas de gestión de residuos sólidos reciclables”, código de referencia S-140-2022, Universitat Politècnica de València, 2022.