

Simulación dinámico-sistémica aplicada al análisis de escenarios para la operación sostenible de  
un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos

Eder Mauricio Acelas Gómez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Industrial

Director

Javier Eduardo Arias Osorio

Magíster en Administración

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2024

**Dedicatoria**

*A Dios, quien ha cuidado mis pasos y mostrado el camino con infinito amor*

*A San Juan Eudes, en el ejercicio de mi espiritualidad*

### **Agradecimientos**

A mi mamá, Elena, a mi papá, Marcos, y a mi hermana, Angie, pues todo el soporte que he recibido de ellos permite que logre lo que he logrado, entre ello, finalizar este trabajo.

A Paola, Jeniffer y Gabriela, por su motivación y valiosa contribución a la estructuración y revisión de lo que aquí escrito.

Al Profesor Ferney, por su valiosa orientación en la elaboración de la revisión de la literatura.

A Libia Santos, por la generosidad de compartir su experiencia en temas de sostenibilidad y en el sector público.

A mi director, el profesor Javier, por la generosidad de acompañarme en la elaboración de esta tesis, por su infinita paciencia en mi proceso de formación y por los conocimientos compartidos.

A todos aquellos con mentalidad de cambio y de construcción de oportunidades, pues he sido beneficiario de esas ideas ejecutadas.

**Tabla de Contenido**

Introducción .....	14
1. Planteamiento del problema.....	17
2. Justificación .....	20
3. Objetivos .....	22
3.1. Objetivo general.....	22
3.2. Objetivos específicos .....	22
4. Marco teórico .....	23
4.1. Simulación dinámico-sistémica .....	23
4.1.1. Alternativa de modelado .....	23
4.1.2. Marco de la dinámica de sistemas .....	24
4.1.3. Herramientas para la simulación.....	27
4.2. Sostenibilidad.....	32
4.2.1. Ciencia de la sostenibilidad .....	32
4.2.2. Enfoque de desarrollo .....	33
4.2.3. Diseño para la sostenibilidad .....	34

4.3. Gestión de residuos sólidos urbanos .....	36
4.3.1. Manejo de los RSU .....	37
4.3.1.1. Generación. ....	37
4.3.1.2. Recolección, transporte y logística. ....	38
4.3.2. Disposición final de los RSU .....	38
4.3.2.1. Relleno Sanitario.....	39
4.3.2.2. Incineración.....	40
4.3.2.3. Reciclaje.....	40
4.3.2.4. Compostaje. ....	41
4.3.3. Causas de una deficiente GRSU .....	41
4.3.4. Consecuencia de una deficiente GRSU .....	43
4.3.5. Mejorar la GRSU .....	44
4.3.6. Condicionantes para la sostenibilidad.....	47
4.3.7. Contexto territorial.....	48
4.3.7.1. Servicio público de aseo .....	49
4.3.7.2. Gestión integral de residuos sólidos. ....	49

4.3.7.3. Actores.....	50
4.3.7.4. Entes competentes.....	52
4.3.7.5. Política pública.....	53
4.4. Gestión de la cadena de suministro.....	54
4.4.1. Definición.....	54
4.4.1.1. GCS sostenible.....	56
4.4.1.2. GCS inversa.....	56
4.4.2. Diseño de la cadena de suministro.....	58
4.4.3. Mejoramiento del desempeño de la cadena de suministro.....	60
5. Metodología.....	62
6. Revisión de la literatura.....	64
7. Conceptualización de un SGRSU.....	70
8. Modelo dinámico-sistémico.....	76
8.1. Generación de residuos.....	78
8.2. Capacidad requerida del relleno sanitario.....	81
8.3. Tasa de separación en la fuente.....	83

9. Evaluación de escenarios .....	88
10. Conclusiones .....	92
11. Artículo publicable.....	94
12. Recomendaciones .....	94
Referencias bibliográficas.....	96

**Lista de Tablas**

Tabla 1. <i>Tabla de cumplimiento de objetivos</i> .....	16
Tabla 2. <i>Relación de las variables del diagrama de influencias con los demás sistemas</i> .....	73
Tabla 3. <i>Sustento de las variables empleadas en el diagrama de influencias</i> .....	74
Tabla 4. <i>Explicación del diagrama de influencias</i> .....	75
Tabla 5. <i>Escenario de participación nula</i> .....	88
Tabla 6. <i>Escenarios de participación individual</i> .....	89
Tabla 7. <i>Escenarios de participación conjunta</i> .....	90
Tabla 8. <i>Análisis de sensibilidad al mejor escenario con la variable % Cobertura recicladores</i> .....	91
Tabla 9. <i>Análisis de sensibilidad al mejor escenario con la variable Tasa de generación</i> .....	92

**Lista de Figuras**

Figura 1. <i>Ciclo básico de realimentación</i> .....	28
Figura 2. <i>Influencia entre variables</i> .....	28
Figura 3. <i>Tipos de ciclos de realimentación</i> .....	29
Figura 4. <i>Ejemplo de diagrama de flujo-nivel</i> .....	30
Figura 5. <i>Alternativas para incorporar los residuos a la cadena de suministro</i> .....	58
Figura 6. <i>Clasificación de la cadena de suministro ideal</i> .....	59
Figura 7. <i>Metodología implementada</i> .....	63
Figura 8. <i>Síntesis de la revisión de la literatura</i> .....	69
Figura 9. <i>Limitación del fenómeno al problema de interés</i> .....	71
Figura 10. <i>Diagrama de influencias para el fenómeno de la GRSU</i> .....	72
Figura 11. <i>Modelo dinámico-sistémico del problema de interés</i> .....	77
Figura 12. <i>Diagrama de flujo-nivel para la generación de residuos</i> .....	79
Figura 13. <i>Validación de la variable generación de residuos</i> .....	80
Figura 14. <i>Validación variable población</i> .....	80
Figura 15. <i>Diagrama de flujo-nivel para el SGRSU</i> .....	81
Figura 16. <i>Comportamiento cualitativo de las variables asociadas a la capacidad requerida del relleno sanitario</i> .....	83
Figura 17. <i>Diagrama de flujo-nivel para la tasa de separación en la fuente</i> .....	84

Figura 18. <i>Función de la tasa de separación en la fuente</i> .....	85
Figura 19. <i>Derivada de la función tasa de separación en la fuente</i> .....	86
Figura 20. <i>Comportamiento cualitativo de las variables asociadas a la tasa de separación en la fuente</i> .....	87

### **Lista de Apéndices**

Los apéndices están adjuntos y pueden ser visualizados en la base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice A. Análisis bibliométrico

Apéndice B. Detalle de la revisión de la literatura

Apéndice C. Ecuaciones del modelo

Apéndice D. Artículo de carácter publicable

## Resumen

**Título:** Simulación dinámico-sistémica aplicada al análisis de escenarios para la operación sostenible de un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos \*

**Autor:** Eder Mauricio Acelas Gómez \*\*

**Palabras Clave:** Dinámica de sistemas, simulación, sostenibilidad, residuos, gestión de residuos sólidos, gestión de residuos sólidos urbanos

**Descripción:** La operación insostenible de un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos (SGRSU) se origina en factores como el bajo compromiso ciudadano, la baja voluntad política y el erróneo diseño del sistema; todo ello permeado por una predominante comprensión reduccionista sobre el fenómeno. En un escenario así, surge la pregunta de cómo debería intervenir un SGRSU para operar sosteniblemente. Para dar respuesta a ello, se empleó la metodología de dinámica de sistemas para modelar y simular el fenómeno, aprovechando que esta permite reconocer la complejidad dinámica subyacente y que contribuye al mejoramiento de los modelos mentales de los individuos para fomentar su actuar en formas que maximicen los objetivos del sistema por sobre los suyos propios. El modelo se construyó haciendo referencia al contexto local colombiano, y a partir de la simulación se concluyó que la mejor manera de intervenir el problema es a través del máximo compromiso político y ciudadano, orientados a reducir la tasa de generación de residuos por habitante por año, pues se encontró que una reducción en la tasa de 500 gramos (1.39 gramos al día) lograría una disminución de 6.950 toneladas de la capacidad requerida. Esto no implica que se desmeriten las estrategias que buscan el aumento de la tasa de separación en la fuente, pues en el modelo esta no es viable por la relación de competencia modelada entre los recicladores y las personas prestadoras del servicio público de aseo dado el incentivo económico en disputa. Razón por la cual, y dado el alto componente social asociado al sistema, se recomienda solucionar primero el conflicto entre ambos actores para formular estrategias que aprovechen las sinergias de ambos, pues de una parte se garantizaría un aumento en la tasa de separación en la fuente, y con la otra, la total recolección de los residuos.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fiscomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Ingeniería Industrial. Director: Javier Eduardo Arias Osorio. Magíster en administración.

### Abstract

**Title:** Dynamic-systemic simulation applied to scenario analysis for the sustainable operation of an urban solid waste management system\*

**Author:** Eder Mauricio Acelas Gómez\*\*

**Key Words:** System dynamics, simulation, sustainability, waste, solid waste management, urban solid waste management

**Description:** The unsustainable operation of an urban solid waste management system (USWMS) originates from factors such as low citizen commitment, low political will and the erroneous design of the system; all of this permeated by a predominant reductionist understanding of the phenomenon. In such a scenario, the question arises of how an USWMS should intervene to operate sustainably. To respond to this, the system dynamics methodology was used to model and simulate the phenomenon, taking advantage of the fact that it allows recognition of the underlying dynamic complexity and that contributes to the improvement of the mental models of individuals to encourage their actions in ways that maximize the system's objectives over their own. The model was built with reference to the local Colombian context, and from the simulation it was concluded that the best way to intervene in the problem is through maximum political and citizen commitment, aimed at reducing the rate of waste generation per inhabitant per year. It was found that a reduction in the rate of 500 grams (1.39 grams per day) would achieve a decrease of 6,950 tons of the required capacity. This does not imply that the strategies that seek to increase the separation rate at the source are detracted, since in the model this is not viable due to the competitive relationship modeled between the recyclers and the people providing the public cleaning service given the incentive economic dispute. For this reason, and given the high social component associated with the system, it is recommended to first resolve the conflict between both actors to formulate strategies that take advantage of the synergies of both, since on the one hand an increase in the separation rate at the source would be guaranteed, and with the other, the total collection of waste.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies. Industrial engineering. Director: Javier Eduardo Arias Osorio. Master in Administration

## Introducción

La operación insostenible de los sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos (SGRSU) es uno de los problemas más inmediatos que enfrentan los gobiernos de economías en desarrollo (Sukholthaman & Sharp, 2016; Breukelman et al., 2019) pues ello contribuye al deterioro de la salud pública, la desigualdad económica, la injusticia ambiental, la desigualdad en la prestación del servicio de aseo (Ma & Hipel, 2016) y la degradación del atractivo de los territorios (Breukelman et al., 2019). Al analizar el fenómeno, es posible señalar como causas al bajo compromiso ciudadano, la baja voluntad política y el erróneo diseño del sistema, permeado todo ello por una predominante comprensión reduccionista sobre este, aspectos que naturalmente llevan a preguntarse cómo debería intervenir un SGRSU para operar sosteniblemente.

Para dar respuesta a tal pregunta, este trabajo adopta la metodología de dinámica de sistemas para representar el fenómeno en el contexto local colombiano, así como lo hicieron los autores de los trabajos consultados en la revisión de la literatura, en donde cada uno reflejó las dinámicas propias de su entorno. Las ventajas de emplear esta metodología son el reconocer y plasmar la complejidad dinámica que presenta el fenómeno (Chang et al., 2011; Breukelman et al., 2019; Sancheta et al., 2021) y su pertinencia para contribuir al mejoramiento de la comprensión que sobre el mismo se tiene, aspecto positivo si lo que se busca es influir en las decisiones de los clientes del modelo para que actúen en formas que beneficien a los objetivos del sistema por sobre los suyos propios (Sterman, 2000).

En razón a lo anterior, el desarrollo del trabajo inicia con la formulación del planteamiento del problema, su justificación y objetivos. Posteriormente, se presenta un marco teórico sobre los

temas de simulación dinámico-sistémica, sostenibilidad, gestión de residuos sólidos urbanos y gestión de la cadena de suministro, los cuales sientan las bases del ejercicio de análisis realizado. Luego, para definir la metodología a emplear se combinó la de dinámica de sistemas con la de la investigación, para de este modo incorporar la revisión de la literatura y emplearla para dar forma al modelo conceptual sobre el fenómeno. A partir de este, se procedió a formular el modelo dinámico-sistémico que finalmente permitió el análisis de escenarios y realizar conclusiones sobre la investigación. Asimismo, se presentan recomendaciones para futuros trabajos en esta línea, y las referencias bibliográficas.

**Tabla 1.***Tabla de cumplimiento de objetivos*

Objetivos específicos	Capítulo relacionado
Identificar aplicaciones de simulación dinámico-sistémica en la gestión de residuos sólidos urbanos a partir de una revisión de la literatura científica	Capítulo 6. Revisión de la literatura
Conceptualizar un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos a partir de la información recopilada	Capítulo 7. Conceptualización de un SGRSU
Formular el correspondiente modelo de simulación en el software Vensim	Capítulo 8. Modelo dinámico-sistémico
Evaluar escenarios de operación sostenible a partir del análisis de medidas de desempeño	Capítulo 9. Evaluación de escenarios
Elaborar un artículo de carácter publicable en el que se plasmen los resultados del trabajo investigativo realizado	Capítulo 11. Artículo publicable

## 1. Planteamiento del problema

La operación insostenible de un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos (SGRSU) se origina en factores como el bajo compromiso ciudadano, la baja voluntad política y el erróneo diseño del sistema; todo ello permeado por una predominante comprensión reduccionista sobre el fenómeno. Las repercusiones de tales deficiencias se manifiestan en el deterioro de la salud pública, la desigualdad económica, la injusticia ambiental, la desigualdad en la prestación del servicio de aseo (Ma & Hipel, 2016) y la degradación del atractivo de los territorios (Breukelman et al., 2019). En un escenario así, surge la pregunta de cómo debería intervenir un SGRSU para operar sosteniblemente.

A nivel de América Latina y el Caribe (ALC), la insostenibilidad de los SGRSU se evidencia, de acuerdo con la Cepal (2020), (i) en la insuficiente infraestructura para la disposición final de desechos, (ii) la existencia de numerosos botaderos ilegales y abandonados, así como de rellenos sanitarios que se utilizan por encima de su capacidad, y (iii) en que un 7% de la población en las ciudades vive en zonas sin acceso al servicio de recolección (Cepal, 2020), agravado todo esto por (iv) la alta velocidad a la que se generan los residuos (Cepal, 2021). Adicionalmente, (v) se evidencia en que los mercados nacionales de reciclaje se encuentran permeados de gran informalidad y se centran únicamente en el aprovechamiento de papel, cartón, chatarra, algunos plásticos y vidrio, dejando de lado el aprovechamiento de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y orgánicos (Cepal, 2021); siendo estas muestras que constatan que en la región han predominado y aún predominan las iniciativas tradicionales, deficientes e insostenibles de gestión de residuos (Cepal, 2020).

Para el caso colombiano, existe una pobre coordinación interinstitucional para la elaboración de proyectos en el sector de los residuos, aunado a la baja implementación de los planes de gestión territoriales y a la escasa regulación sobre el manejo de residuos orgánicos, los cuales representan el 61% de los residuos generados en el país (Gobierno de la república de Colombia, 2019). Asimismo, se cuenta con una baja tasa de reciclaje de 8.6% (Gobierno de la república de Colombia, 2019) y de acuerdo con la SSPD\* (2021) en 2021 se contaban 15 sitios de disposición final con vida útil vencida y 29 con vida útil entre 0 y 3 años.

A nivel de Santander, la situación problema bien se refleja en los acontecimientos alrededor del relleno sanitario El Carrasco. En primer lugar, este sitio hace parte de la estadística nacional de sitios con vida útil vencida desde 2011, año en el cual el Tribunal Administrativo de Santander decretó su cierre definitivo como solución a la acción popular radicada en 2002 debido a la vulneración de derechos colectivos y del medio ambiente (Hernández, D., 2021). En segundo lugar, como afirma Hernández (2021), alrededor de El Carrasco no existe una solución jurídica por resolver, sino una solución administrativa por formular; pues en lo jurídico, luego de diferentes audiencias de verificación, se exhortó en 2013 a la búsqueda de alternativas para cumplir con el cierre y en 2019 se determinó que los residuos que ingresarían al relleno tendrían el único objetivo de estabilizar el sitio para una adecuada clausura técnica, la cual se verificó como lograda por el

---

\* Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios

juez encargado el 11 de agosto de 2021, decretándose así el cierre definitivo a partir del 13 de agosto del mismo año.

En tercer lugar, como era de esperarse, el cierre del relleno ocasionó la interrupción en la normal recolección de los residuos, y con ello la acumulación de estos en las calles y el aumento del descontento social, haciéndose evidentes problemas subyacentes asociados a la baja cultura ciudadana y a la baja capacidad de respuesta de los gobernantes, además de la aversión de comunidades y mandatarios aledaños para recibir residuos ajenos y los altos costos de transporte a los que el sistema hace frente. Finalmente, la solución al problema ocasionado por el cierre recayó nuevamente en lo jurídico a través de la declaración de calamidad pública, misma que permitió a 7 municipios seguir haciendo uso de El Carrasco pese a no contar con licencia ambiental (Semana, 2022).

Ahora bien, para la Cepal (2020) si en ALC se consolidara el sector residuos para alcanzar tasas de reciclaje como las de Alemania, se generarían 450.000 empleos estables y un aumento en el PIB del 0.35%. De hecho, dicha consolidación sería útil para que Colombia alcance una tasa de reciclaje y nueva utilización de residuos sólidos del 17.9% para el año 2030, tal y como se estableció en la estrategia para la implementación de los ODS (Gobierno de la república de Colombia, 2019). Para ello, la Cepal (2020) expone como necesario el adoptar una visión holística de la GRSU que se oriente a desarrollar las conexiones necesarias dentro del sector de residuos con el fin de garantizar (i) el flujo de recursos y energía, (ii) la creación de valor y (iii) la reducción al mínimo de la generación de residuos y consumo de materiales, lo cual equivale a adoptar un marco de economía circular.

No obstante, de mantenerse la situación actual el sistema urbano en su conjunto se vería gravemente alterado y, en el peor de los escenarios, podría sucumbir en la decadencia humana puesto que nuestra prosperidad “se basa en el uso racional del espacio finito y los recursos disponibles para toda la vida en la Tierra, así como en el restablecimiento de sus procesos sustentadores de la vida y la capacidad de absorber los residuos humanos" (UNEP<sup>†</sup>, 2021, p. 17); o, en palabras de Pineda (1998), la supervivencia se basa en la capacidad del hombre para encontrar soluciones que reduzcan al mínimo sus efectos negativos sobre la naturaleza.

En razón a lo anterior, en este trabajo académico-investigativo se elabora un modelo de simulación dinámico-sistémico que (i) contribuye a la comprensión sistémica del fenómeno, contrarrestando así la predominante comprensión reduccionista, y (ii) que siendo usado como recurso experimental permita dar respuesta a la pregunta de cómo debería intervenir un SGRSU para operar sosteniblemente.

## **2. Justificación**

En línea con el planteamiento del problema esbozado antes, la investigación planteada contribuye a mejorar la comprensión del fenómeno de la GRSU en el contexto local y a ampliar la base de conocimiento sobre las estrategias de intervención que permitirían mejorar la operación del sistema bajo una perspectiva de sostenibilidad.

---

<sup>†</sup> Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

Asimismo, el modelo construido presenta una alternativa para cuantificar el impacto de aspectos sociales o cualitativos, así como para enfrentar la falta de datos, lo que puede ser de utilidad para posteriores abordajes del fenómeno desde el campo investigativo o como herramienta de gestión urbana.

Finalmente, a nivel disciplinar el adoptar la metodología de dinámica de sistemas contribuye a visibilizar las ventajas que tiene su uso para abordar problemas complejos de manera sistémica y generar insumos para una intervención consciente que contribuya al mejoramiento. Además, se reafirma el rol del ingeniero industrial en el sector público en donde a través del diseño, simulación y mejoramiento de sistemas productores de bienes y servicios, es posible contribuir a la competitividad regional y a la distribución de valor en la sociedad.

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo general**

Evaluar escenarios para la operación sostenible de un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos a partir del desarrollo de un modelo de simulación dinámico-sistémico.

#### **3.2. Objetivos específicos**

1. Identificar aplicaciones de simulación dinámico-sistémica en la gestión de residuos sólidos urbanos a partir de una revisión de la literatura científica.

2. Conceptualizar un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos a partir de la información recopilada.

3. Formular el correspondiente modelo de simulación en el software Vensim.

4. Evaluar escenarios de operación sostenible a partir del análisis de medidas de desempeño.

5. Elaborar un artículo de carácter publicable en el que se plasmen los resultados del trabajo investigativo realizado.

## 4. Marco teórico

### 4.1. Simulación dinámico-sistémica

#### 4.1.1. *Alternativa de modelado*

De acuerdo con Sterman (1988), un **modelo** es una representación simplificada de la realidad que permite un mejor entendimiento de esta, de manera que el **modelado** es la re-representación de tal realidad, o, de acuerdo con Andrade (2001), es el hacer explícito los modelos mentales en modelos formales.

El modelado es necesario, en primer lugar, para mejorar la interacción y comprensión de un fenómeno (Andrade, 2001), y facilitar el entendimiento con otras personas (Sterman, 1988), sin olvidar que cualquier modelo es solo tan bueno como sus supuestos (Sterman, 1988). En segundo lugar, porque si bien los modelos mentales son empleados por las personas para interpretar sus experiencias, evaluar las situaciones y elegir cursos de acción (Sterman 1988), estos frecuentemente carecen de racionalidad en los objetivos, las alternativas de intervención y las consecuencias que de ellas se derivan, pues el modelo estaría determinado por la disponibilidad de tiempo e información del propio individuo (Sterman, 1988).

Precisamente, es en razón a lo anterior que resulta de gran utilidad el empleo de los ordenadores digitales para el modelado (modelado computacional), pues a través de ellos se calculan las consecuencias lógicas que resultan de la interrelación de varios factores al mismo tiempo (Sterman, 1988), aspecto oportuno para modelos de optimización y de simulación (Sterman, 1988). De estas dos alternativas, Sterman (1988) explica que los **modelos de optimización** son de carácter prescriptivo, es decir, declaran la mejor manera posible de cumplir un objetivo determinado a través de la selección de alternativas; mientras que los **modelos de**

**simulación** son de carácter descriptivo, es decir, replican el sistema real en micro mundos o mundos virtuales a través de los cuales se estudia el comportamiento del sistema y se realizan experimentos que de otro modo no serían posibles, bien sea por temas éticos o económicos (Sterman, 1988).

#### ***4.1.2. Marco de la dinámica de sistemas***

Puntualmente, es posible definir la **dinámica de sistemas** (DS) como una metodología para el modelado y simulación de fenómenos a través de la representación del sistema de fuerzas (o variables) que lo generan y mantienen en el tiempo (Albin, 1997), esto con el fin de generar insumos para el aprendizaje o la intervención de dicho fenómeno (Andrade et al., 2001). Su origen se atribuye a Jay Forrester en el MIT a finales de 1950, y su difusión se dio gracias a importantes publicaciones como “Industrial Dynamics” en 1961, “Urban Dynamics” en 1969 y “The Limits to Growth” en 1972.

Adicionalmente, la DS obtiene una importante fundamentación de áreas del saber como la sistémica, la teoría general de sistemas y el pensamiento sistémico, de donde reafirma que un sistema es aquella entidad cuya existencia y funciones se mantienen como un todo por la interacción de sus partes (O’Connor & McDermott, 1998). Justamente, tal fundamentación hace que la DS tenga una **orientación estructuralista** que demanda una mirada profunda sobre el fenómeno o situación problema que se quiere representar, a fin de identificar el sistema de fuerzas que lo generan y mantienen. Este sistema de fuerzas hace referencia a la *estructura causal del fenómeno* y se caracteriza por formar cadenas circulares que enlazan causas que a la vez son efectos y efectos que a la vez son causas, o, en un sentido más amplio, son cadenas que enlazan influencias (Andrade et al., 2001).

Asimismo, el centrarse en estructuras causales posibilita señalar que, si el modelo refleja un comportamiento similar al observado en el sistema real, la estructura causal planteada es una explicación válida del fenómeno (Andrade et al., 2001). Lo anterior se alinea con la premisa de que a estructuras causales semejantes le corresponden comportamientos semejantes (Andrade et al., 2001) y de que en el modelado dinámico-sistémico prima la semejanza cualitativa entre el comportamiento generado y el observado por sobre la exactitud cuantitativa (Andrade et al., 2001); de ahí que sea útil para el modelado de nuevos fenómenos de los que no existen aún datos numéricos.

Adicionalmente, la orientación estructuralista permite afianzar la noción de *analogía estructural*, propuesta de la Teoría General de Sistemas que aboga por la transferencia de principios de un campo de estudio a otro (Andrade et al., 2001), posibilitando el necesario enfoque interdisciplinar para el modelado (Sterman, 1988).

Ahora bien, sumado a la orientación estructuralista, la DS permite abordar características importantes de los fenómenos como la complejidad dinámica y el comportamiento contraintuitivo. La **complejidad dinámica** hace alusión a que el interés recae en los patrones que forman las relaciones entre variables a lo largo del tiempo, lo que difiere de la complejidad de detalle al enfocarse esta en la cantidad de variables relacionadas. De acuerdo con Sterman (2000), la complejidad dinámica surge, en primer lugar, por la presencia de *eventos que ocurren a diferentes escalas de tiempo*, lo que implica que se superponen entre sí, son irreversibles o presentan diferencias significativas entre el hacer y el deshacer. En segundo lugar, por la *acción de las demoras*, un elemento omnipresente en el mundo real que hace que las causas y los efectos sean distantes en el tiempo y en el espacio, y que sigan relaciones no lineales (Sterman, 2000).

Complementariamente, el **comportamiento contraintuitivo** hace referencia al hecho de que la dinámica de un sistema surge espontáneamente de su estructura interna y de las realimentaciones entre los agentes y los elementos que lo componen (Sterman, 2000). En este sentido, se presenta al *factor humano* como un agente causante de perturbaciones y participe en sus efectos (Andrade et al., 2001), pues este ejecuta acciones para lograr sus propios objetivos, que en ocasiones difieren de los objetivos del sistema (Sterman, 2000). Asimismo, la *acción de las demoras* desafía las expectativas intuitivas que se forman sobre el fenómeno, de ahí que, por ejemplo, sea conocido que las políticas de alto apalancamiento no sean obvias y que empeoren la situación antes de evidenciarse una mejoría, contrario a las políticas de bajo apalancamiento (Sterman, 2000).

Ahora bien, aunque la función primaria del modelado es educacional -ya que permite mejorar el juicio y la intuición de los modeladores y por ende sus modelos mentales (Sterman, 1988)-, el considerar la dinámica de sistemas para **propósitos de aprendizaje** implica entender el modelo dinámico-sistémico como una representación de las hipótesis del modelador (Andrade et al., 2001) que permite dar respuesta a preguntas relevantes de su audiencia primaria (Albin, 1997).

En complemento, el considerarse para **propósitos de intervención** implica reconocer al modelo como una herramienta para el *diseño efectivo de políticas* (Sterman, 2000), en donde el comportamiento generado por el modelo debe ser cercano al que ha manifestado históricamente el fenómeno, para que se haga válida la exploración de futuros posibles (Andrade et al., 2001). Adicionalmente, la efectividad de las políticas radica en que las estrategias que se propongan en realidad mejoren el comportamiento del sistema, superen la resistencia a su adopción y eviten los efectos secundarios u ocultos, que de hecho solo demostrarían un bajo entendimiento del sistema

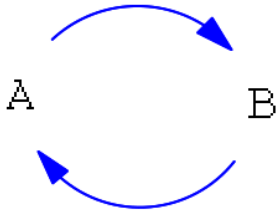
(Stermán, 2000). Lo anterior, hace necesario que se reconozca a los clientes del modelo como aquellas personas que deben ser influenciadas para que el trabajo tenga impacto, es decir, para que el modelo realmente contribuya a resolver sus problemas (Stermán 2000).

#### ***4.1.3. Herramientas para la simulación***

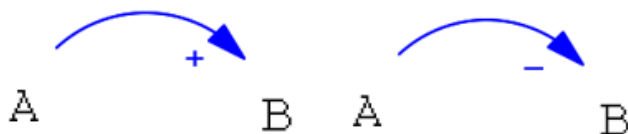
Andrade et al. (2001) presentan un sistema de cinco lenguajes o herramientas que los modeladores pueden emplear a conveniencia para facilitar el proceso de modelado computacional con dinámica de sistemas. El primero de ellos es el **lenguaje de prosa**, el cual permite expresar de manera textual, sencilla y comunicable los supuestos causales de los modelos mentales (Andrade et al., 2001).

El segundo es el **diagrama de influencias**, en donde a través de un gráfico se plasman (i) las relaciones de influencia positiva o negativa entre las variables y (ii) los ciclos de realimentación que se originan de dos o más relaciones (Andrade et al., 2001). Para Albin (1997), la mayor riqueza de estos diagramas radica en facilitar la socialización de los hallazgos encontrados, aunque también son útiles al inicio para facilitar la expresión de los modelos mentales.

La Figura 1 presenta a modo de ejemplo un ciclo de realimentación en el que la variable A influye sobre B, al mismo tiempo que B influye sobre A. Es de rescatar que ninguna de las dos variables es causa inicial o consecuencia final, en su lugar, entre ellas hay un sentido de causación en sus cambios (Andrade et al., 2001).

**Figura 1.***Ciclo básico de realimentación*

Ahora bien, la influencia de una variable sobre otra puede ser positiva (+) o negativa (-). La influencia positiva (+) de la Figura 2 implica que al aumentar A, B aumenta más de lo que hubiera sido de otro modo, es decir, en ausencia de A; o, que al disminuir A, B disminuye más de lo que hubiera sido de otro modo. Por otra parte, la influencia negativa (-) implica que al aumentar A, B disminuye más de lo que hubiera sido de otro modo, es decir, en ausencia de A; o, que al disminuir A, B aumenta más de lo que hubiera sido de otro modo. Esta interpretación amplia es útil para recordar que las relaciones entre variables no son estrictamente proporcionales (Sterman, 2000).

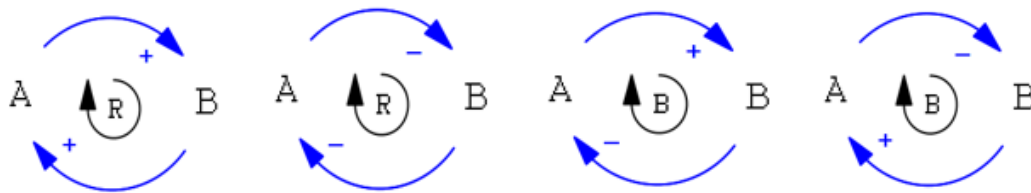
**Figura 2.***Influencia entre variables*

Asimismo, los ciclos de realimentación que se forman pueden ser de refuerzo (R) -o de signo positivo (+)-, o de balance (B) -o de signo negativo- según las relaciones de influencia que lo conforman, tal y como se presenta en la Figura 3. No obstante, debe tenerse claro que la idea

central alrededor de los ciclos de realimentación es que los de refuerzo (R) impulsan el cambio original de las variables, es decir, son aquellos en los que el efecto retorno se da en el mismo sentido de la perturbación inicial; mientras que en los ciclos de balance (B) el efecto se opone al cambio original, es decir, son aquellos en los que el efecto retorno se da en sentido contrario a la perturbación inicial (Andrade et al., 2001).

### Figura 3.

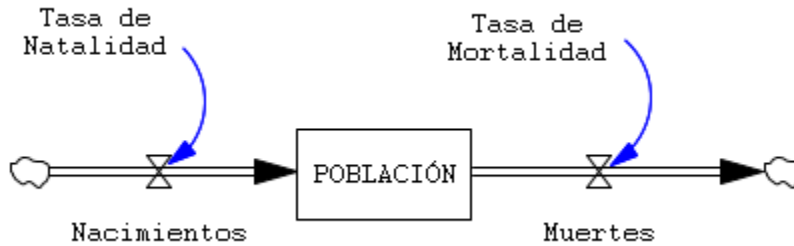
*Tipos de ciclos de realimentación*



El tercero de los lenguajes es el **diagrama de flujo-nivel** o diagrama de Forrester, en donde a través de un gráfico se expresa el fenómeno en términos de sus estados (niveles) y de aquello que produce sus cambios (flujos). Para Albin (1997) el valor de este diagrama radica en que obliga al modelador a pensar con más detalle en la estructura del sistema, pues ello habilitará la posterior simulación del modelo. A modo de ejemplo, en la Figura 4 se observa que la variable Población (nivel) se ve afectada por las variables Nacimientos y Muertes (flujos); y estas a su vez por sus respectivas tasas.

**Figura 4.**

*Ejemplo de diagrama de flujo-nivel*



Ahora bien, de acuerdo con Albin (1997), las *variables de nivel* son acumulaciones que pueden ser visibles y medibles (p. ej. la población) o abstractas (p. ej. nivel de miedo o reputación). Por su parte, las *variables de flujo* son razones de cambio con unidades del nivel sobre el tiempo, es decir, estas modifican los niveles. Adicionalmente, las variables de flujo y de nivel se clasifican como *variables endógenas*, dado que estas dan forma a los ciclos de realimentación (Albin, 1997); caso contrario, las *variables exógenas* (p. ej. la tasa de natalidad y mortalidad en la Figura 4) son aquellas cuyos valores no se ven afectados directamente por el sistema, pudiendo ser estáticas o variables en el tiempo (Albin, 1997). Asimismo, la Figura 4 permite mencionar, de acuerdo con Andrade et al. (2001), la existencia de *canales de material*, los cuales unen las variables de flujo y nivel (p. ej. el canal entre nacimientos y la población); y los *canales de información*, los cuales unen todo lo necesario para calcular las variables de flujo (p. ej. el canal entre la tasa de natalidad y nacimientos).

El cuarto de los lenguajes es el de **ecuaciones matemáticas** y diferenciales, el cual expresa ordenadamente el modelo para su posterior introducción al lenguaje computacional. Y el quinto de ellos es el de **comportamiento simulado**, el cual expresa el comportamiento del fenómeno a

partir de unas condiciones definidas y permite analizar diferentes alternativas de acción que resultan de la experimentación en un ambiente controlado construido en software computacional.

Finalmente, es necesario verificar y validar el modelo que con estas herramientas se realiza, pues así se hacen claras las limitaciones, oportunidades de mejora y usos adecuados del mismo (Sterman, 2000), al tiempo que se hace del proceso de modelado uno iterativo. De acuerdo con Izquierdo et al. (2008), en la **verificación** el modelador se asegura que el modelo es lo que pensó, y en la **validación** valora su utilidad dentro del contexto de aplicación en función de qué tanto captura la esencia del referente empírico.

Para la **verificación**, es posible emplear varias técnicas, entre las cuales se incluyen el *análisis dimensional*, que permite comprobar la consistencia de las unidades en las ecuaciones; el *análisis de condiciones extremas*, en el cual se asignan valores extremos a los parámetros del modelo y se buscan respuestas coherentes; la *búsqueda de comportamientos anómalos*, que analiza la respuesta del modelo a cambios o eliminaciones en los supuestos; y el *análisis de sensibilidad*, que determina la respuesta del modelo ante modificaciones en las variables endógenas y exógenas (Sterman, 2000).

Para la **validación**, resulta útil emplear los *modos de referencia*, que consisten en las posibles trayectorias y escenarios del fenómeno en el tiempo (Andrade et al., 2001). Estos modos de referencia pueden ser de dos tipos: los históricamente observados y los hipotéticos. Los históricamente observados se utilizan cuando hay disponibilidad de datos, de lo contrario se acude a los hipotéticos, que se construyen al proyectar los patrones de comportamiento de las variables en función del conocimiento detallado que se tenga sobre el sistema, lo que implica que podrán ser diferentes de acuerdo con los modelos mentales de cada individuo (Albin, 1997).

## 4.2. Sostenibilidad

Los términos sostenibilidad y sustentabilidad son posibles traducciones del término en inglés “sustainability”, mismos que en ocasiones son usados de manera intercambiable puesto que este se trata de un “concepto plural”, es decir, uno que está influido por las propias perspectivas y valoraciones personales (Gudynas, 2004). Su difusión se remonta a 1972 con la publicación “The Limits to Growth” de Donella Meadows, en donde se llamó la atención sobre el escenario insostenible en el que se encontraba la especie humana, al consumir más recursos de los que el planeta podía generar y producir más residuos de los que este podía digerir (Vilches & Gil, 2015). Recientemente, Meadows (2019) se refiere a la sostenibilidad como una **propiedad general de los sistemas**<sup>‡</sup> que, aunque difícil de cuantificar, resulta útil a los propósitos de búsqueda del bien del conjunto.

### 4.2.1. Ciencia de la sostenibilidad

La ciencia de la sostenibilidad busca comprender cómo la **interacción humanidad-ambiente** permite cumplir los objetivos de atender a las necesidades de la sociedad y de preservar los sistemas que dan soporte a la vida del planeta (Vilches & Gil, 2015). Alrededor de tal interacción, surgen numerosos problemas socioambientales, sistémicos y complejos, que hacen necesario que para su abordaje (i) se acuda a planteamientos holísticos, interdisciplinarios y

---

<sup>‡</sup> Junto con la creatividad, la estabilidad, la diversidad y la resiliencia

transdisciplinarios; y (ii) que se promueva la plena integración de la ciencia y la sociedad mediante la incorporación a la investigación y toma de decisiones de las personas del común, pues para lograr la viabilidad en las estrategias de transición hacia la sostenibilidad se requiere de la intervención a la ciudadanía (Vilches & Gil, 2015).

De hecho, de acuerdo con Vilches & Gil (2015), al ser la insostenibilidad un problema glocal, es decir, global y local a la vez, no tiene sentido aspirar a una ciudad o país sostenible cuando la contaminación del agua, por ejemplo, no tiene fronteras. Lo que sí tiene sentido es trabajar para que cada persona contribuya a la sostenibilidad y mejore su relación con la naturaleza. Además, esto toma importancia al considerar que las capacidades socioculturales tienen el potencial de modificar las capacidades de sustentación (Cepal, s.f.), en parte por la capacidad de la sociedad de usar su acervo tecnológico y los recursos financieros para equilibrar artificialmente el daño ecológico causado, mediante entradas al sistema de material, energía e información que compensen las salidas naturales y artificiales (Cepal, s.f.).

#### ***4.2.2. Enfoque de desarrollo***

De acuerdo con la Cepal (s.f.), el desarrollo de las fuerzas productivas está caracterizado por el uso de insumos y la generación de residuos, que bajo los paradigmas de crecimiento y desarrollo económico han derivado en el agotamiento de los recursos, la pérdida de la capacidad ecosistémica para recuperarse y la superación de la capacidad de asimilación de residuos. Tales consecuencias impactan negativamente en la sociedad en forma de costos ambientales y la desigual distribución social de los afectados (Cepal, s.f.).

Ante tal panorama, surge el desarrollo sostenible como la alternativa que permite el desarrollo asegurando la conservación del ambiente. En 1987, el Informe Brundtland lo definió como aquel que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas propias. Tal definición trajo consigo la necesidad de abordar simultáneamente aspectos sociales, ambientales y económicos; a la vez que genera conciencia sobre los limitados recursos del planeta y la importancia de la equidad intergeneracional.

Más adelante, la difusión del concepto y la necesidad de su adopción llevó a que en 1992 se desarrollara la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro en la cual se establecieron 27 principios alrededor del ser humano y su desarrollo integral. Luego, a que en el año 2000 se definieran los objetivos del milenio, que constaban de 8 objetivos a cumplir para el 2015. Y en 2015, a que se definieran los Objetivos de Desarrollo Sostenible, con 17 objetivos a cumplir para el 2030. En la actualidad, a nivel global la ONU registra los avances en los ODS a través de 169 metas y 231 indicadores; en América Latina y el Caribe, lo hace la CEPAL; y a nivel de Colombia, el Gobierno Nacional a través de 180 indicadores definidos en el CONPES 3918 de 2018.

#### ***4.2.3. Diseño para la sostenibilidad***

El diseño para la sostenibilidad es aquel que incorpora elementos que se alinean a (i) las expectativas sociales, (ii) la equitativa distribución de valor a lo largo de las cadenas productivas y (iii) la capacidad de carga de los ecosistemas. Lo anterior con el fin de contribuir a los retos de cada una de las tres dimensiones y de responder a las demandas de la opinión pública y clientes, las ONG, requisitos legislativos, normas y estándares; o de sacar provecho de planes de subsidio o competencia en el mercado (UNEP, 2006).

A nivel social, de acuerdo con UNEP (2006), se busca aumentar el número de trabajadores cualificados, reducir la inequidad de los ingresos, proporcionar servicios básicos de salud y acceso a agua limpia. Lo anterior, a la luz de los ODS abordaría los objetivos número uno (fin de la pobreza), dos (hambre cero), tres (salud y bienestar), cuatro (educación de calidad), cinco (igualdad de género), diez (reducción de las desigualdades), dieciséis (paz, justicia e instituciones sólidas) y diecisiete (alianzas para lograr los objetivos).

A nivel económico, se busca la industrialización de la producción, la obtención de economías de escala, precios justos de productos y materias primas, y oportunidades para los emprendedores; lo que correspondería a los ODS número ocho (trabajo decente y crecimiento económico), nueve (industria, innovación e infraestructura), once (ciudades y comunidades sostenibles) y doce (producción y consumo responsable).

Finalmente, a nivel ambiental se busca enfrentar: (i) algunos daños ecológicos como el calentamiento global, el deterioro de la capa de ozono, la lluvia ácida, la alteración de los hábitats y la ecotoxicidad; (ii) algunos causantes de la alteración a la salud humana como el smog, la contaminación del aire, y la emisión de sustancias cancerígenas; y (iii) el agotamiento de los recursos fósiles, minerales y el agua. Esto abordaría los ODS número seis (agua limpia y saneamiento), siete (energía asequible y no contaminante), trece (acción por el clima), catorce (vida submarina) y quince (vida de ecosistemas terrestres).

### 4.3. Gestión de residuos sólidos urbanos

La gestión de residuos sólidos urbanos (GRSU) es el conjunto de actividades para el manejo y la disposición final de los residuos sólidos generados en entornos urbanos, bajo los principios de protección de la salud humana y del entorno ambiental (Pineda, 1998). En ella, la visión sistémica se hace presente al considerar la alta interrelación del conjunto de actividades que la componen, de cuya coordinación dependen los resultados del sistema de gestión.

La relevancia actual de la GRSU se remonta a eventos históricos que han dado a los residuos la noción de ser un problema. En un inicio, el ser humano basó su desarrollo en el uso de materia primas naturales y pocamente transformadas, de manera que los residuos generados se deshacían fácilmente por acción de la naturaleza o por voluntad propia a través de un segundo uso. No obstante, el interés humano en mejorar sus condiciones de vida le llevo a incursionar en complejas transformaciones a las materias primas, así como al descubrimiento de nuevas de ellas, que derivaron en otro tipo de residuos que la naturaleza no puede deshacer -al menos en el corto tiempo- por lo que causan su deterioro (Pineda, 1998). En tal escenario toma importancia la intervención del hombre para deshacerse de los residuos a través de diferentes herramientas y técnicas, pues, a diferencia de la naturaleza, este actúa como generador y consumidor, pero nunca como descomponedor (Pineda, 1998).

Dicho esto, resulta práctico entender que el problema en realidad no gira alrededor de los residuos sino en su gestión (Euformación Consultores, 2015), pues estos siempre estarán presentes; de hecho, una premisa importante es que toda actividad de producción y consumo genera residuos (Montes, 2021). En otras palabras, es la decisión de qué hacer con el residuo lo que reviste de complejidad, pues el residuo en sí es algo relativo (Pineda, 1998); así lo dan entender

en sus definiciones Pineda (1998), quien define el residuo como un subproducto que oscila entre su capacidad contaminadora y su potencial de materia prima; Sempere & Riechmann (2004) quienes lo presentan como aquel material que sobra donde está y no está donde se necesita; Euformación Consultores (2015) que lo explican como aquella materia prima producida en un lugar inadecuado y en un momento inoportuno; y Montes (2021) que lo define como el material originado en las actividades de producción y consumo que no alcanza valor en el entorno en el que es generado.

Ante tal relatividad, las clasificaciones de residuos con base a características compartidas resultan útiles para orientar la gestión. Pineda (1998) los clasifica de acuerdo con su origen en: residuos sólidos urbanos (RSU), que incluye a los residenciales, comerciales e institucionales; industriales; peligrosos y agrícolas. De entre estos, los RSU son de especial atención por su nivel de cercanía con la población (Pineda, 1998), la alta visibilidad de su manejo y el necesario involucramiento ciudadano, empresarial y del gobierno (Malinauskaite et al., 2017).

#### ***4.3.1. Manejo de los RSU***

**4.3.1.1. Generación.** La generación de RSU es el resultado natural de la producción y el consumo de bienes y servicios en la urbe. De acuerdo con Pineda (1998) las variables asociadas y necesarias para su estudio son la producción, el ingreso per cápita y el tamaño de las ciudades.

La situación problema alrededor de esta actividad es la alta y rápida generación de residuos la cual está determinada por (i) los actuales patrones de producción (Pineda, 1998; Das et al., 2019), (ii) la baja conciencia ambiental de los ciudadanos (Das et al., 2019) y (iii) por factores como la edad, el nivel de educación, el género, la ocupación (Babaei et al., 2015), el ingreso por habitante, la tasa de cobertura escolar (Sánchez-Muñoz et al., 2019) y el estrato socioeconómico

(Marmolejo et al., 2010). Es por esto que de acuerdo con Pineda (1998), las soluciones potenciales para disminuir la producción de residuos demandan de un fuerte trabajo con la ciudadanía, incluidas las empresas en su rol de ciudadanos corporativos<sup>§</sup>.

**4.3.1.2. Recolección, transporte y logística.** Estas actividades implican el movimiento y traslado de residuos de una manera previamente establecida, desde unos puntos de origen (recolección) a unos intermedios (trasbordo) y/o finales (disposición final). De acuerdo con Pineda (1998), estas etapas representan un gran porcentaje de los costos de operación del sistema y para ALC se caracterizan por emplear numerosa mano de obra poco calificada.

#### ***4.3.2. Disposición final de los RSU***

La disposición final comprende el subconjunto de actividades de tratamiento y disposición que permiten “deshacerse” de los residuos. La selección del mejor de los métodos disponibles para ello es un tema ampliamente abordado en la literatura, pues decidirse por alguno implica la consideración de múltiples factores (Erses, 2015; Aghajani Mir et al., 2016; Fernández-González et al., 2017; Malinauskaite et al., 2017; Nabavi-Pelesaraei et al., 2017; Das et al., 2019), que bien se resumen en limitaciones vinculantes del tipo ambiental, social, técnico, económico y político, lo que hace que no existan soluciones aplicables globalmente (Pineda, 1998).

---

<sup>§</sup> Concepto empleado por Cárdenas (2009).

Para Pineda (1998) la disposición final de los residuos se basa en dos principios. El primero de ellos es el de disposición a través de tratamientos de degradación (relleno sanitario) o de eliminación (incineración), que se basan en transformar los residuos en algo inútil, lo que en esencia corresponde a trasladar el problema a otro entorno. El segundo principio se basa en valorizar el "residuo" mediante su reutilización o reciclaje como materia prima o soporte energético; de hecho, esta alternativa es relevante para ALC al ser intensiva en mano de obra, aunque su éxito depende de la incorporación de los productos obtenidos en las cadenas de valor, por ejemplo, los del compostaje en los sistemas agrícolas (Das et al., 2019).

**4.3.2.1. Relleno Sanitario.** Este es un tratamiento de degradación mediante el enterramiento tecnificado de los residuos a través de capas intercaladas de estos con tierra y su continua compactación, que permiten luego de una última capa aislante e impermeabilizante revegetalizar el terreno (Pineda, 1998).

De acuerdo con Pineda (1998), esta alternativa deriva en problemas ambientales relacionados a la formación de gases por la fermentación metánica y la generación de lixiviados en presencia de pilas, plaguicidas, detergentes, pinturas y abrasivos; es decir, los lixiviados en sí no serían el problema. Adicionalmente, en este tratamiento el volumen mínimo de material es una limitante (Pineda, 1998) y usualmente su viabilidad financiera es únicamente en el corto plazo (Nabavi-Pelesaraei et al., 2017). Pese a ello, es necesario tener en cuenta que los rellenos sanitarios controlados siempre serán necesarios como estructuras finales de una correcta gestión (Pineda, 1998).

**4.3.2.2. Incineración.** Tratamiento de eliminación con el cual se genera energía calórica a través de la reducción controlada de los residuos a material inerte o escorias, las cuales representan entre el 10% y el 30% de la cantidad inicial ingresada al incinerador, que posteriormente deberán ser dispuestas en los rellenos sanitarios (Pineda, 1998).

Sus desventajas recaen en la necesidad de una inversión inicial alta (Pineda, 1998; Nabavi-Pelesaraei et al., 2017), contar con personal calificado -lo que implica altos costos de operación y mantenimiento- y contar con residuos cuyo poder calorífico y contenido de humedad sea el adecuado (Pineda, 1998); lo anterior sin contar el riesgo de contaminación atmosférica por desprendimiento de gases (Pineda, 1998).

**4.3.2.3. Reciclaje.** Alternativa que consiste en la transformación del residuo con el fin de obtener una materia prima útil para la producción de un bien similar al que dio su origen u otro diferente (Montes, 2021).

Esta es la opción más aceptable en términos técnicos y económicos pues, comparada con las anteriores alternativas, no es más costosa, complicada, molesta o demandante de espacio. En sí, su problema gira entorno al desinterés político, la saturación de los mercados de reciclaje y la baja educación de la población para la separación en la fuente, (Pineda, 1998), influenciado esto por factores como la edad -se da mejor en personas mayores-, la ocupación -se da mejor en personas con cargos públicos- (Babaei et al., 2015)- y el género -se da mejor en mujeres (Sempere & Riechmann, 2004)-.

**4.3.2.4. Compostaje.** Alternativa que consiste en procesar la fracción orgánica de los residuos para incorporarlos de forma artificial a los ciclos de la materia. De por sí, esta opción es altamente compleja por las restricciones del tipo económico, ambiental y técnico; más aún, si se desea garantizar un producto útil para el abono de los terrenos se deben determinar primeramente los niveles de temperatura, oxígeno y humedad, así como el tipo de residuos a emplear, de lo contrario únicamente se obtendría un mejorador de suelos (Pineda, 1998).

#### **4.3.3. Causas de una deficiente GRSU**

En primer lugar, la GRSU se torna problemática al provenir los residuos de materias primas con diferentes grados de transformación y con características fisicoquímicas ajenas a la naturaleza, además de la no concepción de los productos para ser recuperados o regresar a su lugar de origen, agravado esto por el desordenado desarrollo industrial y la baja planificación urbana (Pineda, 1998).

En segundo lugar, se tiene el hecho de que en ALC ha predominado -y aún predomina- una gestión tradicional que ha consistido en la recolección de residuos para la disposición final, prestando poca atención a la recuperación y a otras alternativas de tratamiento (como sí lo han hecho países de la Unión Europea y Estados Unidos), e ignorando las oportunidades que representan la escasez de componentes electrónicos, el déficit de materia orgánica en las tierras de cultivo y la tradición recuperadora de la región (Pineda, 1998; Cepal, 2020; Cepal 2021).

En tercer lugar, a nivel institucional y legal se tienen falencias asociadas a: la debilidad institucional para el liderazgo del sector (a nivel normativo, fiscalizador y operador); la baja capacitación y calificación del recurso humano asociado; la inadecuada e inflexible legislación para la realidad de los territorios (Moreno-Sánchez & Maldonado, 2006); el incumplimiento de los

instrumentos legales; la ausencia de políticas para reducir la generación; la falta de planeación y la ausencia de sistemas nacionales de información y seguimiento (Pineda, 1998).

Justamente, el liderazgo del sector se pierde debido al desalineamiento de la gran cantidad de instituciones involucradas (entes gubernamentales, empresas municipales, sector privado, organismos internacionales, ONG y asociaciones (Pineda, 1998)), que hace recurrente la duplicación de esfuerzos, la confusión en las responsabilidades y genera apatía política (Pineda, 1998; Niño Torres et al., 2017; Sánchez-Muñoz et al., 2019; Franceschi et al., 2022).

No obstante, es claro que el encargado natural de la GRSU es el gobierno en sus roles de: planificador, regulador y supervisor, en sus entes nacionales; financiador y administrador, en sus entes locales; y como articulador con el sector privado (Ma & Hipel, 2016). De hecho, el éxito de las intervenciones recae principalmente en el interés de los líderes políticos y de sus capacidades (Rodić & Wilson, 2017), como lo evidenció Babaei et al. (2015) en el contexto de Irán, al encontrar en la comunidad la idea de que una mejor gestión inicia con el gobierno proveyendo la infraestructura necesaria y finaliza con los ciudadanos separando y disponiendo adecuadamente sus residuos. Similarmente, en el contexto colombiano de Villavicencio, Niño et al. (2017) hallaron que la comunidad reconoce que, si bien en ellos está el origen de los problemas, la mayoría estarían dispuestos a cooperar activamente para mejorar la situación, siempre que se provean las condiciones necesarias para ello. En efecto, Pineda (1998) afirma que la lógica y coherencia en las intervenciones que realice el gobierno deben ser evidentes para la comunidad pues ello refuerza su participación.

En cuarto lugar, a nivel técnico y operativo se hace frente a la mezcla de residuos peligrosos con los urbanos (Kulkarni & Anantharama, 2020; Nzediegwu & Chang, 2020; Sharma et al.,

2020); la ausencia o bajo control de estaciones de almacenamiento temporal y de transferencia; los altos costos de las tecnologías; la baja cobertura en la recolección; el mayor enfoque en residuos que se generan en menor cantidad (como los hospitalarios); el bajo tratamiento de los lixiviados en los rellenos sanitarios y el no uso de membranas sintéticas para la impermeabilización; y la desarticulación con los recicladores (Pineda, 1998).

En quinto lugar, a nivel económico-financiero se contempla la no evaluación de los beneficios económicos del manejo de los residuos como un todo; la escasez de recursos para el financiamiento del sector; las bajas tarifas de aseo; y el cobro indirecto del servicio (Pineda, 1998).

Finalmente, sobre el nivel social se presenta que la baja cobertura de las necesidades básicas hace complejo abordar la GRSU desde un enfoque ambiental (Montes, 2021), pues la desocupación elevada y los altos niveles de pobreza conducen a que una mayor cantidad de personas desempeñen el rol de recicladores informales (Pineda, 1998) al encontrar en esta actividad un medio de subsistencia (Montes, 2018). Por otra parte, las cooperativas, asociaciones y microempresas de recicladores cuentan con bajas capacidades gerenciales, operacionales y financieras, aspecto que no contribuye a hacer frente a la débil participación ciudadana -reflejada en la no separación en la fuente y la resistencia a pagar por el servicio (Babaei et al., 2015)- y a las no tan consolidadas estrategias de los ciudadanos corporativos (empresas) para contribuir a la gestión de residuos (Peña-Montoya et al., 2020).

#### ***4.3.4. Consecuencia de una deficiente GRSU***

De acuerdo con Pineda (1998), una GRSU fuera de control es una potencial amenaza para la salud humana y el medio ambiente. Sobre el **medio ambiente** la consecuencia directa es el

deterioro estético de las ciudades y el paisaje natural. Las consecuencias indirectas abarcan la contaminación de los cuerpos de agua por lixiviados, la contaminación de los suelos, así como su desvalorización, y la contaminación del aire por malos olores y humos. Sobre la **salud humana**, las personas que tienen contacto directo con los residuos -por ejemplo, en las actividades de recolección y segregación- corren el riesgo de desarrollar enfermedades respiratorias, de piel y gastrointestinales; y a nivel general, la población se ve afectada por la proliferación de vectores.

En complemento a lo anterior, Ma & Hipel (2016) exponen que la deficiente GRSU refuerza un **pobre desarrollo social** caracterizado por el deterioro de la salud pública, la desigualdad económica, la injusticia ambiental, y la desigualdad en la prestación del servicio. Además, se afecta el logro de 12 de los 17 ODS (Rodić & Wilson, 2017) y se sabotea la transición hacia una economía circular (Malinauskaite et al., 2017), desechando oportunidades valiosas como el extraer proteínas de los residuos orgánicos con fines de alimentación humana o animal, extraer enzimas para la industria y aprovecharlos como biomateriales o energía (Cepal, 2020) y recuperar de los RAEE valiosos componentes metálicos (Cepal, 2021).

Finalmente, la consecuencia última alrededor de este sector es que el impacto ambiental que se genere sea uno tal que se afecte la **supervivencia** de la actual civilización (Pineda, 1998).

#### ***4.3.5. Mejorar la GRSU***

De acuerdo con Pineda (1998), en el corto plazo se debe intervenir el sistema con un mensaje de emergencia para **contrarrestar el deterioro ambiental**. Para el autor, una solución "buena, bonita y barata" es fortalecer el reciclaje de una manera tal que esté perfectamente integrado a las dinámicas económicas y sociales de la población, reconozca a los actores ya

existentes y evite crear nuevos canales (Pineda, 1998), en aras de hacer más rentable el aprovechar que el eliminar (Montes, 2021).

En busca de tal reconocimiento a los actores ya existentes del reciclaje, es decir, a los recicladores de oficio, y a su rol como desviadores de materiales al vertedero (Gutberlet et al., 2017), autores como Fei et al. (2016) proponen programas de entrenamiento profesional, entrega de equipos, mejoramiento de sus instalaciones, incentivos económicos y acceso a plataformas de información. Pardo & Piña (2017) plantean una concepción de estos como unidades económicas de reciclaje. Moreno-Sánchez & Maldonado (2006) proponen el diseño de planes de compensación y seguridad social. Vélez & Mora (2016) y Breukelman et al. (2019) plantean la regulación de los precios de los materiales reciclables. Y Franceschi et al., (2022) presentan la importancia de consolidar esquemas de financiación y fomentar la separación en la fuente; todo lo anterior en aras de recuperar la mayor cantidad posible de materiales.

Adicionalmente, para lograr la rentabilidad necesaria es útil hacer frente a los altos costos de transporte a través de la implementación de alternativas de bajo consumo y el diseño óptimo de rutas de recolección a partir de estrategias de separación en la fuente consolidadas (Nabavi, 2017).

En el largo plazo, Pineda (1998) expone que se deben orientar esfuerzos a consolidar una política que se centre en **prevenir el deterioro ambiental**, para lo cual se debería avanzar en: (i) la integración de las estructuras de eliminación a las de producción y distribución; (ii) favorecer el empleo de materiales que resulten en residuos menos nocivos; y (iii) mejorar los procesos productivos para que los bienes duren más y los procesos sean cero residuos. En aras de lo anterior, se hace relevante avanzar en una concepción económica del residuo que le revista de la misma

importancia que tiene la materia prima y los productos terminados, es decir, en superar el enfoque único de reducción de los costos del producto principal (Pineda, 1998).

De manera transversal, Rodić & Wilson (2017) introducen el **rol del gobierno** como uno fundamental en la mejora de la GRSU, a través de tres modos de intervención; la primera de ellas es con la *regularización* y aplicación directa de la ley, es decir, permitiendo o prohibiendo prácticas específicas. La segunda, a través de los *instrumentos sociales*, es decir, mediante el informar, interactuar y comprometerse, siendo importante la predicación con el ejemplo y el apalancamiento con los medios de comunicación, para la difusión de campañas de información que busquen generar conciencia e impulsar acciones acordes a dicha conciencia (Sharma et al., 2020). La última forma son los *instrumentos económicos*, que hacen referencia a incentivos o desincentivos para acciones y comportamientos específicos, así como a la búsqueda de financiación nacional e internacional, el garantizar la asequibilidad para los usuarios y abogar por la responsabilidad extendida del productor.

Precisamente, frente a los instrumentos económicos Moreno-Sánchez & Maldonado (2006) a partir de un modelo matemático presentan como óptimo aplicar un impuesto al consumo y a la disposición igual al precio sombra del espacio vacío del relleno sanitario. Lo recolectado sería entregado a los recolectores informales vía subsidio y se complementaría con un impuesto a las empresas sobre el uso de materias primas igual al daño marginal generado por la extracción del recurso.

Otro factor, paralelo al del gobierno, es el **rol de los académicos e investigadores**, quienes como reproductores de la ideología dominante deberían apostarle a (i) la difusión de una concepción ecológica del residuo -presentando este como parte de los recursos limitados con los

que cuenta el planeta tierra (Pineda, 1998)- y (ii) al desarrollo de nuevas tecnologías/estrategias para una gestión sostenible de residuos sólidos (Das et al., 2019). Para ello, es importante que los investigadores seleccionen métodos de análisis que deriven en hallazgos más razonables (Ma & Hipel, 2016), orientados a una mejor comprensión de las causas fundamentales de las deficiencias del sistema y a un diseño informado de las intervenciones (Breukelman et al., 2019), considerando conjuntamente el largo y el corto plazo, el ámbito local y global (Ma & Hipel, 2016).

Finalmente, también se mejora el sistema al prepararlo para **condiciones extremas de operación**, como lo fue el escenario pandémico del Covid-19 (Kulkarni & Anantharama, 2020; Nzediegwu & Chang, 2020; Sharma et al., 2020), de cuya experiencia se extrae la importancia de (i) ahondar en estrategias de descentralización de la GRSU (Kulkarni & Anantharama, 2020) o de estrategias in-situ (Das et al., 2019) mediante el compostaje y el reciclaje en la vecindad del generador y el uso de instalaciones de almacenamiento temporal (Kulkarni & Anantharama, 2020); (ii) reconocer y proteger a los trabajadores sanitarios y recolectores informales, así como mejorar la normativa sobre el tema (Sharma et al., 2020) ;(iii) extender los conceptos de economía circular en la sociedad para reconocer las oportunidades económicas en tiempos de crisis (Sharma et al., 2020); y (iv) abordar la GRSU dentro de los planes de gestión de desastres (Kulkarni & Anantharama, 2020; Sharma et al., 2020).

#### ***4.3.6. Condicionantes para la sostenibilidad***

De acuerdo con la literatura, para que un sistema de GRSU opere de forma sostenible se debe contar con (i) la integración de aspectos sociales, económicos, medioambientales, institucionales, legales y técnicos (Das et al., 2019); (ii) la innovación tecnológica, y (iii) la participación de todos los grupos de interés (Ma y Hipel, 2016; Breukelman et al., 2019) en un

proceso de toma de decisiones participativo (Ripa et al., 2017; Kubanza & Simatele, 2018). En otras palabras, la GRSU sostenible debe optimizar la aceptabilidad social, el beneficio económico y la compatibilidad ambiental, promoviendo una sociedad equitativa y sostenible (Sukholthaman & Sharp, 2016).

Como parte de dicho proceso, se deben lograr programas de intervención basados en las necesidades evidenciadas de los municipios (Babaei et al., 2015) y en sus características demográficas (Marmolejo et al., 2010; Babaei et al., 2015; Ma y Hipel, 2016; Sánchez-Muñoz et al., 2020;), que estén orientados por estrategias amplias para (i) la producción y el consumo responsable (Ripa et al., 2017) y para (ii) la coproducción de los servicios de gestión, en especial para ALC (Gutberlet et al., 2017).

Adicionalmente, dichas estrategias deben contribuir a afianzar el concepto de residuos como recursos y así contribuir a la transición hacia una economía circular (Malinauskaite et al., 2017), al mismo tiempo que se hace frente al recelo de los actores frente al concepto de cero residuos, dado el imaginario de que con este verían afectados sus intereses económicos (Gutberlet et al., 2017). Para tal transición, es importante consolidar el uso de indicadores cualitativos y cuantitativos de gestión, dado que, hoy por hoy la falta de información histórica confiable impide la correcta toma de decisiones y el ajuste efectivo de políticas (Sánchez-Muñoz et al., 2019).

#### ***4.3.7. Contexto territorial***

La GRSU en el contexto normativo, legal y político de Colombia es equivalente a la gestión integral de residuos sólidos (GIRS) que se origina en el marco del servicio público de aseo, encargado de gestionar los residuos ordinarios, es decir, los generados en la urbe.

**4.3.7.1. Servicio público de aseo.** El servicio público de aseo en Colombia inició bajo un *enfoque higiénico y sanitario* cuyo interés era que se presentaran los residuos para su posterior recolección, sin importar si estos se disponían al aire libre o en cuerpos de agua; situación que propició una cultura hacia la disposición incontrolada (Ministerio de Medio Ambiente, 1997). Buscando subsanar dicha situación, en 1998 se formuló la política para la GRS, la cual introdujo un *enfoque ambiental* al manejo de los residuos bajo la concepción *de gestión integral*, aspecto que se ratificó en el Decreto 2981 de 2013.

**4.3.7.2. Gestión integral de residuos sólidos.** En 1997 el Ministerio del Medio Ambiente definió la gestión integral como todas las actividades asociadas al manejo de los diversos flujos de residuos dentro de la sociedad, para administrarlos de una forma compatible con el medio ambiente y la salud pública. Esta priorizó la minimización de los residuos, el aumento del aprovechamiento, la mejora en el sistema de eliminación, tratamiento y disposición final, e hizo una distinción entre residuos ordinarios y peligrosos, y entre aprovechables y no aprovechables.

Más recientemente, el Decreto 2981 de 2013 determinó que la GIRS debe regirse por los principios de: prestación eficiente a toda la población con continuidad, calidad y cobertura; obtener economías de escala comprobables; garantizar la participación de los usuarios en la gestión y fiscalización de la prestación; desarrollar una cultura de la no basura; fomentar el aprovechamiento; y minimizar y mitigar el impacto en la salud y en el ambiente que se pueda causar por la generación de los residuos sólidos.

**4.3.7.3. Actores.** En la normativa alrededor de la GIRS confluyen actores como los usuarios, los municipios y las personas prestadoras del servicio público de aseo (PPSPA).

De los *usuarios* se espera su participación en las actividades de almacenamiento, separación en la fuente y presentación. Las normas para ellos son, por ejemplo, el Código Nacional de Policía y Convivencia de 2016 y la Resolución 2184 de 2019. El primero de ellos contempla en el Artículo 111 los comportamientos contrarios a la limpieza y recolección de residuos y escombros, así como las malas prácticas habitacionales. El segundo, regula la separación de los residuos mediante el uso de bolsas de color verde, para residuos orgánicos; blanca, para aprovechables; y negra, para no aprovechables o desechos.

Referente a los *municipios*, el Decreto 2981 de 2013 en el Artículo 6 define que estos tienen la responsabilidad de garantizar la prestación del servicio a todos sus habitantes, y en el Artículo 88 que tienen la responsabilidad de elaborar, implementar y mantener actualizado el plan de gestión integral de residuos sólidos urbanos (PGIRS) de acuerdo con los lineamientos estratégicos de reducción en el origen, aprovechamiento y disposición final.

Finalmente, las *PPSPA* son un macro grupo en el que se relacionan empresas públicas del servicio de aseo, gestores de residuos (empresas privadas) y recicladores de oficio (Montes, 2021). Frente a estos último, Parra (2021), expone que los recicladores de oficio son considerados sujetos

de especial protección y en Colombia la actividad de aprovechamiento\*\* no se puede entender de una manera diferente a la de la jurisprudencia a favor de su operación, es más, se actuaría en contra de esta cuando se permite la coaptación, suplantación o desplazamiento de los recicladores y sus organizaciones como prestadores del servicio de aprovechamiento.

De hecho, la sentencia T-724 de 2003 estableció que se deberían adelantar una serie de acciones afirmativas y consistentes a favor de que los recicladores puedan adelantar su actividad en condiciones dignas, dada la continua competencia con las empresas de aseo por el material recuperable y la ganancia que para los recicladores representa en términos de aprovechamiento, y para las empresas en términos del volumen gestionado (Montes, 2021); esto es, que a mayor material reciclado, menores son los ingresos para los operadores tradicionales (SSPD, 2017).

No obstante, fue hasta el Acto de Seguimiento 275 de 2011 que se reconoció la labor del reciclador como parte del servicio público de aseo, al determinarse que su participación en las actividades de recuperación y aprovechamiento de residuos debía hacerse como empresarios de las basuras, de manera tal que estos puedan emplear los conocimientos que han adquirido a lo largo de los años y capitalizar los beneficios ambientales que para la ciudad representaba su actividad. Luego de esto, con la expedición del Decreto 596 y la Resolución 276 de 2016, se modificó el Decreto 1077 de 2015 para incorporar la formalización de los recicladores de oficio en la actividad

---

\*\* Actividad complementaria al servicio público de aseo

de aprovechamiento del servicio público de aseo y con ello acceder al pago de la tarifa que realizan los usuarios mediante factura (Montes, 2021).

Pese a los mencionados avances en la jurisprudencia, Parra (2021) analiza como negativo que el proceso de formalización reafirma el principio de libre competencia y no considera los diferentes niveles en la organización de los recicladores. Además, menciona que aunque el Decreto 2412 de 2018 incorpora el incentivo al aprovechamiento y tratamiento (IAT) para ser un ingreso adicional a los recicladores formalizados, para este se priorizan las propuestas de tratamiento en lugar de las de aprovechamiento; esto sin considerar la existencia de conflictos de interés cuando se postulan empresas del estado y la ausencia de una línea base para verificar el logro en la disminución de los residuos según las propuestas (Parra, 2021). Por último, Parra (2021) analiza el efecto negativo de la Resolución 1407 de 2018, ya que al establecer que los productores deben contar con un plan de gestión ambiental de residuos de envases y empaques se ha propiciado que los productores busquen mecanismos de negocio con gestores de residuos, valiéndose de la separación o disposición controlada que realizan los ciudadanos y dejando por fuera de la operación a los recicladores de oficio.

**4.3.7.4. Entes competentes.** De acuerdo con Montes (2021), la gestión de los residuos sólidos ordinarios (aquellos que se presentan y son gestionados por las PPSPA) tiene como guía el Decreto 1077 de 2015 y el CONPES 3874 de 2016, y como ente de control al Ministerio De Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT) y a la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD).

Para los residuos peligrosos (RESPEL) se debe acudir a la Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos y al Decreto 1076 de 2015, teniendo como ente de control

al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). La estrategia de gestión para estos se basa en la responsabilidad integral del generador (Montes, 2021).

Finalmente, los residuos de gestión diferenciada -como los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), las llantas, y los residuos de construcción y demolición (RCD)- están a cargo del MADS y la ANLA y cuentan con políticas especiales, además de los Decretos 1076 y 1077 de 2015, y múltiples normas de posconsumo y de responsabilidad extendida del productor, siendo esta última la estrategia de gestión correspondiente, ya que, al conocer los productores las características de los materiales y del proceso productivo que les dio origen, se facilita el tratamiento (Montes, 2021).

**4.3.7.5. Política pública.** Los esfuerzos políticos alrededor de la GIRS han quedado en evidencia en diferentes iniciativas que giran alrededor del tema. Un primer ejemplo es el CONPES 3874 de 2016 (Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos), aún vigente, que se formuló con el fin de "implementar la gestión integral de residuos sólidos como política nacional de interés social, económico, ambiental y sanitario, para contribuir al fomento de la economía circular, desarrollo sostenible, adaptación y mitigación al cambio climático".

La política adoptó cuatro ejes estratégicos dirigidos a: (i) adoptar medidas encaminadas hacia la reducción y reúso de los residuos que contribuyan a la mitigación del cambio climático; (ii) mejorar la cultura ciudadana, la educación e innovación en la gestión integral de residuos sólidos; (iii) asignar roles específicos y claros a las entidades involucradas; e (iv) implementar acciones para mejorar el reporte, monitoreo, verificación y divulgación de la información sectorial.

En segundo lugar, se cuenta con en el CONPES 3918 del 2018 (Estrategia para la Implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia), en donde se aborda el ODS 12 sobre producción y consumo responsable a través del indicador de la tasa de reciclaje y nueva utilización de residuos sólidos, determinando como línea base el 8.6% (en 2015) y estableciendo como metas nacionales a 2018 el 10% y a 2030 el 17.9%.

En tercer lugar, en el CONPES 3934 de 2018 (Política de Crecimiento Verde) se presenta la economía circular como un concepto clave del modelo de crecimiento verde, definido este como un modelo que busca que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca la generación de residuos.

Por último, se tiene la Estrategia Nacional de Economía Circular, desarrollada en el marco del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, la cual se orienta bajo la lógica de producir conservando y conservar produciendo, cuyo objetivo es el de promover la transformación productiva para maximizar el valor agregado de los sistemas industriales y agropecuarios. Además, busca la transformación de las ciudades a sostenibles en términos económicos, ambientales y sociales, a partir de la circularidad, innovación tecnológica y colaboración en nuevos modelos de negocio. En dicha estrategia se propone adoptar la perspectiva de la economía circular como una estrategia enfocada hacia las cadenas de valor y las regiones geográficas.

#### **4.4. Gestión de la cadena de suministro**

##### ***4.4.1. Definición***

Una cadena de suministro es un conjunto de entidades y relaciones que de manera acumulada determinan el flujo de materiales e información hacia el cliente -modo descendente- o

hacia el primer proveedor -modo ascendente- (Schroeder et al., 2011). El *flujo descendente* se asocia directamente con la función logística de cada organización en la cadena, dado que en este flujo se mueven y almacenan los materiales que se transformarán en unidades de producto final, así como la información relacionada a estos que permite concretar las ventas (Schroeder et al., 2011). Con relación al *flujo ascendente*, este facilita la consecución de información para propósitos de planeación, así como la devolución de unidades defectuosas y de artículos reciclables, lo cual requiere de la logística inversa como función encargada del movimiento, almacenamiento y eliminación de bienes que son devueltos por los clientes dado que ya no son utilizables por ellos (Schroeder et al., 2011).

Dicho lo anterior, Schroeder et al. (2011) definen la **gestión de la cadena de suministro** (GCS) como el diseño, planeación y control de los procesos que agregan valor a través de fronteras organizacionales, con el fin de garantizar el flujo eficiente y eficaz de materiales e información para satisfacer las necesidades de los clientes finales y generar mayores beneficios a las organizaciones participes en la cadena, comparado con lo que sería desde su actuar individual. Así, se hace explícita la filosofía de sistemas presente en el área al considerar que la cadena de suministro es un sistema altamente interactivo (Schroeder et al., 2011).

**4.4.1.1. GCS sostenible.** De acuerdo con Gamboa et al. (2020), la GCS sostenible hace referencia a la integración y logro de objetivos en las dimensiones económica, ambiental y social, a través de una coordinación sistémica de los procesos de negocio interorganizacionales. En su diseño, es importante evitar caer en la tradicional minimización de impactos ambientales y sociales a la vez que se maximiza el desempeño económico, puesto que podría variar en función de los elementos que se consideren para cada dimensión (Gamboa et al., 2020).

En la *dimensión económica*, por ejemplo, es posible abordar (i) el crecimiento continuo del valor total, (ii) la reducción de costos de la cadena de suministro -desde la perspectiva de la gestión del negocio-, e (iii) iniciativas estratégicas y sostenibles que impulsen las finanzas y el marketing de la compañía. Dentro de la *dimensión ambiental*, es posible involucrar las emisiones de GEI, el vertimiento o disposición final y los residuos ambientales, con un enfoque en la capacidad de los ecosistemas para continuar proporcionando bienes y servicios. En relación con la *dimensión social*, se aborda la responsabilidad social corporativa, que ha de reflejarse en la ética en la toma de decisiones, la relación con los empleados, la participación de la comunidad, las buenas prácticas de gestión del negocio y el fomentar la educación y el talento de la gente.

**4.4.1.2. GCS inversa.** La GCS inversa se define como la coordinación de los procesos y flujos de material e información que permiten la extensión de la cadena de suministro de los proveedores de productos con vida útil deteriorada (o de residuos) a un eslabón de la cadena capaz de reincorporarlo a su proceso y de agregarle valor (Cabeza, 2012).

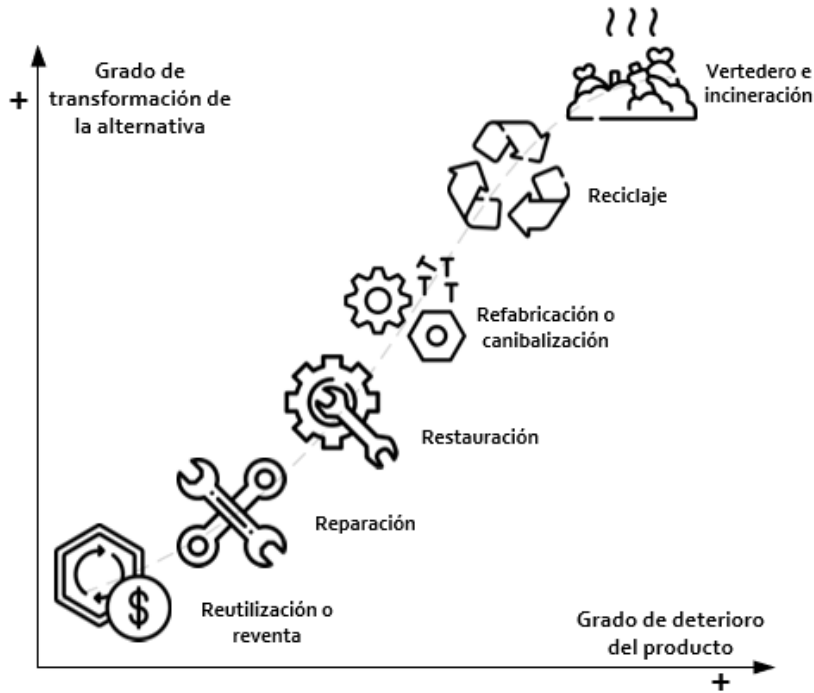
Para Cabeza (2012) existen seis alternativas para reincorporar el producto a la cadena de suministro, esto en función de su grado de utilización/deterioro. La primera alternativa es la *reutilización o reventa*, en donde el producto se somete a limpieza y mantenimiento de modo tal

que se asemeje a un producto nuevo. La segunda es la *reparación*, que busca devolver el funcionamiento a un producto mediante la sustitución de algún componente que se haya averiado. En tercer lugar, la *restauración* consiste en devolver el funcionamiento al producto pero ampliando su vida útil, valor y funcionalidad. En cuarta instancia, la *refabricación* (a) y *canibalización* (b) se centran en obtener componentes para procesos de remanufactura, bien sea desde productos deteriorados (a) o inservibles (b), para la elaboración de un producto similar (a) o para su incorporación en otro distinto (b). En quinto lugar, el *reciclaje* se centra en la recuperación de materiales residuales de los productos con el fin de transformarlos en materia prima para nuevos productos. Por último, el *vertedero* (c) e *incineración* (d) consisten en dar tratamiento a productos que no siguieron los flujos anteriores a través del enterramiento controlado de los mismos (c) o de un proceso de combustión controlada a altas temperaturas con el fin de obtener calor (d).

A modo de síntesis, en la Figura 5 se presentan las seis alternativas en función del grado de utilización/deterioro de los productos que se dirigen a ellas y del grado de transformación que tendría lugar. Vale la pena mencionar que las particularidades de cada alternativa hacen que se requiera de estrategias de gestión diferenciada para cada una de ellas (Cabeza, 2012).

**Figura 5.**

*Alternativas para incorporar los residuos a la cadena de suministro*



*Nota.* Adaptado de la información presentada por Cabeza (2012). Diseñado con recursos de Flaticon.com

#### 4.4.2. Diseño de la cadena de suministro

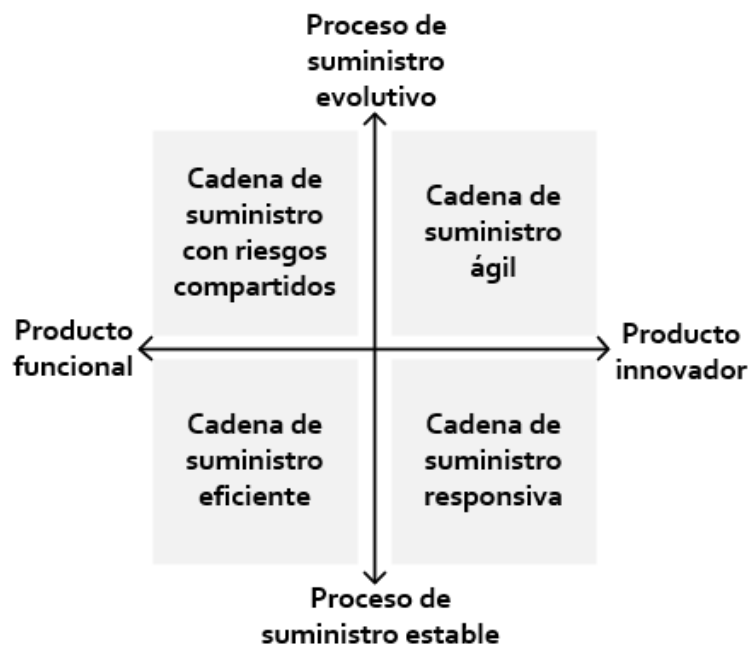
De acuerdo con Chase et al. (2009), la estrategia de diseño de la cadena de suministro se centra en elegir la cadena que mejor se ajuste a las características de incertidumbre de la demanda y del proceso de suministro. La **incertidumbre de la demanda** depende de sí el producto es funcional o innovador. El *funcional* corresponde a aquellos que satisfacen necesidades básicas, tienen una demanda estable y predecible, y no cambian mucho con el paso del tiempo, es decir, cuentan con poca variedad. Por otra parte, el *innovador* se caracteriza por ciclos de vida cortos, demanda variable y difícil de proyectar, y mucha variedad.

Por otra parte, la **incertidumbre del proceso de suministro** responde a la madurez del proceso de manufactura, la tecnología subyacente y la base de suministro; cuando la madurez de estas es alta se habla de un proceso de suministro *estable*, de lo contrario, de uno *evolutivo*. En este último, la base de suministro se encuentra limitada tanto en tamaño como en experiencia, las divisiones y producciones son inciertas, y los proveedores aún hacen frente a innovaciones en sus procesos.

De este modo, de la combinación de ambos tipos de incertidumbre Chase et al. (2009) establecen cuatro tipos de cadena de suministro ideal, las cuales se presentan en la Figura 6.

### Figura 6.

*Clasificación de la cadena de suministro ideal*



*Nota.* Adaptado de Chase et al. (2009).

De acuerdo con la Figura 6, la **cadena de suministro eficiente** es útil para productos funcionales con procesos de suministro estables, como por ejemplo el mercado de petróleo, gas y alimentos, para los cuales la estrategia a implementar se debería orientar a la disminución de costos.

La **cadena de suministro responsiva**, útil para productos innovadores con procesos de suministro estables, se puede encontrar en los mercados de ropa de moda y computadores, para los cuales las estrategias se deberían orientar a la flexibilidad para responder a las necesidades cambiantes y diversas de los clientes.

La **cadena de suministro con riesgos compartidos**, útil para productos funcionales con procesos de suministro evolutivos, se puede encontrar en el mercado de energía hidroeléctrica o productos alimentarios especiales, para los cuales las estrategias se deberían orientar a reunir y compartir los recursos y riesgos, con tal de evitar las interrupciones en el suministro.

Finalmente, la **cadena de suministro ágil**, útil para productos innovadores con procesos de suministro evolutivos, se evidencia en el mercado de telecomunicaciones y computadores de alto nivel, para los cuales las estrategias a implementar agrupan aquellas de la cadena de suministro con riesgos compartidos y la responsiva, es decir, evitar las interrupciones en el suministro y flexibilidad.

#### ***4.4.3. Mejoramiento del desempeño de la cadena de suministro***

De acuerdo con Schroeder et al. (2011) el objetivo de mejorar la cadena de suministro es facilitar la coordinación creciente de la cadena para reducir la incertidumbre y el costo total de abastecer el mercado. Para lograr dicho objetivo, es posible acudir a cambios estructurales y/o a

cambios infraestructurales a partir de los cuales se debería influir en aspectos como las entregas, calidad, flexibilidad, costos y tiempo.

El mejoramiento a través de *cambios estructurales* está representado en iniciativas como la integración vertical; la simplificación mayor de los procesos; la reconfiguración de almacenes, fábrica y puntos de distribución; el rediseño profundo del producto; y la tercerización del servicio logístico.

En complemento, el mejoramiento a través de *cambios infraestructurales* se orienta al “lado blando” de la cadena, es decir, a cambiar la manera en cómo se opera dentro de la estructura existente. Medios para ello son los equipos interfuncionales; la reducción en los tiempos de preparación de maquinaria; asociaciones; sistemas de información; plataformas cruzadas de carga y descarga; y propender por la alineación de los incentivos.

Frente a este último, Narayanan & Raman (2004) exponen que, de hecho, una cadena de suministro funciona bien siempre que los incentivos de las empresas que la componen se encuentren alineados, esto es, que los riesgos, costos y recompensas de hacer negocios estén distribuidos equitativamente a lo largo de la red, de modo tal que las empresas encuentren motivación en jugar el juego en que todos ganan, es decir, en actuar de maneras que maximicen las utilidades de la cadena.

Adicionalmente, los autores afirman que es posible que pequeños cambios en los incentivos transformen rápidamente las cadenas de suministro. Para hacerlo resulta útil acudir a: la modificación de contratos para premiar a los socios por actuar en el interés de la cadena; usar intermediarios o relaciones personales para desarrollar la confianza entre los socios (algo bastante

complejo); y recabar o compartir información que antes estaba oculta. Ello implica desarrollar un genuino interés acerca de los procesos e incentivos de cada organización, revisándolos cada vez que alguna adopte nuevas tecnologías, ingrese a nuevos mercados o lance programas de mejoramiento, pues el 99% de lo que falla en los sistemas es por falta de información o por información defectuosa (Meadows, 2019).

## 5. Metodología

La metodología de dinámica de sistemas para el modelado y la simulación es un marco de trabajo flexible que varía de acuerdo con la experticia y creatividad del modelador, y con el propósito del modelo (Sterman, 2000). Para este trabajo de carácter académico-investigativo se adapta junto con la metodología de **complejidad creciente** empleada por Andrade et al. (2001), la cual permite iniciar la representación del fenómeno en términos de los elementos fundamentales e ir ganando detalle y cobertura a medida que se incluyen, desagregan y clarifican las relaciones de más elementos, a través del uso del sistema de cinco lenguajes (o herramientas) en un proceso de modelado iterativo.

La primera etapa consiste en la **conceptualización del fenómeno**, en la cual se formula una explicación sobre la situación de interés con base en la información disponible sobre la misma. Tal explicación recibe el nombre de hipótesis dinámica y hace uso de los lenguajes de prosa, influencias y flujo-nivel. Allí, se presenta una explicación sobre la operación insostenible del SGRSU en el contexto de Floridablanca, Colombia, aprovechando la cercanía a este. Luego, en la segunda etapa se lleva a cabo la **simulación del modelo**, lo que corresponde al lenguaje de ecuaciones y comportamiento simulado. Para ello, se emplea el software *Vensim PLE* y se hace

necesario recurrir a habilidades matemáticas que permitan la formulación de relaciones entre las variables y la representación de sus comportamientos.

La tercera etapa consiste en el **testeo**, la cual abarca la verificación y validación, y habilita el modelado iterativo. En ello, toma relevancia la disponibilidad de datos sobre el contexto de Floridablanca o, en su defecto, de otras ciudades de Colombia; además de la claridad del modelador sobre las tendencias cualitativas que las variables deben reflejar. Finalmente, al contar con un modelo confiable se procede al **diseño y evaluación de políticas**, la cual consiste en la modificación de las variables palanca, y el análisis de su impacto en las variables medidas de desempeño, con el fin de determinar cuál es la mejor manera de intervenir el sistema actual. La representación de la metodología a seguir se ilustra en la Figura 7.

**Figura 7.**

*Metodología implementada*



## 6. Revisión de la literatura

La GRSU es uno de los problemas más inmediatos y serios que enfrentan los gobiernos de economías en desarrollo (Sukholthaman & Sharp, 2016; Breukelman et al., 2019), debido a la multiplicidad de actores y dimensiones que se deben tener en cuenta. Lo anterior, ocasiona el fracaso de las soluciones planteadas desde perspectivas aisladas y estáticas (Di Nola et al., 2018), haciendo que la metodología de dinámica de sistemas se posicione como una estrategia viable para hacer frente a tal complejidad (Chang et al., 2011; Breukelman et al., 2019; Sancheta et al., 2021).

Algunos autores abordan el fenómeno con un interés principal en **aspectos operativos** clásicos del SGRSU, aplicando la dinámica de sistemas a los componentes de un sistema tradicional. Tal es el caso de Sukholthaman & Sharp (2016) quienes modelan la influencia de la tasa de separación en la fuente en la eficiencia de los servicios de recolección y transporte de Bangkok, Tailandia. A partir del modelo desarrollado, simulan seis escenarios en cada uno de los cuales emplean una tasa de separación diferente para residuos reciclables y orgánicos, bajo el supuesto de que estas se alcanzan con la voluntad ciudadana o con imposición de normas. Así, encuentran que una mayor tasa conlleva a una menor cantidad de residuos destinados a vertedero y ello deriva en un menor costo de gestión y en una mayor eficiencia del servicio de recolección y transporte.

Con un enfoque similar, Di Nola et al. (2018) se interesan en modelar la capacidad de las alternativas de tratamiento disponibles en Campania, Italia, evaluando cuatro escenarios en los que varían la tasa de separación objetivo y modifican la capacidad de los tratamientos existentes; encontrando que las políticas que conllevan al aumento de la tasa de recogida selectiva minimizan

la capacidad requerida adicional del vertedero, aspecto necesario para lograr la autosuficiencia regional.

Desde otra vertiente, Xiao et al. (2020) modelan la relación de las políticas económicas, demográficas, de clasificación y de tratamiento establecidas por el gobierno chino para la GRSU de Shanghái, a partir de lo cual evalúan siete escenarios en los que modifican y combinan parámetros asociados a las políticas, encontrando que la mayor reducción en la generación de residuos se obtiene al disminuir un 1% la tasa de crecimiento de la producción interna bruta.

Asimismo, en el interés por predecir la operación del sistema, Retuerto et al. (2021) simulan la cantidad de residuos generados, reciclados y vertidos en Lima, Perú; mientras que Rafew & Rafizul (2021) -con un mayor alcance- predicen la operación del sistema con el ánimo de identificar retos económicos y alternativas políticas para implementar en Khulna, Bangladesh, señalando la importancia de aumentar el presupuesto para los sistemas de recolección y tratamiento en conjunto.

Por otra parte, un grupo de autores abordan el fenómeno con un interés especial en los **aspectos económicos** que rodean el SGRSU, como se observa en Ibarra et al. (2010), quienes orientan su modelo a demostrar el beneficio económico de la regionalización en la gestión de los residuos en Bogotá, Colombia, encontrando que la rentabilidad del sistema depende del número de suscriptores. Y, de manera más amplia, Pinha & Sagawa (2020) quienes se enfocan en plasmar la estructura de costos del sistema de Araraquara, Brasil, con el ánimo de contar con una herramienta para la planeación del sistema. Estos simulan seis escenarios en los que plasman expectativas de las partes interesadas alrededor de la tasa de separación en la fuente, la implementación del compostaje y productividad en las cooperativas de reciclaje, encontrando que

los ingresos por venta de materiales reciclables no cubren los gastos de operación, lo que hace al sistema dependiente de los subsidios gubernamentales. En efecto, los autores encontraron hallazgos similares en otros tres trabajos, lo que indica que el SGRSU no alcanza por sí mismo la sostenibilidad financiera pese a los diferentes medios para obtener ingresos.

Ahora, si bien Pinha & Sagawa (2020) incorporan al modelo la presencia de las cooperativas de reciclaje, resaltando la participación de los recicladores, este **aspecto social** es abordado con mayor énfasis en Hernández y Grajales (2014), quienes buscan conocer el efecto de la población recicladora en la vida útil del relleno sanitario de Santiago de Cali, Colombia, encontrando que la labor de los recicladores aumenta la vida útil del relleno en dos años. En la misma línea, Vélez & Mora (2016) se interesan por modelar los beneficios del proceso de formalización del sector informal del reciclaje en el Área Metropolitana de Medellín, Colombia, confirmando que se genera una cantidad atractiva de ingresos y flujo de caja para el sistema, y que disminuye la cantidad de residuos reciclables que llegan al vertedero.

En última instancia, algunos autores reflejan un mayor interés por abordar **aspectos ambientales** relacionados con el fenómeno. Solano & Redondo (2010) modelan la relación de la generación de residuos con la calidad ambiental, presentando esta como una función inversa de la cantidad de residuos y analizando que la disminución en la calidad siempre existirá por la acción de la población. De manera similar, Rodríguez & Ibarra-Vega (2017), más allá de la mera generación, modelan la influencia de toda la GRSU en el índice de calidad ambiental urbana definido por la alcaldía de Bogotá, Colombia.

Con un alcance mucho mayor, Lu et al. (2021) analizan la factibilidad ambiental y económica de las opciones de tratamiento disponibles en el sureste de la cuenca del Lago Tai en

China, haciendo uso del análisis del ciclo de vida. Los autores simulan siete escenarios en los cuales fijan distintas distribuciones porcentuales para los residuos a compostar, verter o incinerar, a partir de lo cual encuentran que las plantas de incineración permiten preservar la capacidad del vertedero por una década, emitir menos GEI, recuperar más energía y obtener beneficios económicos. Caso aparte, Dianati et al. (2021) se interesan por simular la emisión de gases de efecto invernadero a lo largo de la cadena de residuos en Kisumu, Kenia. Los autores simulan escenarios en los que suponen los efectos que tendrían la implementación de una iniciativa de conversión de residuos en biogás y una prohibición reglamentaria de la quema a cielo abierto de residuos en vertederos, encontrando que la combinación de estas dos intervenciones puede ahorrar más de 1,1 millones de toneladas de emisiones de GEI para 2035.

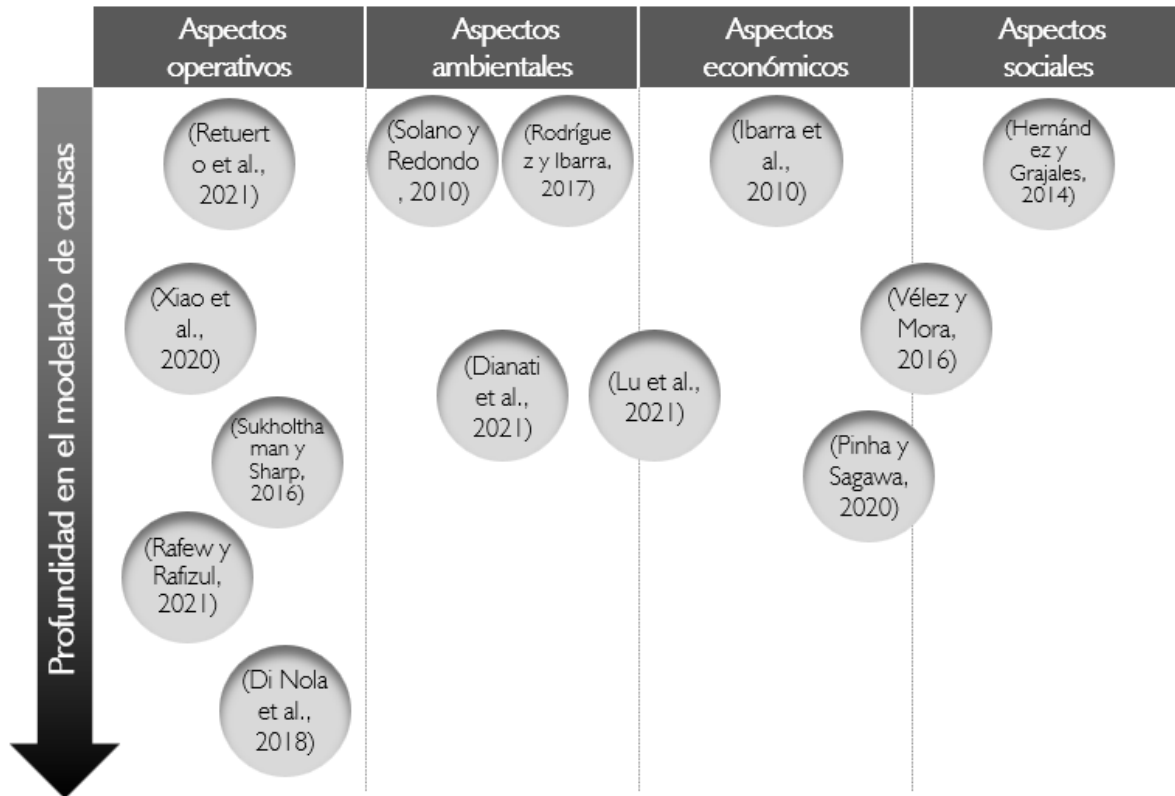
De este modo, aunque los autores evitan los reduccionismos al no enmarcarse únicamente en uno de los aspectos mencionados antes, se observó que muy pocos usaron medidas de desempeño que abarcaran los cuatro aspectos: la mayoría de ellos incluyen medidas tradicionales -como la cantidad de residuos generados-, pero pocos complementan con medidas sociales -como la cantidad de población recicladora formalizada (Vélez & Mora, 2016)-, o con medidas económicas -como los ingresos y costos de las alternativas modeladas (Vélez & Mora, 2016; Lu et al., 2021)-, o con medidas ambientales, -como las emisiones de GEI (Lu et al., 2021)-.

A la luz de tal hallazgo, resulta útil extrapolar el análisis de Breukelman et al. (2019) en donde se afirma que en el estudio de la GRS se erra a falta de una visión lo suficientemente holística, lo que implica que constantemente se realicen las mismas afirmaciones dando la impresión de que ya se conoce todo lo que hay que saber sobre el tema. Además, los autores exponen que en este campo investigativo no se diferencia claramente entre síntomas y causas

subyacentes, ocasionando que se planteen intervenciones erróneas, por ejemplo, al considerar la falta de recursos, infraestructura, conciencia y fortaleza institucional como causas, cuando en realidad son síntomas de unas causas más profundas, lo que evidencia que el diagnóstico del fenómeno se considera demasiado complejo (Breukelman et al., 2019).

Tal complejidad aterrizada al proceso de modelado con dinámica de sistemas se podría traducir a la dificultad para incorporar en los modelos bucles que reflejen la superación de las inercias y la presencia de las causas subyacentes; de hecho, este aspecto únicamente se evidenció en dos artículos. Uno es el elaborado por Di Nola et al. (2018), quienes logran incorporar a su modelo la dinámica causal alrededor de la tasa de separación en la fuente, cuantificándola en función del cambio generado por la diferencia entre la tasa actual y una tasa objetivo, y por la influencia política que resulta de la variación en la capacidad del vertedero. El segundo corresponde al de Rafew & Rafizul (2021), quienes proponen una cuantificación de la alteración que produce la preocupación pública y el nivel de ingresos en la generación de residuos.

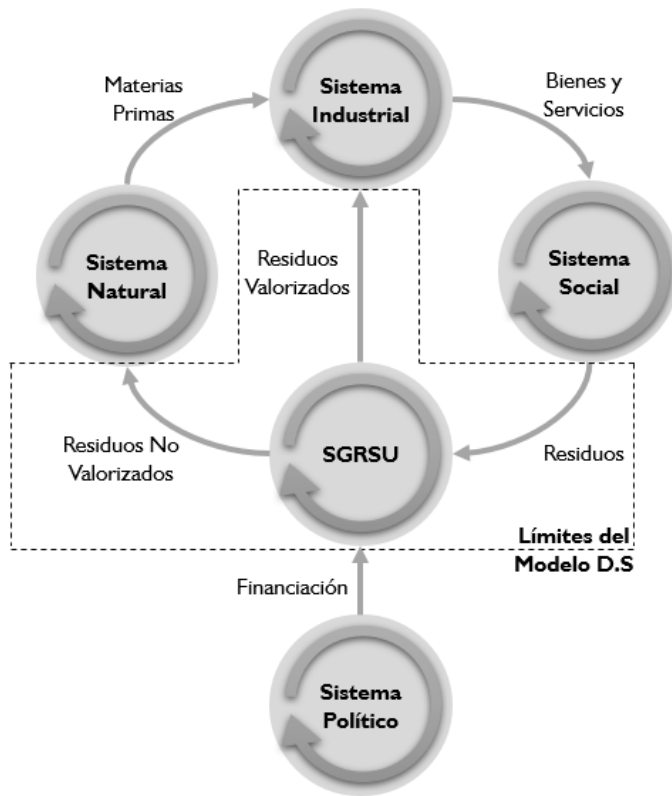
A modo de síntesis, la Figura 8 clasifica los artículos a la luz de lo antes discutido, es decir, en función de su enfoque principal y del grado de profundidad en el modelado de las causas.

**Figura 8.***Síntesis de la revisión de la literatura*

Adicionalmente, en el Apéndice A se detalla el análisis bibliométrico realizado como ejercicio preliminar a la investigación; y en el Apéndice B se relaciona el detalle de la revisión realizada, mencionando aspectos relevantes de la conceptualización y características del modelo como variables de nivel y medidas desempeño empleadas.

### **7. Conceptualización de un SGRSU**

A partir del marco teórico y la revisión de la literatura, se tiene que el SGRSU es uno interdependiente de los sistemas natural, industrial, social y político, que se ve influenciado por sus relaciones y dinámicas propias. No obstante, intentar plasmar este macrosistema en el que se enmarca el fenómeno implica un modelo matemático extenso, que requiere de un arduo trabajo en la búsqueda de datos y elaboración de ecuaciones y supuestos, razón por la cual, en la Figura 9 se limita la conceptualización a aquellos elementos que mejor se alinean con el planteamiento del problema.

**Figura 9.***Limitación del fenómeno al problema de interés*

A partir de tal limitación, se elabora el diagrama de influencias de la Figura 10, el cual contiene 19 variables que conforman 4 ciclos de balance y 5 de refuerzo, presentándose en la Tabla 2 la relación de las variables con los sistemas de la Figura 9. Además, en la Tabla 3 se indica el sustento de cada variable en el diagrama, señalando su relación con alguno de los artículos consultados, o su origen en los análisis emergentes a la luz del criterio propio.



**Tabla 2.***Relación de las variables del diagrama de influencias con los demás sistemas*

Variable	Macrosistema
Aprovechamiento de orgánicos	SGRSU
Aprovechamiento de residuos	SGRSU
Capacidad requerida del relleno sanitario	SGRSU
Generación de residuos	SGRSU
Mercado del reciclaje	SGRSU
Requerimientos de inversión	SGRSU
Tarifa de aseo	SGRSU
Tasa de separación en la fuente	SGRSU
% Residuos aprovechables	Sistema Industrial
Empresas comprometidas con prácticas RSE	Sistema Industrial
Calidad ambiental	Sistema Natural
Destinación de dineros del presupuesto	Sistema Político
Disponibilidad de recursos para otros proyectos	Sistema Político
Empleo Formal	Sistema Político
Subsidio a la tarifa	Sistema Político
Calidad social	Sistema Social
Cambio poblacional	Sistema Social
IDH	Sistema Social
Población	Sistema Social

**Tabla 3.***Sustento de las variables empleadas en el diagrama de influencias*

Variable	(Sukholthaman y Sharp, 2016)	(Di Nola et al., 2018)	(Xiao et al., 2020)	(Rafew y Rafizul, 2021)	(Ibarra et al., 2010)	(Pinha y Sagawa, 2020)	(Rodríguez & Ibarra, 2017)	(Lu et al., 2021)	(Dianati et al., 2021)	(Hernández & Grajales, 2014)	(Vélez y Mora, 2016)	(Montes, 2021).	Parra (2021)	Análisis emergente
% Residuos aprovechables						X								
Aprovechamiento de orgánicos	X		X			X		X	X					
Aprovechamiento de residuos	X			X		X		X	X	X	X			
Calidad ambiental							X		X					
Calidad social										X	X			
Cambio poblacional	X	X	X	X		X		X		X				
Capacidad requerida del relleno sanitario	X	X	X	X	X			X	X	X	X			
Destinación de dineros del presupuesto	X			X	X									
Disponibilidad de recursos para otros proyectos														X
Empleo Formal						X					X			
Empresas comprometidas con prácticas RSE														X
Generación de residuos	X	X				X		X		X				
IDH														X
Mercado del reciclaje						X				X				
Población	X	X	X	X		X		X		X				
Requerimientos de inversión														X
Subsidio a la tarifa												X	X	
Tarifa de aseo												X	X	
Tasa de separación en la fuente	X	X				X				X				

Adicionalmente, para un mejor entendimiento del diagrama, en la Tabla 4 se presenta la lectura que de cada ciclo se realiza.

**Tabla 4.***Explicación del diagrama de influencias*

Bucle	Prosa
B1	A mayor capacidad requerida del relleno sanitario, mayor será la población empleada en esta labor, ello aumenta el IDH, lo que hace que aumenten las posibilidades de las empresas para comprometerse con prácticas RSE, lo que hará que se produzcan más residuos de categoría aprovechable y por ende se aumente el aprovechamiento, lo que a su vez disminuiría la capacidad del relleno sanitario y con ello disminuye la necesidad de emplear población para esta labor.
B2	A mayor capacidad requerida del relleno sanitario, menor será la calidad ambiental, menor será el IDH, menor serán las posibilidades de las empresas para comprometerse con iniciativas RSE, por ende, menor será la cantidad de residuos categorizados como aprovechables, lo que limita la cantidad de aprovechamiento, limitando también la consolidación del mercado de reciclaje, implicando un menor requerimiento de inversión, haciendo que hayan más recursos disponibles para otros proyectos, potenciándose el aprovechamiento de orgánicos, lo que disminuye la capacidad requerida del relleno sanitario y genera una mejora en la calidad ambiental
B3	A mayor aprovechamiento de orgánicos, más requerimientos de inversión, menor disponibilidad de recursos, por ende menos aprovechamiento de orgánicos.
B4	A mayor disponibilidad de recursos, mayor subsidio a la tarifa, menor valor de la tarifa de aseo, más tasa de separación en la fuente, más aprovechamiento de residuos, mayor consolidación del mercado del reciclaje, mayores requerimientos de inversión para el sector, menor disponibilidad de recursos, por ende menor subsidio a la tarifa.
R1	A mayor población mayor será el cambio poblacional, y a mayor cambio poblacional mayor será la población
R2	A mayor capacidad requerida del relleno sanitario, menor será la calidad ambiental, menor será el IDH, menor serán las posibilidades de las empresas para comprometerse con iniciativas RSE, por ende, menor será la cantidad de residuos categorizados como aprovechables, lo que limita la cantidad de aprovechamiento y ello hace que se demande más capacidad del relleno sanitario.
R3	A mayor capacidad requerida del relleno sanitario, mayor será la población empleada, ello aumenta el IDH, lo que hace que aumenten las posibilidades de las empresas para comprometerse con prácticas RSE, lo que hará que se produzcan más residuos de categoría aprovechable y por ende se aumente el aprovechamiento, consolidándose el mercado del reciclaje, y demandando más inversión para el sector, lo que implica menor disponibilidad de recursos para otros proyectos, es decir, menor aprovechamiento de orgánicos, y por ende mayor capacidad requerida del relleno sanitario.
R4	A mayor calidad social, mayor IDH, más probabilidades de que las empresas se comprometan con prácticas RSE, mayor porcentaje de residuos aprovechables, mayor aprovechamiento de residuos, mayor mercado del reciclaje, mayor calidad social, que deriva en mayor IDH.
R5	A mayor subsidio a la tarifa, menor tarifa de aseo y a menor tarifa más subsidio a la tarifa se hace necesario.

Ahora bien, la anterior explicación sobre el fenómeno contiene grandes supuestos. En primer lugar, se emula un contexto con alta cobertura de las necesidades básicas a través de la variable IDH, y se propone que una empresa con participación en tales contextos contará con

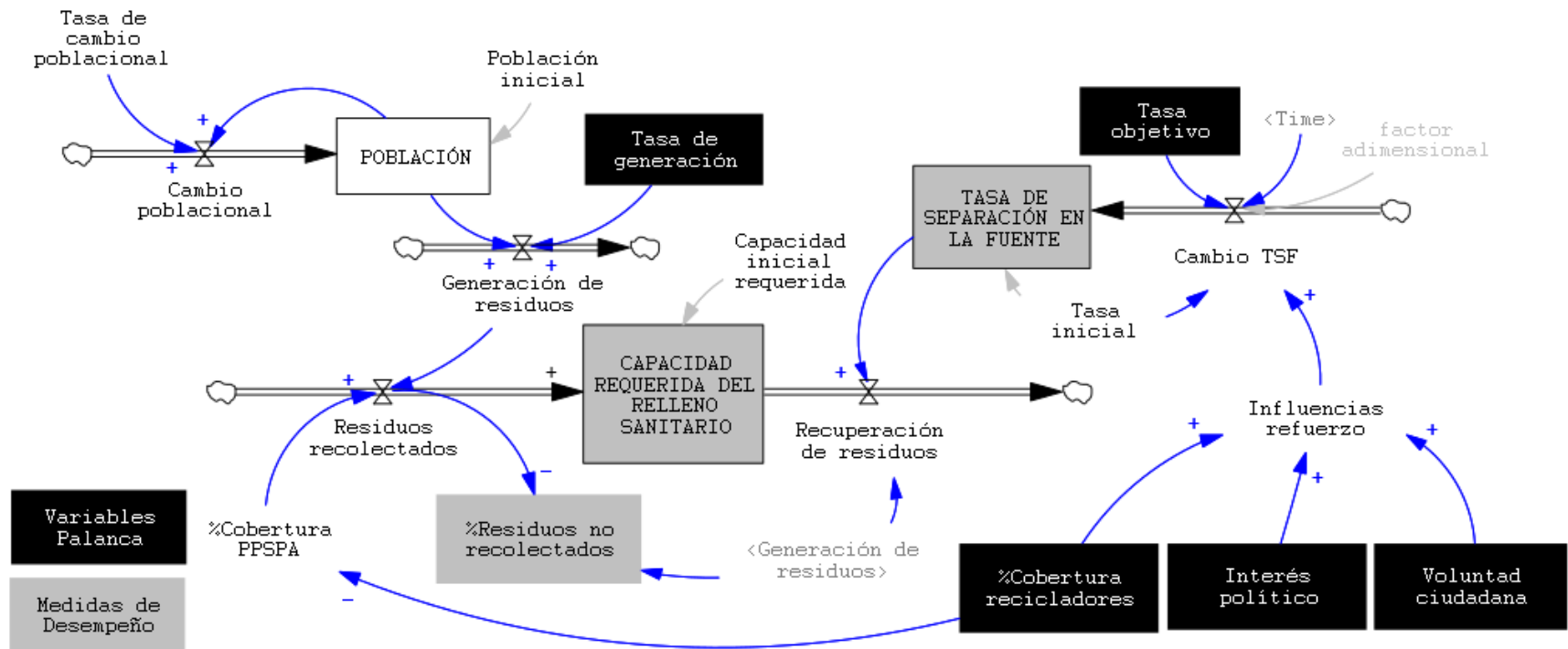
fuertes iniciativas de RSE que la lleven a re concebir sus productos pensando en la gestión del residuo que se generará (esto es, aumentar el porcentaje de residuos que son categorizados como aprovechables). En segundo lugar, que los recursos de inversión son limitados y pueden ser usados para la consolidación del mercado de reciclaje, iniciar proyectos de aprovechamiento de orgánicos (teniendo en cuenta que este se genera en mayor porcentaje) y en subsidios a la tarifa de aseo. No obstante, estos recursos aumentarían si se asignan más recursos del presupuesto de la ciudad. En tercer lugar, que la tarifa de aseo se comporta como un incentivo económico para que la población adopte prácticas de separación en la fuente que lleven a aumentar esta tasa, proponiéndose que a mayores valores en la tarifa, menores tasas de separación se registrarán. Finalmente, que el aumento en la capacidad requerida del relleno sanitario es el escenario prevaleciente y que ello garantiza la continuidad de beneficios económicos para un sector del sistema a cambio de la generación de empleo formal.

### **8. Modelo dinámico-sistémico**

A partir del diagrama de influencias de la Figura 10, el modelo dinámico-sistémico se construye con 3 variables de nivel, 5 variables de flujo, 9 variables auxiliares exógenas y 3 variables auxiliares endógenas; de entre las cuales se definen 5 variables palanca y 3 medidas de desempeño, tal y como se muestra en la Figura 11.

**Figura 11.**

*Modelo dinámico-sistémico del problema de interés*



*Nota.* Diagrama de flujo-nivel realizado con el software Vensim PLE.

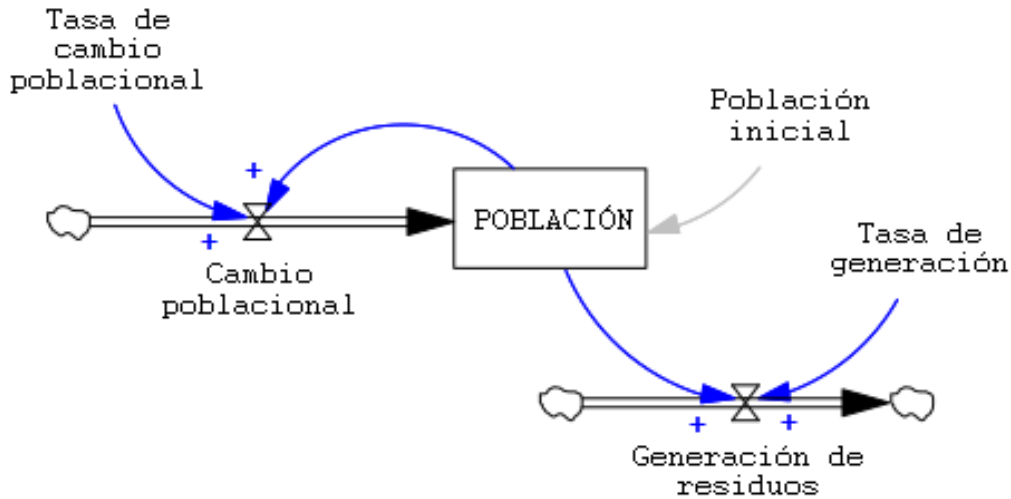
Como se puede observar, las dinámicas que se modelan son la generación de residuos, la capacidad requerida del relleno sanitario y la tasa de separación en la fuente. Las ecuaciones correspondientes se presentan en el Apéndice C.

### **8.1. Generación de residuos**

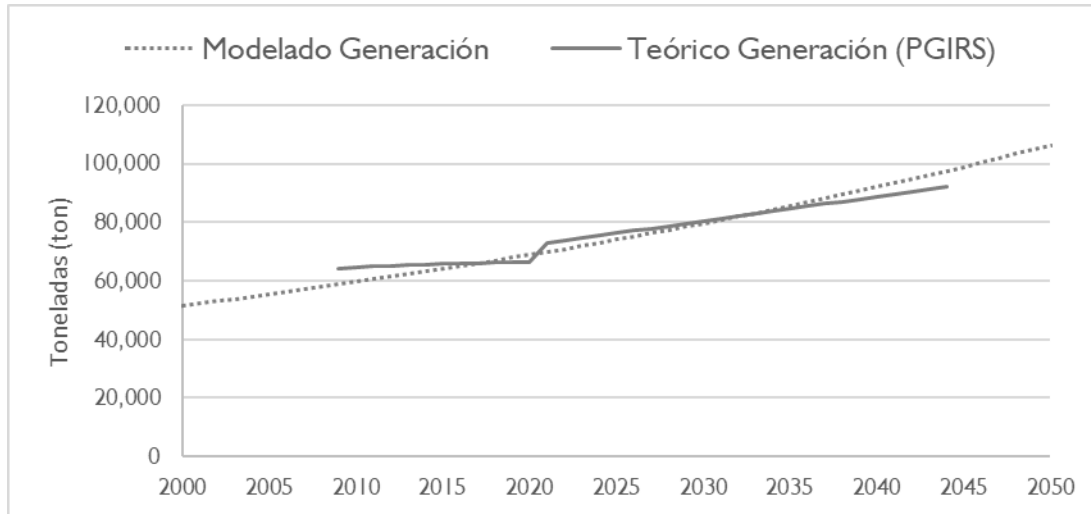
La generación de residuos se calcula a partir de la tasa de generación de residuos por habitante y el número de habitantes (Figura 12). *La tasa de generación* se asume como constante para el periodo de simulación y se le asigna el valor de 0.2475 ton/hab/año, el cual se recalcula a partir de las tasas de generación diarias calculadas por el PGIRS de Floridablanca (2015). El número de habitantes (*población*) se modela en el tiempo tomando como base el dato de población inicial (año 2000) y la *tasa de cambio poblacional*. A esta última se le asigna el valor de 0.0146 / año, la cual corresponde al promedio de las tasas de cambio calculadas entre los valores de población de cada año presentadas por el DANE para el periodo 2000-2035 a partir del censo del 2018.

**Figura 12.**

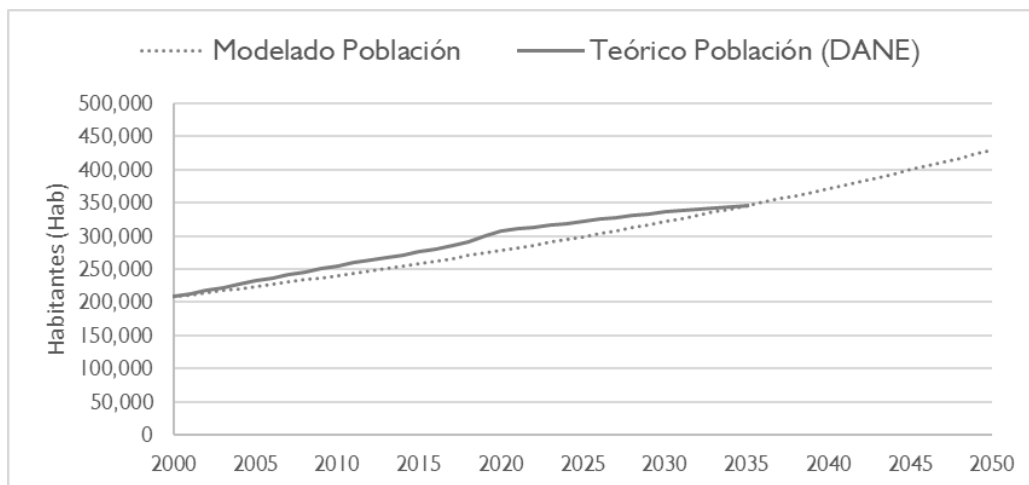
*Diagrama de flujo-nivel para la generación de residuos*



La validación de los resultados se realiza calculando el *error relativo promedio* como  $\overline{E_R} = \frac{\sum_i^n \left( \frac{|T_i - A_i|}{T_i} \right)}{n}$ , donde  $T_i$  es el valor teórico en el instante  $i$  (modo de referencia);  $A_i$  es el valor aproximado obtenido del modelo en el instante  $i$ ; y  $n$  es el total de observaciones  $i$ , es decir, la cantidad de datos disponibles. Para la variable *generación de residuos*, se validan los resultados tomando como base la serie de generación de residuos presentados por el PGIRS Floridablanca (2015), cuyo comparativo se presenta en la Figura 13. El  $\overline{E_R}$  obtenido es de 3.1%, pudiéndose validar que el modelo representa de manera aceptable el comportamiento conocido de la variable generación de residuos.

**Figura 13.***Validación de la variable generación de residuos*

Del mismo modo, la variable *población* se valida a partir de los datos presentados por el DANE (Figura 14), obteniéndose un  $\bar{E}_R$  de 5.08% y pudiéndose validar que el modelo representa de manera aceptable el comportamiento conocido de la variable población.

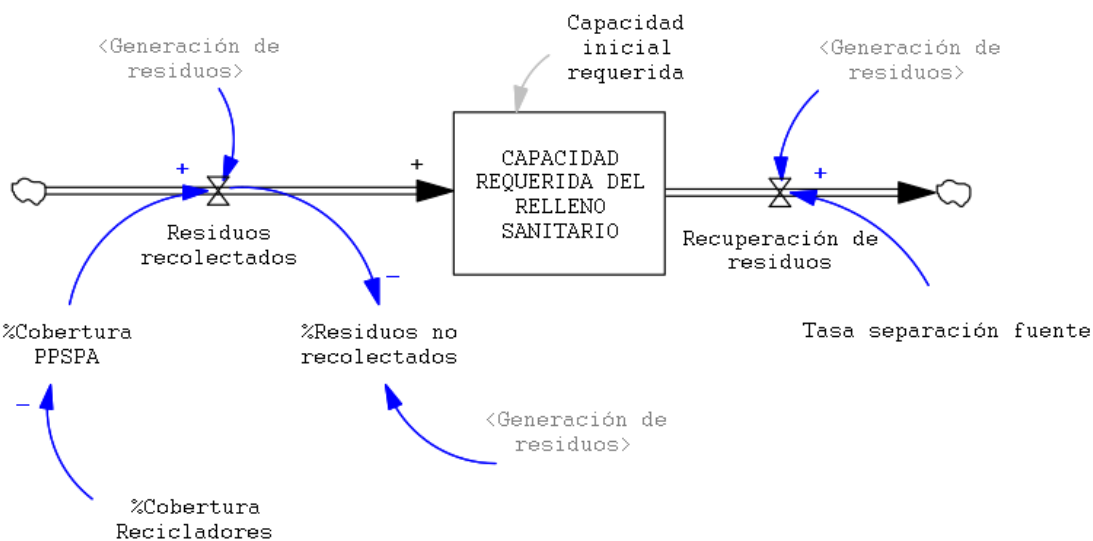
**Figura 14.***Validación variable población*

## 8.2. Capacidad requerida del relleno sanitario

La dinámica alrededor de la capacidad requerida del relleno sanitario depende de los residuos recolectados y la recuperación de estos, como se observa en la Figura 15.

**Figura 15.**

*Diagrama de flujo-nivel para el SGRSU*



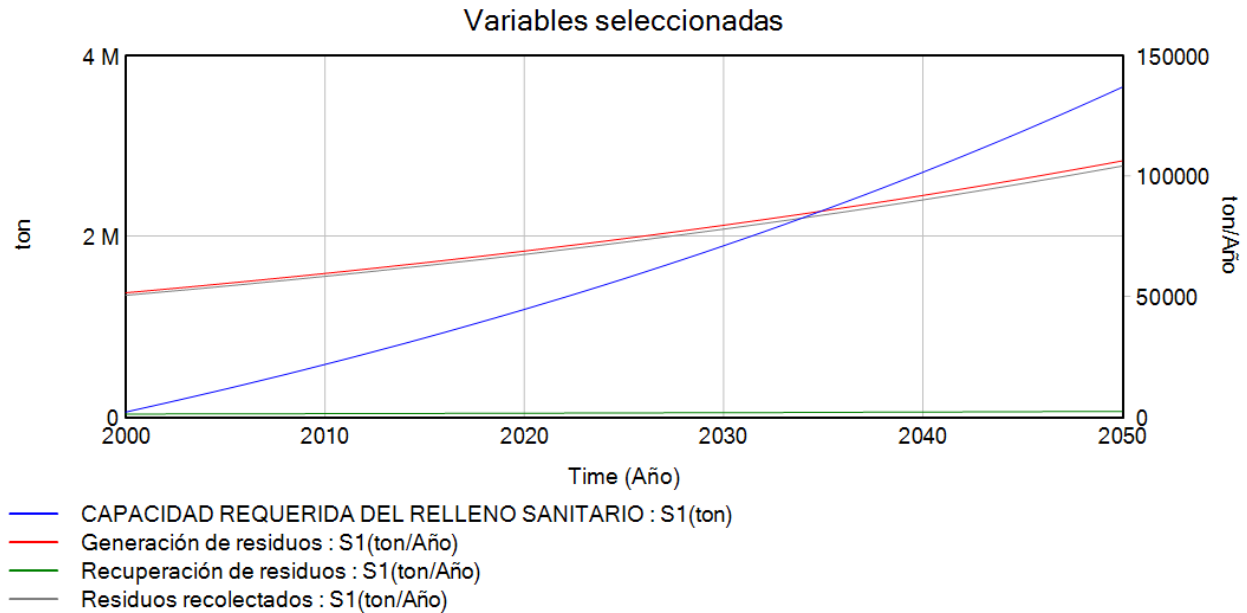
Los residuos recolectados están en función de la cobertura de las PPSPA, es decir, del alcance en la prestación del servicio que permite recolectar parte o la totalidad de los residuos generados. Al ser recolectados los residuos por las PPSPA, estos tienen como destino la disposición final, que en el contexto local es el relleno sanitario; de modo que, a mayor cantidad de residuos recolectados mayor será la *capacidad requerida del relleno sanitario*. En contraparte, la requisición de capacidad se puede amortiguar al evitarse que todos los residuos sigan este flujo, esto es, al separarse en la fuente parte de los residuos generados lo cual habilita una posterior *recuperación* y valorización. Para el modelo, el valor de la tasa de separación en la fuente se asume como 2.1% y es extraído del estudio realizado por CEMPRE (2019) para el municipio.

Adicionalmente, en el modelo se intenta reflejar la presencia de los recicladores de oficio, y se establece una relación inversa con las PPSPA del tipo  $\%Cobertura\ PPSPA = 1 - \%Cobertura\ Recicladores$ , intentando reflejar la situación competitiva en la que estos se encuentran por el manejo de los residuos, y haciendo de esta una variable independiente con la cual analizar diferentes escenarios. Además, el modelo monitorea el *porcentaje de residuos no recolectados* pues esto presupone una inadecuada disposición de estos o, en otras palabras, el aumento en el porcentaje de residuos que son dispuestos en botaderos ilegales, lo cual impacta de igual o peor manera que el aumento en la capacidad requerida del relleno sanitario.

A priori, el comportamiento cualitativo de estas variables se presenta en la Figura 16. En ella se observa el crecimiento continuo de la capacidad requerida del relleno sanitario como resultado de la creciente recolección de residuos. A su vez, se observa que la recolección de residuos es inferior a la generación de residuos, lo que implica que el porcentaje de cobertura de las PPSPA es inferior al 100% a causa de la participación de los recicladores de oficio. Por último, frente a la recuperación de residuos se observa que es una cantidad pequeña de los residuos generados, que corresponde al hecho de que la tasa de separación en la fuente es del 2.1%.

**Figura 16.**

*Comportamiento cualitativo de las variables asociadas a la capacidad requerida del relleno sanitario*

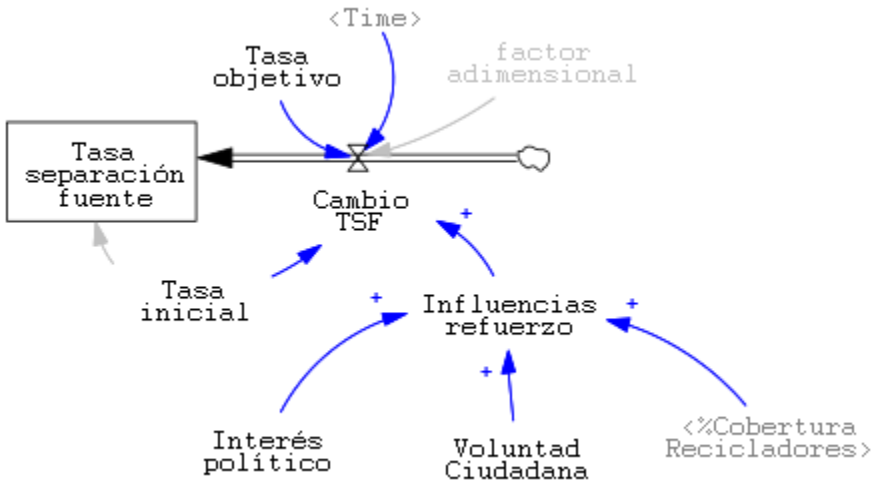


### 8.3. Tasa de separación en la fuente

Si bien en el apartado anterior se definió la tasa de separación en la fuente como una constante de valor 2.1%, resulta interesante reflejar en el modelo que esta tasa es en realidad variable al ser objeto de políticas que buscan su aumento. En razón a esto, en la Figura 17 se representa su dinámica impulsada por la definición de un objetivo (tasa objetivo) e influenciada por las variables cualitativas *voluntad ciudadana*, el *interés político* y el *porcentaje de cobertura de los recicladores*.

**Figura 17.**

Diagrama de flujo-nivel para la tasa de separación en la fuente



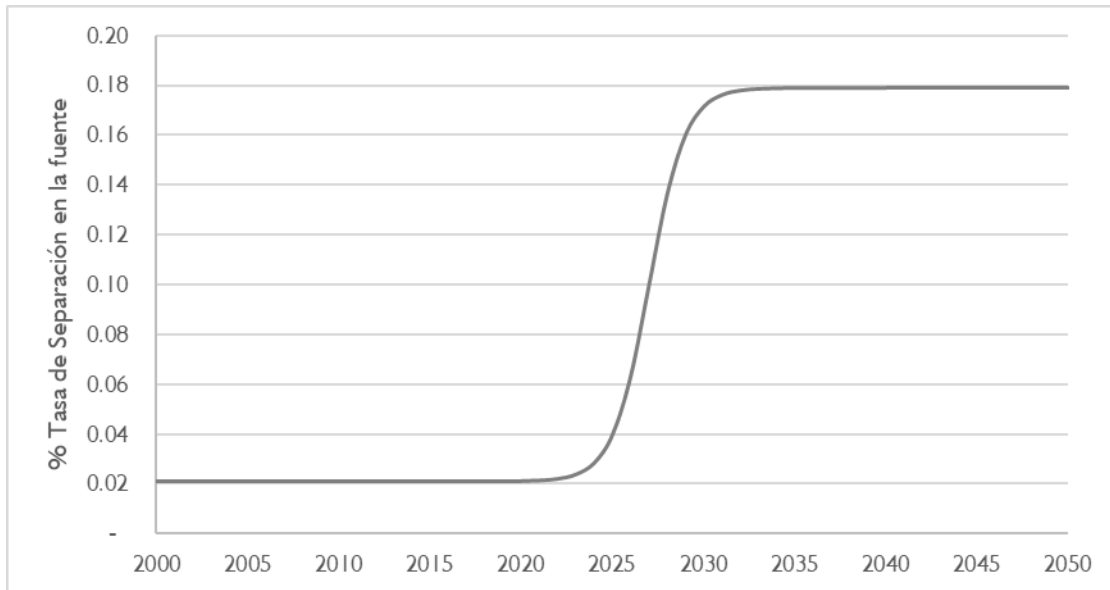
Se considera que al graficar la tasa de separación en la fuente esta debería seguir un comportamiento como el de una función logística  $f(t) = \frac{L}{1+e^{-k(t-t_0)}}$ , pues así se reflejaría (i) el estado inicial estacionario, en donde la tasa no aumenta significativamente y los esfuerzos para difundir la importancia de la separación son vanos; (ii) un estado intermedio, con un creciente aumento en la tasa, indicando que el mensaje empieza a ser aceptado y difundido por la misma sociedad; y (iii) un estado final, en donde la tasa se estancaría en un punto proporcional a la tasa objetivo definida y a los recursos invertidos en su consecución.

Ahora bien, teniendo en cuenta que en la función  $f(t)$ ,  $L$  es el límite superior o capacidad máxima de adopción,  $k$  es la tasa de crecimiento de la adopción y  $t_0$  es el punto medio que representa el tiempo de la adopción más rápida; se define la función teniendo en cuenta que en la política pública se tiene como meta a 2030 alcanzar una tasa de aprovechamiento del 17.9%. Así, se define  $f(t) = \frac{T.O-T.I}{1+e^{-k(t-t_0)}} + T.I$ , donde  $T.O$  es la tasa objetivo de 17.9%,  $T.I$  es la tasa inicial

de 2.1%,  $k$  se establece como 1 (al no contar con datos para su cálculo) y  $t_0$  como 2027, al ser un punto medio entre 2024 y 2030. De este modo, se obtiene la ecuación  $f(t) = \frac{0.158}{1+e^{-(t-2027)}} + 0.021$ , cuya forma es la presentada en la Figura 18.

### Figura 18.

*Función de la tasa de separación en la fuente*

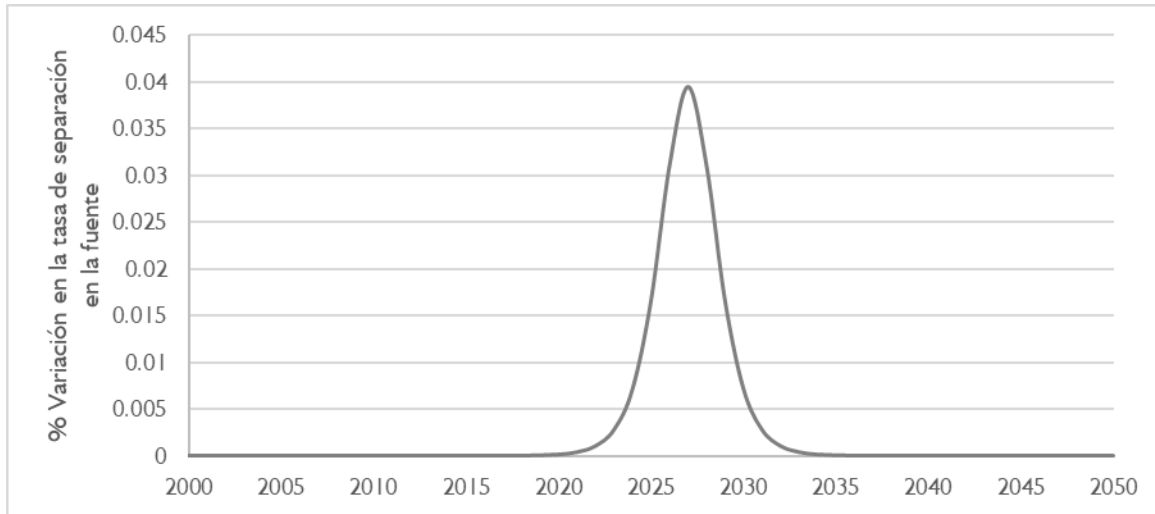


Ahora bien, dado que en el modelo (Figura 17) el comportamiento de la Figura 18 debe surgir por la influencia de la variable de cambio en la tasa de separación en la fuente (cambio TSF), se hace necesario calcularla haciendo uso de la primera derivada de la función  $f(t)$ , la cual es

$$f'(t) = \frac{0.158e^{-t+2027}}{(e^{-t+2027}+1)^2}, \text{ cuya forma se presenta en la Figura 19.}$$

**Figura 19.**

*Derivada de la función tasa de separación en la fuente*



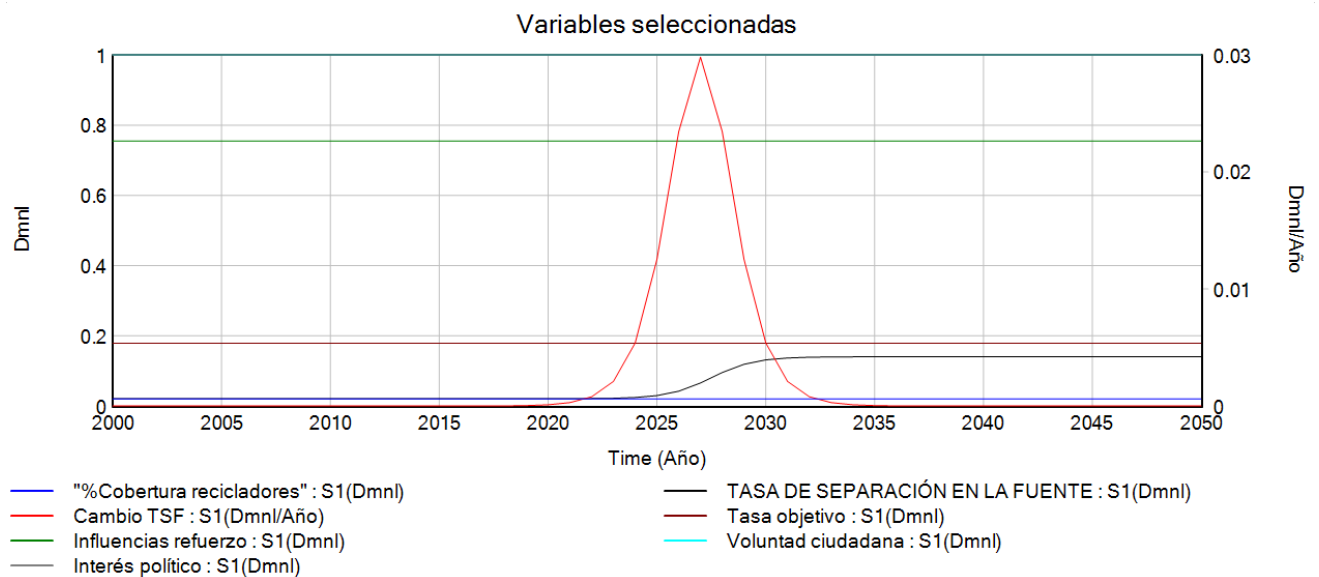
Finalmente, esta ecuación se modula con la variable *influencias de refuerzo*, que resulta de ponderar la presencia de las variables *interés político*, *voluntad ciudadana* y *porcentaje de cobertura de los recicladores*, las cuales toman valores de 0 a 1. La variable *interés político* se pondera como 5/12, reflejando la importancia de este actor y su influencia en la obtención de resultados favorables en el sistema (Babaei et al., 2015; Rodić & Wilson, 2017; Niño et al., 2017). Un valor de 0 en esta variable indicaría la total apatía del actor a intervenir el sistema, mientras que un valor de 1 el compromiso total a soportarlo. La variable *voluntad ciudadana* se pondera como 4/12 indicando que es un actor igualmente importante y que de su adopción de las iniciativas depende que el sistema mejore. Un valor de 0 indicaría a apatía total, mientras que 1 el compromiso total a contribuir y participar de las intervenciones propuestas. Finalmente, la variable *porcentaje de cobertura de los recicladores* se pondera como 3/12 y refleja la existencia de los recicladores de oficio en el sistema y la relevancia que estos tienen como impulsores de la separación en la fuente, recuperadores de materiales y habilitadores del flujo de valorización de residuos. Un valor

de 0 indicaría el no reconocimiento de estos y por ende su desconexión con el sistema, mientras que 1 el convertirlos en el foco central de la prestación del servicio público de aseo.

A priori, el comportamiento cualitativo de estas variables se presenta en la Figura 20. En ella se tiene un interés político y voluntad ciudadana de 1, y un porcentaje de cobertura de los recicladores de 2%, lo que arroja un valor de influencias de refuerzo del 0.755; siendo esta la razón por la cual la tasa de separación en la fuente no alcanza el valor de la tasa objetivo al final del periodo de simulación.

**Figura 20.**

*Comportamiento cualitativo de las variables asociadas a la tasa de separación en la fuente*



*Nota.* Figura extraída del software Vensim PLE.

## 9. Evaluación de escenarios

Para la evaluación de escenarios se tienen en cuenta las variables palanca y medidas de desempeño presentadas en la Figura 11. Si bien las medidas de desempeño no hacen alusión directa a temas de sostenibilidad, en su conjunto e interpretación se encuentra el sentido de orientación hacia una operación sostenible.

En primer lugar, en la Tabla 5 se analiza el escenario nulo. En este, las variables palanca<sup>††</sup> toman valor cero (a excepción de la tasa de generación, pues de asignarle a esta cero el modelo reflejaría el irreal estado de nula generación de residuos) y se obtiene una capacidad requerida del relleno sanitario de 3'728.340 ton y una tasa de separación en la fuente de 2.1%.

**Tabla 5.**

*Escenario de participación nula*

Escenario	Variables Palanca					Medidas de Desempeño (a 2050)		
	Tasa de generación (ton/año/hab)	Tasa objetivo (Dmnl)	% Cobertura recicladores (Dmnl)	Interés político (Dmnl)	Voluntad ciudadana (Dmnl)	% Residuos no recolectados (Dmnl)	Capacidad requerida del relleno sanitario (M ton)	Tasa de separación en la fuente (Dmnl)
S0	0.2475	0	0	0	0	0	3,728,340	2.10%

Nota. En el escenario nulo la tasa de separación en la fuente se mantiene en su valor inicial, todos los residuos son recolectados y la capacidad requerida del relleno es máxima.

<sup>††</sup> La variable palanca Tasa de generación varía únicamente en el análisis de la Tabla 7, asumiéndose como constante en los análisis de las demás tablas.

Ahora bien, en la Tabla 6 se analizan los escenarios en los que se plasma la participación de uno solo de los tres actores representados, es decir, una influencia toma valor 1 y los otros dos valores 0.

**Tabla 6.***Escenarios de participación individual*

Escenario	Variables Palanca					Medidas de Desempeño (a 2050)		
	Tasa de generación (ton/año/hab)	Tasa objetivo (Dmnl)	% Cobertura recicladores (Dmnl)	Interés político (Dmnl)	Voluntad ciudadana (Dmnl)	% Residuos no recolectados (Dmnl)	Capacidad requerida del relleno sanitario (M ton)	Tasa de separación en la fuente (Dmnl)
S1	0.2475	0	0	0	1	0%	3,742,250	1.40%
S2	0.2475	0.179	0	1	0	<b>0%</b>	<b>3,597,510</b>	<b>8.60%</b>
S3	0.2475	0	1	0	0	100%	-16,909	1.50%

Nota. Se determina que el interés político está ligado a la definición de la tasa objetivo, por lo que la presencia de estas se da en conjunto. Por otra parte, el valor negativo en la capacidad requerida del relleno sanitario se debe a la presencia positiva de la variable recuperación de residuos, y se debe interpretar como una disminución al cálculo de los residuos no recolectados.

Se observa que el escenario más sostenible se obtiene al contar con el interés político pues se logra una tasa de separación en la fuente de 8.6% con la consecuente disminución de la demanda de capacidad del relleno. Por otra parte, el escenario más insostenible se obtiene al tener una cobertura total por parte de los recicladores, pues esto implica que el porcentaje de residuos no recolectados sea del 100%, dado que estarían desplazando a las PPSPA.

Continuando el análisis, en la Tabla 7 se presentan escenarios en los que los actores actúan en conjunto.

**Tabla 7.***Escenarios de participación conjunta*

Escenario	Variables Palanca					Medidas de Desempeño (a 2050)		
	Tasa de generación (ton/año/hab)	Tasa objetivo (Dmnl)	% Cobertura recicladores (Dmnl)	Interés político (Dmnl)	Voluntad ciudadana (Dmnl)	% Residuos no recolectados (Dmnl)	Capacidad requerida del relleno sanitario (M ton)	Tasa de separación en la fuente (Dmnl)
S12	0.2475	0.179	0	1	1	<b>0%</b>	<b>3,492,850</b>	<b>13.95%</b>
S13	0.2475	-	1	0	1	100%	-2,999	0.80%
S23	0.2475	0.179	1	1	0	100%	-236,662	12.60%
S123	0.2475	0.179	1	1	1	100%	-341,322	17.90%

Nota. Los valores negativos en la capacidad requerida del relleno sanitario se deben a la presencia positiva de la variable recuperación de residuos, y se deben interpretar como una disminución al cálculo de los residuos no recolectados.

Si bien con el escenario S123 se obtiene la tasa de separación la máxima (17.9%), esto implica que el porcentaje de residuos no recolectados también lo sea (100%). En razón a esto, el escenario más sostenible corresponde al S12, en donde la presencia del interés político y la voluntad ciudadana logran una tasa de separación en la fuente del 13.95%. Asimismo, se consolida la idea de que asignar una cobertura total a los recicladores es insostenible.

A partir de lo anterior, en la Tabla 8 se intenta mejorar los resultados del escenario S12 a partir del incremento parcial en el porcentaje de cobertura de los recicladores.

**Tabla 8.***Análisis de sensibilidad al mejor escenario con la variable % Cobertura recicladores*

Escenario	Variables Palanca					Medidas de Desempeño (a 2050)		
	Tasa de generación (ton/año/hab)	Tasa objetivo (Dmnl)	% Cobertura recicladores (Dmnl)	Interés político (Dmnl)	Voluntad ciudadana (Dmnl)	% Residuos no recolectados (Dmnl)	Capacidad requerida del relleno sanitario (M ton)	Tasa de separación en la fuente (Dmnl)
S12	0.2475	17.9%	0	1	1	0%	3,492,850	13.95%
S12'	0.2475	17.9%	1%	1	1	1.0%	3,454,510	13.98%
S12''	0.2475	17.9%	10%	1	1	10.0%	3,109,430	<b>14.34%</b>

Nota. Los apostrofes denotan escenarios derivados de otro escenario.

Como se puede observar, al aumentar la cobertura al 1% se obtiene el mismo aumento en el porcentaje de residuos no recolectados, pero tan solo un aumento de 0.03% en la tasa de separación en la fuente. De igual manera, al aumentar la cobertura en un 10% la tasa de separación solo aumenta 0.39% pero el porcentaje de residuos no recolectados aumenta al mismo 10%. Si bien lo anterior se debe a la ponderación definida para estas tres variables influyentes, el escenario S12 continúa siendo el más sostenible.

Ahora bien, con relación a la variable tasa de generación, es claro que al ser esta una de las primeras variables dinamizadores del modelo (luego de la tasa de cambio poblacional) al disminuirse se reflejaría directamente en una menor capacidad requerida del relleno sanitario y por ende en un comportamiento más sostenible del sistema. De acuerdo con la Tabla 9, una disminución de 100 gramos en la generación de residuos al año (0.274 gramos al día) implicaría una disminución de 1.390 toneladas en la capacidad requerida del relleno sanitario a 2050, y una disminución de 500 gramos (1.39 gramos al día), una disminución de 6.950 toneladas en la capacidad requerida.

**Tabla 9.***Análisis de sensibilidad al mejor escenario con la variable Tasa de generación*

Escenario	Variables Palanca					Medidas de Desempeño (a 2050)		
	Tasa de generación (ton/año/hab)	Tasa objetivo (Dmnl)	% Cobertura recicladores (Dmnl)	Interés político (Dmnl)	Voluntad ciudadana (Dmnl)	% Residuos no recolectados (Dmnl)	Capacidad requerida del relleno sanitario (M ton)	Tasa de separación en la fuente (Dmnl)
INICIAL	0.2475	17.9%	0	1	1	0%	3,492,850	13.95%
-100 gr	0.2474	17.9%	0	1	1	0%	3,491,460	13.95%
-200 gr	0.2473	17.9%	0	1	1	0%	3,490,070	13.95%
-300 gr	0.2472	17.9%	0	1	1	0%	3,488,680	13.95%
-400 gr	0.2471	17.9%	0	1	1	0%	3,487,290	13.95%
-500 gr	0.247	17.9%	0	1	1	0%	3,485,900	13.95%

## 10. Conclusiones

A partir de la evaluación de escenarios, se concluye que la mejor manera de intervenir el problema de la operación insostenible de un sistema de gestión de residuos sólidos urbanos es a través del máximo compromiso político y ciudadano, orientado a reducir la tasa de generación de residuos por persona al año, pues como se observó en la Tabla 9, tal compromiso junto con una reducción de 500 gramos al año en la generación de residuos (1.39 gramos al día) representa el alcanzar una disminución de 6.950 toneladas en el requerimiento de la capacidad del relleno sanitario a 2050 (comparado con el escenario inicial).

Frente a la revisión de la literatura científica, es posible concluir que el estudio del SGRSU desde la dinámica de sistemas es aún área aún en consolidación, que además tiene el reto de hacer frente a la complejidad del análisis de causas y consecuencias alrededor del fenómeno, aspecto

que implica un mayor nivel de dificultad al momento de formalizar el modelo. Además, se notó que cada modelo es único en su esencia, pues responde a las particularidades del contexto geográfico en el que se enmarca el análisis y a la interpretación del autor.

Con relación a la conceptualización del fenómeno, se determinó la importancia de contar con límites claros sobre lo que se quiere modelar de acuerdo con el planteamiento del problema, pues ello permite orientar los esfuerzos de consecución de datos y análisis, además de mantener manejable la cantidad de bucles que se forman, así como las relaciones matemáticas que se deben formular, lo que favorece la posterior explicación del modelo.

Respecto al modelado, se evidenció la importancia de contar con habilidades matemáticas que permitan formular ecuaciones que reflejen el comportamiento cualitativo de las variables y su relación con otras. Asimismo, se hizo evidente la barrera que representa el no contar con datos suficientes sobre el fenómeno en estudio, pues ello afectó la validación del modelo, la formulación de ecuaciones e implicó el descarte de algunas variables.

Finalmente, frente a la evaluación de escenarios es necesario tener presente que los resultados obtenidos están influenciados por la manera en como se interpretó el sistema real, y como se limitó y modeló el problema con dinámica de sistemas, de modo que valdría la pena validar el modelo con los clientes de este y así determinar la pertinencia de los resultados. Lo anterior para aclarar que los hallazgos no pretenden desacreditar la importancia de otras estrategias a las mencionadas, como las orientadas al incremento de la tasa de separación en la fuente.

### **11. Artículo publicable**

Durante el desarrollo de este trabajo, se contó con la oportunidad de participar de manera virtual en el XX Congreso Latinoamericano y Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas realizado por la Asociación Colombiana de Dinámica de Sistemas en septiembre de 2022. El trabajo que allí se expuso se tituló *Simulación dinámico-sistémica aplicada al análisis de escenarios para la operación sostenible de un sistema de gestión de residuos* y en él se presentaron los avances que hasta el momento se lograban. El documento puede ser consultado en el enlace: <https://comunidadcolombianads.com/clads-2022/>.

Ahora, habiendo culminado el ejercicio investigativo se realiza el artículo *Modelando con dinámica de sistemas el problema insostenible de la gestión de residuos sólidos urbanos* (Apéndice C), el cual será sometido a publicación en la Revista UIS Ingenierías, la cual se encuentra catalogada como categoría B en Publindex. Se elige esta al evidenciarse un historial de 3 artículos en el área de residuos y 2 en el área de dinámica de sistemas; además del valor que podría tener en trabajo en el contexto regional santandereano.

### **12. Recomendaciones**

Para facilitar el modelado con dinámica de sistemas, es positivo que en el marco teórico se incluyan los arquetipos que mejor se adapten al fenómeno de interés. Además, resulta útil tener presente conceptos y ejercicios propios del curso de ecuaciones diferenciales, esto para entender mejor la lógica detrás de lo que se plasma en el modelo y para un mejor análisis de las hipótesis sobre el problema de interés.

Por otra parte, es importante tener presente que el modelo se debe desarrollar para resolver un problema en particular, evitando modelar el sistema en sí. Podría ser útil concebir el modelo conceptual como esa descripción de todo el sistema (elaborada a partir del marco teórico y la revisión de la literatura), y a partir de este seleccionar el problema puntual que se quiere modelar con dinámica de sistemas.

Sobre el tema de sostenibilidad, intentar incorporar variables como las mencionadas en el apartado 4.2 puede resultar contraproducente cuando para calcular estas se hace necesario realizar demasiados supuestos, haciendo esto que se pierda el carácter evaluativo o de punto de comparación. Además, se añade complejidad de detalle y se obtiene un modelo más robusto y difícil de explicar, que puede no llamar tanto la atención del público objetivo (ciudadanos) como lo haría el usar medidas de desempeño más cercanas a su realidad. No obstante, de concebir el público objetivo como el gobierno, sería bueno incorporar al modelo variables asociadas a los indicadores de desarrollo sostenible presentados en el CONPES 3918 de 2018, cuyas mediciones (parcialmente) se encuentran publicadas por el DANE.

Finalmente, resulta interesante modelar otro tipo de relaciones entre los porcentajes de cobertura de las PPSPA y los recicladores, los cuales estén orientados a superar la competencia entre estos y a garantizar que ambos obtengan beneficios económicos derivados del tipo y la cantidad de residuos que recolectan y transportan. Además, a un nivel más operativo, incorporar al modelo variables que denoten al SGRSU como una cadena de suministro del tipo ágil cuya intervención debe responder a evitar las interrupciones en el suministro y a la flexibilidad.

**Referencias bibliográficas**

- Aghajani Mir, M., Taherei Ghazvinei, P., Sulaiman, N. M. N., Basri, N. E. A., Saheri, S., Mahmood, N. Z., Jahan, A., Begum, R. A., & Aghamohammadi, N. (2016). Application of TOPSIS and VIKOR improved versions in a multi criteria decision analysis to develop an optimized municipal solid waste management model. *Journal of Environmental Management*, 166, 109-115. 10.1016/j.jenvman.2015.09.028
- Albin, S. (1997). Building a System Dynamics Model. Part 1: Conceptualization. *MIT System Dynamics in Education Project* ()
- Andrade, H., Dyner, I., Espinosa, A., López, H., & Sotaquirá, R. (2001). *Pensamiento sistémico: Diversidad en búsqueda de unidad*. Universidad Industrial de Santander.
- Aristizabal-Alzate, C. E., & González Manosalva, J. L. (2018). Effectiveness analysis of the ITM environmental programs: saving and efficient use of electric energy and water, and comprehensive solid waste management. A case study. *Dyna*, 85(207), 36-43. 10.15446/dyna.v85n207.69309
- Babaei, A. A., Alavi, N., Goudarzi, G., Teymouri, P., Ahmadi, K., & Rafiee, M. (2015). Household recycling knowledge, attitudes and practices towards solid waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 102, 94-100. 10.1016/j.resconrec.2015.06.014
- Breukelman, H., Krikke, H. R., & Löhr, A. J. (2019). Failing services on urban waste management in developing countries: A review on symptoms, diagnoses, and interventions. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, 11(24)10.3390/su11246977

- Cabeza, D. (2012). *Logística inversa en la gestión de la cadena de suministro* (1st ed.). Marge Books.
- Cárdenas, C. (2009). Responsabilidad social empresarial -"Un aporte al proceso de desarrollo" . *Revista De Tecnología -Journal of Technology*, 8(1), 23-33.
- Cepal. (2020). *Cosntruir un nuevo futuro: una recuperación transformadora con igualdad y sostenibilidad*. (LC/SES.38/3-P/Rev.1). Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Cepal. (2021). *Construir un futuro mejor: acciones para fortalecer la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. (LC/FDS.4/3/Rev.1). Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Cepal. (s.f.). *Cambio cultural, desarrollo y sustentabilidad ambiental*
- Chang, N., Pires, A., & Martinho, G. (2011). Empowering Systems Analysis for Solid Waste Management: Challenges, Trends, and Perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(16), 1449-1530. 10.1080/10643381003608326
- Chase, R., & Jacobs, Robert, Aquilano, Nicholas. (2009). *ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES Producción y cadena de suministros* (12th ed.). McGraw-Hill Higher Education.
- Das, S., Lee, S. -, Kumar, P., Kim, K., Lee, S. S., & Bhattacharya, S. S. (2019). Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 228, 658-678. 10.1016/j.jclepro.2019.04.323

- Di Nola, M. F., Escapa, M., & Ansah, J. P. (2018). Modelling solid waste management solutions: The case of Campania, Italy. *Waste Management (Elmsford)*, 78, 717-729.  
10.1016/j.wasman.2018.06.006
- Dianati, K., Schäfer, L., Milner, J., Gómez-Sanabria, A., Gitau, H., Hale, J., Langmaack, H., Kiesewetter, G., Muindi, K., Mberu, B., Zimmermann, N., Michie, S., Wilkinson, P., & Davies, M. (2021). A system dynamics-based scenario analysis of residential solid waste management in Kisumu, Kenya. *The Science of the Total Environment*, 777, 146200.  
10.1016/j.scitotenv.2021.146200
- Erses Yay, A. S. (2015). Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya. *Journal of Cleaner Production*, 94, 284-293.  
10.1016/j.jclepro.2015.01.089
- Euformación Consultores. (2015). *Gestión integral de residuos*. Bogota Ediciones de la U.
- Fei, F., Qu, L., Wen, Z., Xue, Y., & Zhang, H. (2016). How to integrate the informal recycling system into municipal solid waste management in developing countries: Based on a China's case in Suzhou urban area. *Resources, Conservation and Recycling*, 110, 74-86.  
10.1016/j.resconrec.2016.03.019
- Fernández-González, J. M., Grindlay, A. L., Serrano-Bernardo, F., Rodríguez-Rojas, M. I., & Zamorano, M. (2017). Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities. *Waste Management (Elmsford)*, 67, 360-374. 10.1016/j.wasman.2017.05.003

- Franceschi, F. F., Vega, L. T., Sanches-Pereira, A., Cherni, J. A., & Gómez, M. F. (2022). A combined approach to improve municipal solid waste management in upper-middle-income countries: the case of Sabana Centro, Colombia. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(8), 2547-2562. 10.1007/s10098-022-02333-x
- Gamboa Bernal, J. P., Orjuela Castro, J. A., & Moreno Mantilla, C. E. (2020). The Sustainable Supply Chain: Concepts, Optimization and Simulation Models, and Trends. *Ingeniería*, 25(3), 355-377. 10.14483/23448393.16926
- Gobierno de la república de Colombia. (2019). *Estrategia nacional de economía circular. Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio.* (). Bogotá D.C., Colombia:
- Gudynas, E. (2004). *Ecología, Economía y Ética del Desarrollo Sostenible* (5ta ed.). Coscoroba.
- Gutberlet, J., Kain, J., Nyakinya, B., Oloko, M., Zapata, P., & Zapata Campos, M. J. (2017). *Bridging Weak Links of Solid Waste Management in Informal Settlements.* SAGE Publications. 10.1177/1070496516672263
- Hernández, A. V., & Grajales, J. D. (2014). *Estudio sobre el aprovechamiento realizado por los recicladores en la vida útil de un relleno sanitario.* XII Encuentro colombiano de Dinámica de Sistemas.
- Crónica judicial de una crisis anunciada: El litigio detrás del cierre de El Carrasco (2011-2021).* Hernández, D. (Director). (2021, Sep 1,).[Video/DVD] <https://www.youtube.com/watch?v=VyAueTDCyUI&t=6569s>

- Ibarra, D., Redondo, J., & Peña, C. (2010), Modelo de regionalización para el manejo sostenible de los residuos sólidos municipales
- Izquierdo, L. R., Galán, J. M., Santos, J., & Del Olmo, R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *EMPIRIA. Revista De Metodología De Las Ciencias Sociales*, (16), 85-112.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=297124024004>
- Kubanza, N. S., & Simatele, D. (2018). Sustainable solid waste management in sub-Saharan African cities: application of system thinking and system dynamic as methodological imperatives in Kinshasa, the Democratic Republic of Congo. *Local Environment*, 23(2), 220-238. 10.1080/13549839.2017.1399996
- Kulkarni, B. N., & Anantharama, V. (2020). Repercussions of COVID-19 pandemic on municipal solid waste management: Challenges and opportunities. *The Science of the Total Environment*, 743, 140693. 10.1016/j.scitotenv.2020.140693
- Lu, D., Iqbal, A., Zan, F., Liu, X., & Chen, G. (2021). Life-Cycle-Based Greenhouse Gas, Energy, and Economic Analysis of Municipal Solid Waste Management Using System Dynamics Model. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, 13(4), 1641. 10.3390/su13041641
- Ma, J., & Hipel, K. W. (2016). Exploring social dimensions of municipal solid waste management around the globe – A systematic literature review. *Waste Management (Elmsford)*, 56, 3-12. 10.1016/j.wasman.2016.06.041
- Malinauskaite, J., Jouhara, H., Czajczyńska, D., Stanchev, P., Katsou, E., Rostkowski, P., Thorne, R. J., Colón, J., Ponsá, S., Al-Mansour, F., Anguilano, L., Krzyżyńska, R., López, I.

C., A.Vlasopoulos, & Spencer, N. (2017). Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy (Oxford)*, *141*, 2013-2044. 10.1016/j.energy.2017.11.128

Marmolejo, L., Klinger, R., Madera, C., Olaya, J., Marcos, C., & Ordóñez, J. (2010).

Cuantificación y caracterización local: una herramienta básica para la gestión integral de los residuos sólidos residenciales. *Ingeniería e Investigación*. 30(2): 96-104, 2010.30(2)

Retrieved from <http://bibliotecadigital.iplacex.cl/handle/123456789/71828>

Meadows, D. (2019). *Bailar con sistemas*

. <https://www.15-15-15.org/webzine/2019/02/03/bailar-con-sistemas/>

Ministerio de Medio Ambiente. (1997). *Política para la Gestión Integral de Residuos*. ().

Colombia:

Instituto de Estudios Urbanos Universidad Nacional (Producer), & Montes, C. (Director). (2021,

Jun 10.). *Gestión integral de residuos en Colombia, normatividad, actores y*

*conflicto*. [Video/DVD] <https://www.youtube.com/watch?v=IFkFH9oAgdE&t=1095s>

Moreno-Sánchez, R. d. P., & Maldonado, J. H. (2006). Surviving from garbage: the role of

informal waste-pickers in a dynamic model of solid-waste management in developing countries. *Environment and Development Economics*, *11*(3), 371-391.

10.1017/S1355770X06002853

Nabavi-Pelesaraei, A., Bayat, R., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Afrasyabi, H., & Chau, K.

(2017). Modeling of energy consumption and environmental life cycle assessment for

incineration and landfill systems of municipal solid waste management - A case study in

Tehran Metropolis of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 148, 427-440.

10.1016/j.jclepro.2017.01.172

Narayanan, V. G., & Raman, A. (2004). *Alineando los incentivos en las cadenas de suministro*.

Harvard Business School Publishing Corporation.

Niño Torres, A. M., Trujillo Gonzalez, J. M., & Niño Torres, A. P. (2017). Gestión de residuos sólidos domiciliarios en la ciudad de Villavicencio. Una mirada desde los grupos de interés: empresa, estado y comunidad. *Revista Luna Azul*, (44), 177-187. 10.17151/luaz.2017.44.11

Nzediegwu, C., & Chang, S. X. (2020). Improper solid waste management increases potential for COVID-19 spread in developing countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104947. 10.1016/j.resconrec.2020.104947

O'Connor, J., & McDermott, I. (1998). *Introducción al pensamiento sistémico*. Ediciones Urano.

Oviedo-Ocaña, É, Marmolejo-Rebellón, L., & Torres-Lozada, P. (2011). Intervenciones priorizadas en plantas de manejo de residuos sólidos mediante la aplicación del análisis estructural. *Ing. Univ. Bogotá*, 15(1)

Pardo Martinez, C. I., & Piña, W. A. (2017). Solid waste management in Bogotá: the role of recycling associations as investigated through SWOT analysis. *Environment, Development and Sustainability*, 19(3), 1067-1086. 10.1007/s10668-016-9782-y

Instituto de Estudios Urbanos Universidad Nacional (Producer), & Parra, F. (Director). (2021, Jun 17,). *Retos del aprovechamiento de residuos y del reconocimiento de población recicladora*

. [Video/DVD] <https://www.youtube.com/watch?v=BHpHUNWrtzk&t=2253s>

- Peña-Montoya, C., Bouzon, M., Torres-Lozada, P., & Vidal-Holguin, C. J. (2020). Assessment of maturity of reverse logistics as a strategy to sustainable solid waste management. *Waste Management & Research*, 38(1), 65-76. 10.1177/0734242X19897131
- Pineda, S. (1998). *Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos* (1st ed.). Acodal.
- Pinha, A. C. H., & Sagawa, J. K. (2020). A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122350. 10.1016/j.jclepro.2020.122350
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2021). *Hacer las paces con la naturaleza: Plan científico para hacer frente a las emergencias del clima*. Nairobi: Retrieved from <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>
- Rafew, S. M., & Rafizul, I. M. (2021). Application of system dynamics model for municipal solid waste management in Khulna city of Bangladesh. *Waste Management (Elmsford)*, 129, 1-19. 10.1016/j.wasman.2021.04.059
- Retuerto, M. G., Espinoza, D. Y., & Andrade-Arenas, L. (2021). System Dynamics Modeling for Solid Waste Management in Lima Peru. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, 12(7)10.14569/IJACSA.2021.0120762
- Ripa, M., Fiorentino, G., Vacca, V., & Ulgiati, S. (2017). The relevance of site-specific data in Life Cycle Assessment (LCA). The case of the municipal solid waste management in the metropolitan city of Naples (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 142, 445-460. 10.1016/j.jclepro.2016.09.149

Rodić, L., & Wilson, D. (2017). Resolving Governance Issues to Achieve Priority Sustainable Development Goals Related to Solid Waste Management in Developing

Countries. *Sustainability*, 9(3), 404. 10.3390/su9030404

Rodriguez, J., & Ibarra-Vega, D. (2017). *Gestión de residuos y su influencia en el índice de calidad ambiental urbana en Bogotá*. XV ENCUENTRO COLOMBIANO DE DINÁMICA DE SISTEMAS.

Sancheta, L. d. N., Chaves, G. d. L. D., & Siman, R. R. (2021). The use of system dynamics on urban solid waste management: a literature analysis. *Gestão & Produção*,

28(3)10.1590/1806-9649-2021v28e5336

Sánchez-Muñoz, M. d. P., Cruz-Cerón, J. G., & Maldonado-Espinel, P. C. (2019). Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina: un análisis desde la perspectiva de la generación. *Finanzas Y Política Económica*, 11(2), 321-336.

10.14718/revfinanrpolitecon.2019.11.2.6

Schroeder, R., Meyer, S., & Rungtusanatham, J. (2011). *ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. Conceptos y casos contemporáneos* (5th ed.). McGraw-Hill Higher Education.

Semana. (2022). *Relleno sanitario en Bucaramanga funciona sin licencia ambiental, advierten autoridades*. <https://www.semana.com/nacion/articulo/relleno-sanitario-en-bucaramanga-funciona-sin-licencia-ambiental-advierten-autoridades/202259/>

Sempere, J., & Riechmann, J. (2004). *Sociología y medio ambiente*. Síntesis.

- Sharma, H. B., Vanapalli, K. R., Cheela, V. S., Ranjan, V. P., Jaglan, A. K., Dubey, B., Goel, S., & Bhattacharya, J. (2020). Challenges, opportunities, and innovations for effective solid waste management during and post COVID-19 pandemic. *Resources, Conservation and Recycling*, 162, 105052. 10.1016/j.resconrec.2020.105052
- Solano, J., & Redondo Johan. (2010). *Dinámica de sistemas aplicada a la triada: población, generación de residuos y calidad ambiental*. 8º Congreso Latinoamericano y 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, 2010.
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill Higher Education.
- Sterman, J. D. (1988). A Skeptic's Guide to Computer Models. *Managing a Nation: The Microcomputer Software Catalog* ()
- Sukholthaman, P., & Sharp, A. (2016). A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. *Waste Management (Elmsford)*, 52, 50-61. 10.1016/j.wasman.2016.03.026
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2017). Caracterización de organizaciones de recicladores de oficio en proceso de formalización. (). Bogotá D.C., Colombia.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2021). *INFORME NACIONAL DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS 2020*. ().
- United Nations Environment Programme, & Dutch Delft University of Technology. (2006). *Design for Sustainability: A Practical Approach for Developing Economies*. United Nations Environment Programme (UNEP), Dutch Delft University of Technology.

- Vélez, S. L. P., & Mora, N. E. (2016a). System dynamics model for the municipal solid waste management system in the metropolitan area of Medellín, Colombia. *International Journal of Environment and Waste Management*, 18(2), 161-180. 10.1504/IJEW.2016.080404
- Vélez, S. L. P., & Mora, N. E. (2016b). System dynamics model for the municipal solid waste management system in the metropolitan area of Medellín, Colombia. *International Journal of Environment and Waste Management*, 18(2), 161-180. 10.1504/IJEW.2016.080404
- Vilches, A., & Gil, D. (2015). Ciencia de la Sostenibilidad: ¿Una nueva disciplina o un nuevo enfoque para todas las disciplinas? *Revista Iberoamericana De Educación*, 69(1), 39-60. 10.35362/rie691152
- Xiao, S., Dong, H., Geng, Y., Tian, X., Liu, C., & Li, H. (2020). Policy impacts on Municipal Solid Waste management in Shanghai: A system dynamics model analysis. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121366. 10.1016/j.jclepro.2020.121366
- "\_blank"<https://www.15-15-15.org/webzine/2019/02/03/bailar-con-sistemas/>
- Ministerio de Medio Ambiente. (1997). *Política para la Gestión Integral de Residuos*. (). Colombia:
- Instituto de Estudios Urbanos Universidad Nacional (Producer), & Montes, C. (Director). (2021, Jun 10,). *Gestión integral de residuos en Colombia, normatividad, actores y conflicto*. [Video/DVD] <https://www.youtube.com/watch?v=IFkFH9oAgdE&t=1095s>
- Moreno-Sánchez, R. d. P., & Maldonado, J. H. (2006). Surviving from garbage: the role of informal waste-pickers in a dynamic model of solid-waste management in developing

countries. *Environment and Development Economics*, 11(3), 371-391.

10.1017/S1355770X06002853

Nabavi-Pelesaraei, A., Bayat, R., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Afrasyabi, H., & Chau, K.

(2017). Modeling of energy consumption and environmental life cycle assessment for incineration and landfill systems of municipal solid waste management - A case study in

Tehran Metropolis of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 148, 427-440.

10.1016/j.jclepro.2017.01.172

Narayanan, V. G., & Raman, A. (2004). *Alineando los incentivos en las cadenas de suministro*.

Harvard Business School Publishing Corporation.

Niño Torres, A. M., Trujillo Gonzalez, J. M., & Niño Torres, A. P. (2017). Gestión de residuos

sólidos domiciliarios en la ciudad de Villavicencio. Una mirada desde los grupos de interés: empresa, estado y comunidad. *Revista Luna Azul*, (44), 177-187. 10.17151/luaz.2017.44.11

Nzediegwu, C., & Chang, S. X. (2020). Improper solid waste management increases potential for

COVID-19 spread in developing countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 161,

104947. 10.1016/j.resconrec.2020.104947

O'Connor, J., & McDermott, I. (1998). *Introducción al pensamiento sistémico*. Ediciones Urano.

Oviedo-Ocaña, É, Marmolejo-Rebellón, L., & Torres-Lozada, P. (2011). Intervenciones

priorizadas en plantas de manejo de residuos sólidos mediante la aplicación del análisis

estructural. *Ing. Univ. Bogotá*, 15(1)

Pardo Martinez, C. I., & Piña, W. A. (2017). Solid waste management in Bogotá: the role of recycling associations as investigated through SWOT analysis. *Environment, Development and Sustainability*, 19(3), 1067-1086. 10.1007/s10668-016-9782-y

Instituto de Estudios Urbanos Universidad Nacional (Producer), & Parra, F. (Director). (2021, Jun 17.). *Retos del aprovechamiento de residuos y del reconocimiento de población recicladora*. [Video/DVD] <https://www.youtube.com/watch?v=BHpHUNWrtzk&t=2253s>

Peña-Montoya, C., Bouzon, M., Torres-Lozada, P., & Vidal-Holguin, C. J. (2020). Assessment of maturity of reverse logistics as a strategy to sustainable solid waste management. *Waste Management & Research*, 38(1), 65-76. 10.1177/0734242X19897131

Pineda, S. (1998). *Manejo y disposición de residuos sólidos urbanos* (1st ed.). Acodal.

Pinha, A. C. H., & Sagawa, J. K. (2020). A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122350. 10.1016/j.jclepro.2020.122350

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2021). *Hacer las paces con la naturaleza: Plan científico apra hacer frente a las emergencias del clima*. Nairobi: Retrieved from <https://www.unep.org/resources/making-peace-nature>

Rafew, S. M., & Rafizul, I. M. (2021). Application of system dynamics model for municipal solid waste management in Khulna city of Bangladesh. *Waste Management (Elmsford)*, 129, 1-19. 10.1016/j.wasman.2021.04.059

- Retuerto, M. G., Espinoza, D. Y., & Andrade-Arenas, L. (2021). System Dynamics Modeling for Solid Waste Management in Lima Peru. *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, 12(7)10.14569/IJACSA.2021.0120762
- Ripa, M., Fiorentino, G., Vacca, V., & Ulgiati, S. (2017). The relevance of site-specific data in Life Cycle Assessment (LCA). The case of the municipal solid waste management in the metropolitan city of Naples (Italy). *Journal of Cleaner Production*, 142, 445-460. 10.1016/j.jclepro.2016.09.149
- Rodić, L., & Wilson, D. (2017). Resolving Governance Issues to Achieve Priority Sustainable Development Goals Related to Solid Waste Management in Developing Countries. *Sustainability*, 9(3), 404. 10.3390/su9030404
- Rodriguez, J., & Ibarra-Vega, D. (2017). *Gestión de residuos y su influencia en el índice de calidad ambiental urbana en Bogotá*. XV ENCUENTRO COLOMBIANO DE DINÁMICA DE SISTEMAS.
- Sancheta, L. d. N., Chaves, G. d. L. D., & Siman, R. R. (2021). The use of system dynamics on urban solid waste management: a literature analysis. *Gestão & Produção*, 28(3)10.1590/1806-9649-2021v28e5336
- Sánchez-Muñoz, M. d. P., Cruz-Cerón, J. G., & Maldonado-Espinel, P. C. (2019). Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina: un análisis desde la perspectiva de la generación. *Finanzas Y Política Económica*, 11(2), 321-336. 10.14718/revfinanrpolitecon.2019.11.2.6

- Schroeder, R., Meyer, S., & Rungtusanatham, J. (2011). *ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. Conceptos y casos contemporáneos* (5th ed.). McGraw-Hill Higher Education.
- Semana. (2022). *Relleno sanitario en Bucaramanga funciona sin licencia ambiental, advierten autoridades* . <https://www.semana.com/nacion/articulo/relleno-sanitario-en-bucaramanga-funciona-sin-licencia-ambiental-advierten-autoridades/202259/>
- Sempere, J., & Riechmann, J. (2004). *Sociología y medio ambiente*. Síntesis.
- Sharma, H. B., Vanapalli, K. R., Cheela, V. S., Ranjan, V. P., Jaglan, A. K., Dubey, B., Goel, S., & Bhattacharya, J. (2020). Challenges, opportunities, and innovations for effective solid waste management during and post COVID-19 pandemic. *Resources, Conservation and Recycling*, 162, 105052. 10.1016/j.resconrec.2020.105052
- Solano, J., & Redondo Johan. (2010). *Dinámica de sistemas aplicada a la triada: población, generación de residuos y calidad ambiental*. 8º Congreso Latinoamericano y 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, 2010.
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill Higher Education.
- Sterman, J. D. (1988). A Skeptic's Guide to Computer Models. *Managing a Nation: The Microcomputer Software Catalog* ()
- Sukholthaman, P., & Sharp, A. (2016). A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. *Waste Management (Elmsford)*, 52, 50-61. 10.1016/j.wasman.2016.03.026

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2017). Caracterización de organizaciones de recicladores de oficio en proceso de formalización. (). Bogotá D.C., Colombia.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2021). *INFORME NACIONAL DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS 2020*. ().

United Nations Environment Programme, & Dutch Delft University of Technology.

(2006). *Design for Sustainability: A Practical Approach for Developing Economies*. United Nations Environment Programme (UNEP), Dutch Delft University of Technology.

Vélez, S. L. P., & Mora, N. E. (2016a). System dynamics model for the municipal solid waste management system in the metropolitan area of Medellín, Colombia. *International Journal of Environment and Waste Management*, 18(2), 161-180. 10.1504/IJEW.2016.080404

Vélez, S. L. P., & Mora, N. E. (2016b). System dynamics model for the municipal solid waste management system in the metropolitan area of Medellín, Colombia. *International Journal of Environment and Waste Management*, 18(2), 161-180. 10.1504/IJEW.2016.080404

Vilches, A., & Gil, D. (2015). Ciencia de la Sostenibilidad: ¿Una nueva disciplina o un nuevo enfoque para todas las disciplinas? *Revista Iberoamericana De Educación*, 69(1), 39-60. 10.35362/rie691152

Xiao, S., Dong, H., Geng, Y., Tian, X., Liu, C., & Li, H. (2020). Policy impacts on Municipal Solid Waste management in Shanghai: A system dynamics model analysis. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121366. 10.1016/j.jclepro.2020.121366