

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS Y RECICLABLES EN CÚCUTA

Programa Empleos Verdes en la
Economía Circular, PREVEC

ABRIL 2022



Implementado por
giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Para Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS Y RECICLABLES EN CÚCUTA

**Programa Empleos Verdes en la
Economía Circular, PREVEC**

PN 18.2139

ABRIL 2022

GOPA Infra GmbH

Fax: +49 6172 930 100

Hindenburgring 18

Phone: +49 6172 6817-0

61348 Bad Homburg, Germany

Email: info@gopa-infra.de

ABRIL 2022



Implementado por
giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



ABRIL 2022

ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE VALORIZACIÓN DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS Y RECICLABLES EN CÚCUTA

Apoyado por:

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Programa Empleos Verdes en la Economía Circular (PREVEC)
Sarah Hirsch, Coordinadora PREVEC
Calle 125 No.19-24, oficina 701, Bogotá – Colombia

GOPA Infra GmbH
Programa de GIZ Colombia
Programa Empleos Verdes en la Economía Circular (PREVEC)
Birgitt Alger, Jefa de Equipo GOPA INFRA – PREVEC
Sebastian Santa Moyano, Coordinador Nacional GOPA Infra – PREVEC

Autores

Andrés Jensen Velasco, experto internacional GOPA Infra – PREVEC
Milagros Vidalón Boggiano, experta internacional GOPA Infra – PREVEC
Jennifer Tabora Martínez, experta nacional GOPA Infra - PREVEC

Cita sugerida (formato APA)

Revisión editorial

Corrección de estilo: Ángela Alfonso

Por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania. Esta publicación ha sido apoyada por el Programa Empleos Verdes en la Economía Circular (PREVEC) que está implementado por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y sus contrapartes colombianas, por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

Las ideas vertidas en el texto son responsabilidad exclusiva de los autores y no comprometen la línea institucional de la GIZ.

Se autoriza la reproducción total del presente documento, sin fines comerciales, citando adecuadamente la fuente.

ABRIL 2022

I. Resumen ejecutivo

Este documento corresponde al análisis del potencial de valorización de los residuos orgánicos y reciclables generados en Cúcuta. En él se definen tres posibles escenarios futuros con distintos niveles de segregación en la fuente y recolección selectiva y se analiza qué tasa de valorización se podría alcanzar en cada uno de ellos, así como qué medidas de gestión, modelos operativos y tecnologías se deberían incorporar para concretizarlos.

El informe está compuesto por siete capítulos y un anexo.

Capítulo 1. Introducción. En este capítulo, se presentan los antecedentes generales del proyecto y se establece el alcance y los objetivos del informe.

Capítulo 2. Definición de escenarios. En este capítulo se definen los tres escenarios propuestos: escenario 0, escenario 1 y escenario 2, así como las condiciones generales para todos los escenarios.

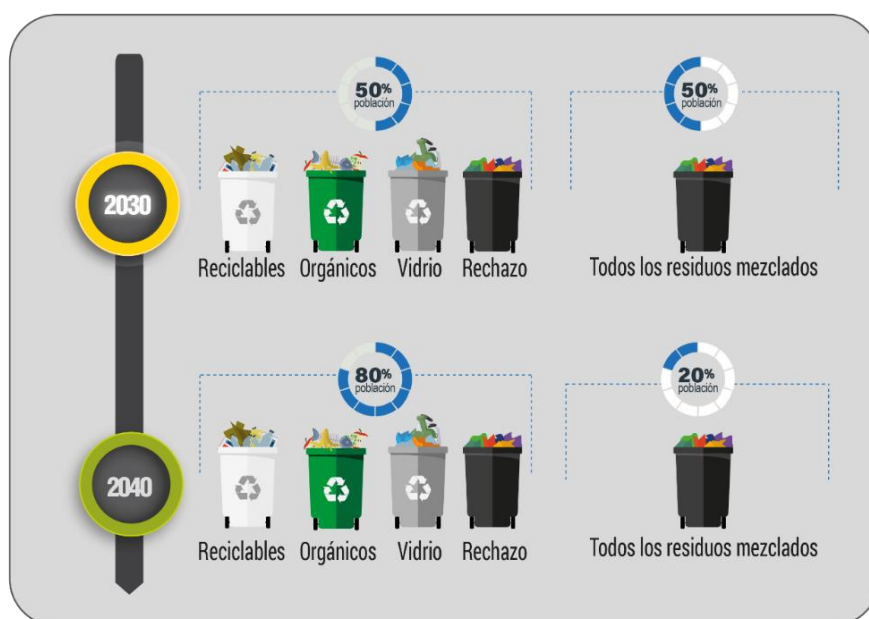
El escenario 0 corresponde a la proyección de la situación actual sin segregación en la fuente y recolección selectiva, incluyendo los principales proyectos e iniciativas en desarrollo que consideran volúmenes u objetivos concretos. Los proyectos e iniciativas que se consideran son: 1) proyecto piloto de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos del Parque Agroecológico Metropolitano; y 2) la implementación de la Resolución 1407 de 2018 (REP de envases y empaques) a partir del año 2023.

En el escenario 1, se propone la implementación progresiva de un programa de segregación en la fuente y de recolección selectiva de los RSM hasta cubrir un 50 % de la población en el año 2030, y se plantea que esta segregación se realice en cuatro flujos: reciclables (celulosas, plásticos y metales), vidrio, orgánicos y rechazo.



En este escenario, para la clasificación de los residuos reciclables recogidos selectivamente, se analiza tanto la continuación de un sistema, como el actual, mediante ECA, así como la implementación de una planta de clasificación y pretratamiento centralizada a escala industrial. Para la valorización de los residuos orgánicos recogidos selectivamente, se proponen instalaciones de compostaje.

El escenario 2 se plantea como la evolución del escenario 1, y va desde el año 2031 hasta el año 2040. En este escenario, se propone la implementación progresiva de un programa de segregación en la fuente y recolección selectiva de los RSM hasta cubrir un 80 % de la población en el año 2040.



En este escenario, para la clasificación de los residuos reciclables recogidos selectivamente, se plantea un sistema de clasificación y pretratamiento a escala industrial. Para la valorización de los residuos orgánicos recogidos selectivamente, se proponen sobre todo instalaciones de compostaje, y se considera la instalación de una planta de digestión anaerobia a nivel demostrativo para la posterior implementación de futuras plantas similares.

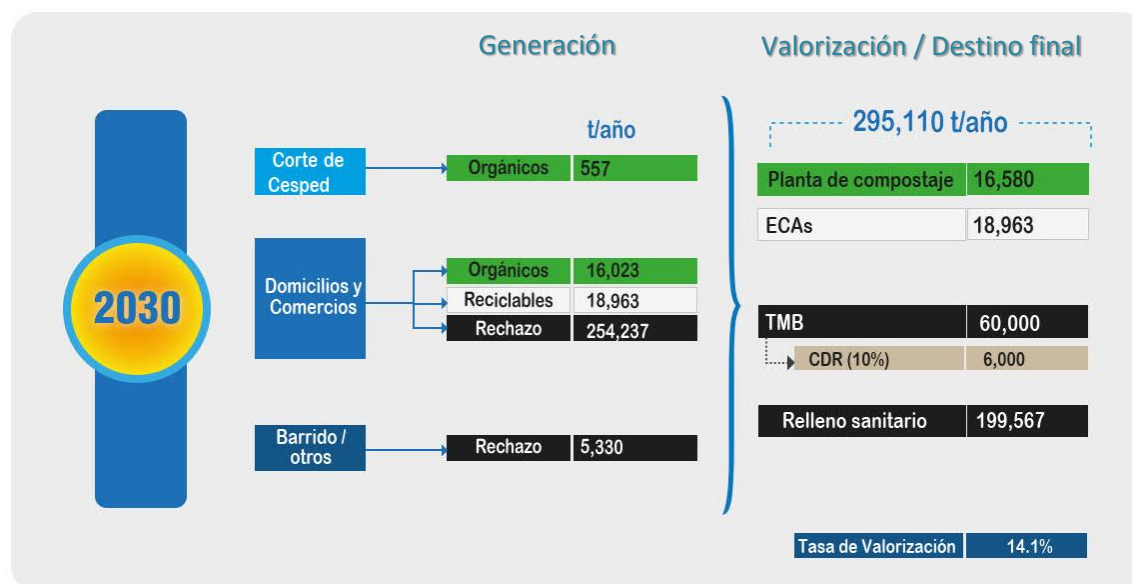
De forma paralela, para el análisis de los tres escenarios definidos previamente, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones generales: 1) implementación de sistemas de tratamiento mecánico-biológico (TMB) como alternativa para el tratamiento de los residuos no recogidos de forma selectiva (rechazo); 2) implementación de sistemas de clasificación y pretratamiento a escala industrial para la clasificación de los residuos reciclables recogidos selectivamente; 3) uso del rechazo de las instalaciones de clasificación y TMB para preparación de combustible derivado de residuos (CDR), y su posterior valorización mediante coprocesamiento en la industria cementera; y 4) uso de compostaje, y digestión anaerobia a nivel demostrativo, como principales tecnologías para el tratamiento/ valorización de los residuos orgánicos recogidos selectivamente.

Capítulo 3. Generación de residuos sólidos municipales y su proyección (2021-2040).

En este capítulo, se proyectan las cantidades de generación de RSM por tipo de material hasta el año 2040. Para el año 2021, se consideran, como generación total de RSM, las cantidades de residuos dispuestas y aprovechadas reportadas en el SUI (250 372 toneladas de residuos dispuestos + 8840 toneladas de residuos aprovechados), que se distribuyen por tipo de residuo con base en la composición promedio obtenida en el *Estudio de caracterización de residuos sólidos* realizado en Cúcuta, en 2021. A partir de estos volúmenes, se proyecta la generación hasta el año 2040 por tipo de residuo, utilizando el crecimiento de población y un incremento anual del 1 % de la PPC. A continuación, se presentan las proyecciones de generación para los años 2030 y 2040.

Generación (ton/año)	2021	2030	2040
Orgánicos	148,328	168,870	192,189
Celulosas	20,389	23,212	26,418
Plásticos	39,003	43,780	50,536
Metales	3,099	3,529	4,016
Vidrios	7,661	8,723	9,927
Otros	40,731	46,372	52,775
Total	259,212	295,110	335,861

Capítulo 4. Análisis del escenario 0. Los flujos de residuos sólidos municipales proyectados para el año 2030, en este escenario, se presentan en la siguiente gráfica.



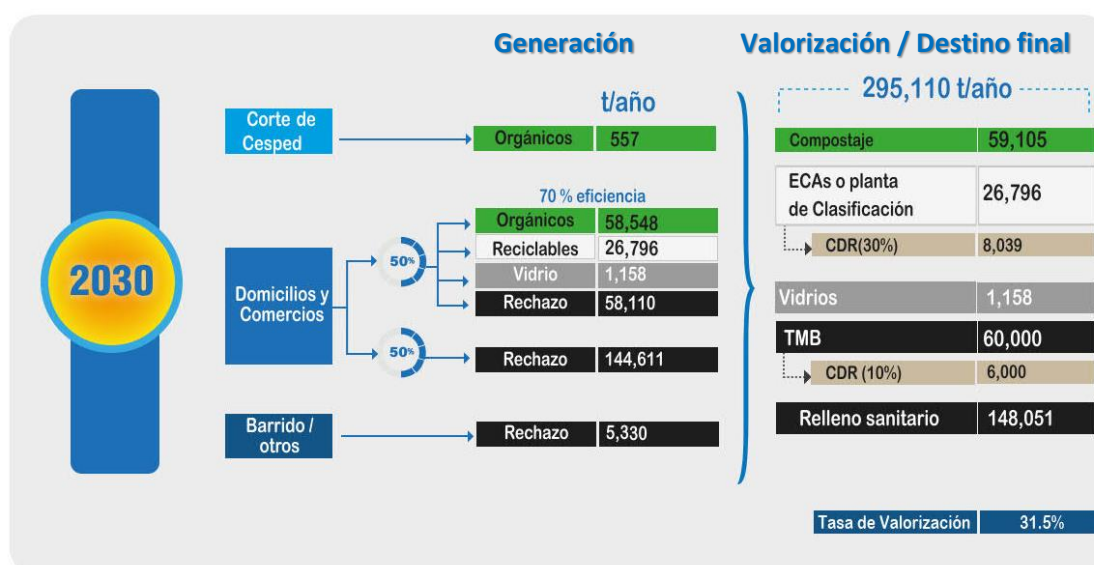
Se proyecta que, para el año 2030, se valoricen un total de 35 600 toneladas de residuos orgánicos y reciclables (16 600 ton de orgánicos + 19 000 ton de reciclables). Esto representa una tasa de valorización del 12,0 %. Si a este porcentaje se agregan las 6000 toneladas procedentes de la instalación TMB a valorizar como CDR, entonces la tasa de valorización se incrementa a 14,1 %. Esta misma tasa se calculó en 3,6 % para el año 2021, lo que significa un incremento de 10,5 puntos porcentuales en 9 años. Para los residuos reciclables, se proyecta un incremento en la tasa de valorización hasta llegar a 23,7 % en 2030, y para los residuos orgánicos un incremento hasta alcanzar un 9,8 % en 2030.

Se plantea que los residuos orgánicos se valoricen en la futura planta piloto de aprovechamiento de residuos sólidos del Parque Agroecológico Metropolitano, y que los residuos reciclables se gestionen en las ECA, como sucede en la actualidad. Esto representaría una generación de compost de, aproximadamente, 3300 t/año (asumiendo una tasa de conversión del 20 %).

Asimismo, se proyecta que, en el año 2030, se destinen a disposición final, aproximadamente, 260 000 toneladas de RSM, de las cuales 60 000 podrían ser previamente tratadas en una instalación TMB. En este escenario, se tendría una fuente potencial para la generación de CDR: el material con alto poder calorífico separado en la instalación TMB, que se estima en un 10 % (6000 t/año).

Finalmente, se propone una serie de medidas para concretizar el escenario.

Capítulo 5. Análisis del escenario 1. Los flujos de residuos sólidos municipales, proyectados para el año 2030, en este escenario, se presentan en la siguiente gráfica.



Se proyecta que, para el año 2030, se valoricen un total de 88 000 toneladas de residuos orgánicos y reciclables (60 000 ton de orgánicos + 28 000 ton de reciclables). Esto representa una tasa de valorización del 29,5 %. Si a esta tasa se agregan las 6000 toneladas procedentes de la instalación TMB a valorizar como CDR, entonces, la tasa de valorización se incrementa a 31,5 %, 17,4 puntos porcentuales más que lo proyectado en el escenario 0 para 2030.

Para la valorización de estos residuos, se propone la implementación de una planta de clasificación y pretratamiento centralizada de 30 000 t/año y dos plantas de compostaje de 30 000 t/año cada una. Con esta infraestructura, se alcanzaría una capacidad total de tratamiento en 2030 de 30 000 toneladas de residuos reciclables y de 60 000 toneladas de residuos orgánicos.

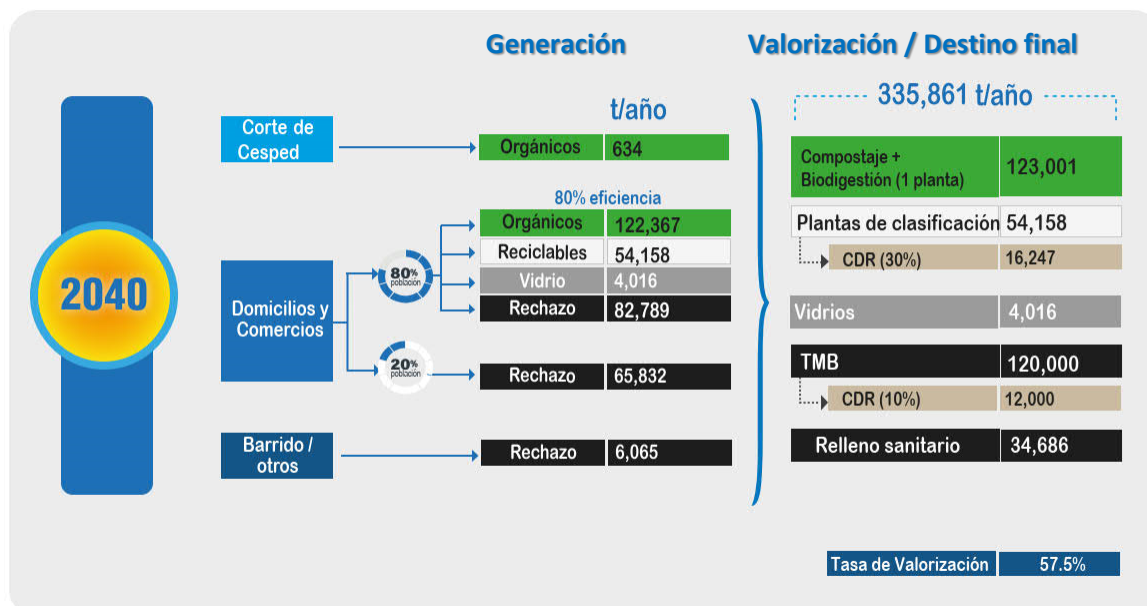
Asimismo, se proyecta que, en el año 2030, se destinen a disposición final 208 000 toneladas, de las cuales 60 000 podrían ser previamente tratadas en una instalación TMB.

En este escenario, habría dos potenciales fuentes para la generación de CDR: 1) el rechazo de las instalaciones de clasificación y pretratamiento a escala industrial que se

estima en 30 % (8000 t/año en el año 2030); y 2) el material con alto poder calorífico separado en la instalación TMB, que se estima en un 10 % (6000 t/año).

Finalmente, se propone una serie de medidas para concretizar el escenario.

Capítulo 6. Análisis del escenario 2. Los flujos de residuos sólidos municipales proyectados para el año 2040 en este escenario se presentan en la siguiente gráfica.



Se proyecta que, para el año 2040, se valoricen un total de 182 000 toneladas de residuos orgánicos y reciclables (123 000 ton de orgánicos + 59 000 ton de reciclables). Esto representa un porcentaje de valorización del 53,9 %. Si a este porcentaje se agregan las 12 000 toneladas procedentes de la instalación TMB a valorizar como CDR, entonces el porcentaje de valorización se incrementa a 57,5 %, 26 puntos porcentuales más que lo proyectado para el año 2030 en el escenario 1.

Para la valorización de estos residuos se propone la implementación entre los años 2031 y 2040 de: 1) una planta de clasificación y pretratamiento de 30 000 t/año; 2) dos plantas de compostaje de 25 000 t/año cada una; y 3) una planta de digestión anaerobia de 20 000 t/año. Con esta infraestructura, más la infraestructura propuesta en el escenario 1, se alcanzaría una capacidad total de tratamiento en 2030 de 60 000 t/año de residuos reciclables (sin considerar el vidrio) y de 130 000 t/año de residuos orgánicos.

Asimismo, se proyecta que, en el año 2040, se destinen a disposición final 154 686 toneladas, de las cuales 120 000 podrían ser previamente tratadas en dos instalaciones de TMB con una capacidad de 60 000 t/año cada una.

De acuerdo con lo indicado en los ítems anteriores, en este escenario, habría dos potenciales fuentes para la generación de CDR: 1) el rechazo de las instalaciones de clasificación y pretratamiento a escala industrial, que se estima en 30 % (16 300 t/año en 2040); y 2) el material con alto poder calorífico separado en las instalaciones de TMB, que se estima en un 10 % (12 000 t/año).

Finalmente, se propone una serie de medidas para concretizar el escenario.

Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones. En este capítulo se presentan las principales conclusiones y recomendaciones del estudio (ver cap. 7).

Contenido

I.	Resumen ejecutivo	i
1	Introducción.....	1
1.1	Antecedentes generales	1
1.2	Alcance y objetivo.....	2
2	Definición de escenarios.....	3
2.1	Definición del escenario 0.....	3
2.2	Definición del escenario 1.....	4
2.3	Definición del escenario 2.....	5
2.4	Consideraciones generales para todos los escenarios	7
2.4.1	Implementación de sistemas de tratamiento mecánico-biológico	7
2.4.2	Clasificación y pretratamiento a escala industrial.....	8
2.4.3	Uso de rechazo de clasificación y TMB para preparación de CDR	10
2.4.4	Tecnologías para el tratamiento/ valorización de residuos orgánicos.....	12
3	Generación de residuos sólidos municipales y su proyección (2021-2040).....	19
4	Análisis del escenario 0	22
4.1	Resumen del escenario 0	22
4.2	Proyección de las cantidades de RSM para valorización y disposición final	22
4.3	Análisis de las cantidades de residuos reciclables.....	26
4.3.1	Cantidades de residuos reciclables destinados a valorización.....	26
4.3.2	Clasificación y pretratamiento de residuos reciclables	27
4.3.3	Transformación de residuos reciclables	27
4.3.4	¿Bajo las condiciones de este escenario, se logra cumplir con las metas de la Resolución 1407 de 2018 (REP)?	29
4.4	Análisis de las cantidades de residuos orgánicos	29
4.4.1	Cantidades de residuos orgánicos destinados a valorización.....	29
4.4.2	Tratamiento de residuos orgánicos.....	30

4.5	Tratamiento del rechazo que se destina a disposición final	30
4.6	Análisis de potencial para escenario 0.....	30
4.7	¿Cómo se puede lograr la tasa de valorización proyectada para el escenario 0?	32
5	Análisis del escenario 1	33
5.1	Resumen del escenario 1	33
5.2	Proyección de las cantidades de residuos para valorización y disposición final	33
5.3	Análisis de las cantidades de residuos reciclables y propuestas para su valorización	36
5.3.1	Cantidades de residuos reciclables destinados a valorización.....	36
5.3.2	Clasificación y pretratamiento de residuos reciclables	37
5.3.3	Transformación de residuos reciclables	38
5.4	Análisis de las cantidades de residuos orgánicos y propuestas para su valorización	38
5.4.1	Cantidades de residuos orgánicos destinados a valorización.....	38
5.4.2	Tratamiento de residuos orgánicos	38
5.4.3	Demanda potencial de compost.....	39
5.5	Tratamiento del rechazo que se destina a disposición final	40
5.6	Análisis de potencial para escenario 1.....	40
5.7	¿Qué medidas se recomienda implementar para concretizar el escenario 1?	41
6	Análisis del escenario 2	45
6.1	Resumen del escenario 2	45
6.2	Proyección de las cantidades de residuos para valorización y disposición final	45
6.3	Análisis de las cantidades de residuos reciclables y propuestas para su valorización	49
6.3.1	Cantidades de residuos reciclables destinados a valorización.....	49
6.3.2	Clasificación y pretratamiento de residuos reciclables	50
6.4	Análisis de las cantidades de residuos orgánicos y propuestas para su valorización	50
6.4.1	Cantidades de residuos orgánicos destinados a valorización.....	50

6.4.2	Tratamiento de residuos orgánicos	51
6.4.3	Demanda potencial de compost.....	52
6.5	Tratamiento del rechazo que se destina a disposición final	53
6.6	Análisis de potencial escenario 2.....	54
6.7	¿Qué medidas se recomienda implementar para concretizar el escenario 2?	55
7	Conclusiones y recomendaciones	56

Índice de tablas, gráficos, imágenes, figuras y anexos

Índice de tablas

Tabla 1. Composición promedio de los RSM	19
Tabla 2. Generación actual y proyección de la generación de RSM en Cúcuta en t/año (2021-2030)	20
Tabla 3. Proyección de la generación de RSM en Cúcuta en t/año (2031-2040)	21
Tabla 4. Proyección de la cantidad de RSM destinados a valorización y disposición final en Cúcuta en t/año. Escenario 0 (2022-2030).....	24
Tabla 5. Porcentaje de valorización por tipo de residuo en Cúcuta. Escenario 0 (2021-2030).....	25
Tabla 6. Metas establecidas en la Resolución REP para envases y empaques	29
Tabla 7. Proyección de la cantidad de RSM destinados a valorización y disposición final en Cúcuta en t/año. Escenario 1 (2022-2030).....	34
Tabla 8. Porcentaje de valorización por tipo de residuo en Cúcuta. Escenario 1 (2022-2030).....	35
Tabla 9. Estimación de la producción de compost para el escenario 1	39
Tabla 10. Infraestructura a implementar en el escenario 1 para la valorización de los residuos reciclables y orgánicos	41
Tabla 11. Proyección de la cantidad de RSM destinados a valorización y disposición final en Cúcuta en t/año. Escenario 2 (2031-2040).....	47
Tabla 12. Porcentaje de valorización por tipo de residuo en Cúcuta. Escenario 2 (2031-2040).....	48
Tabla 13. Capacidad total de valorización de residuos orgánicos en 2040	51
Tabla 14. Estimación de la producción de compost para el escenario 2	52
Tabla 15. Cantidades de residuos a relleno sanitario en el escenario 2, en t/año	53
Tabla 16. Infraestructura a implementar en el escenario 2 para la valorización de los residuos reciclables y orgánicos	54

Índice de gráficos

Gráfica 1. Propuesta de segregación en la fuente y recolección selectiva para el año 2030. Escenario 1	4
Gráfica 2. Propuesta de segregación en la fuente y recolección selectiva. Escenario 2	6
Gráfica 3. Porcentaje de valorización por tipo de residuo reciclable. Escenario 0	26
Gráfica 4. Flujo de residuos sólidos municipales en t/año para el año 2030. Escenario 0.....	31
Gráfica 5. Porcentaje de valorización por tipo de residuo reciclable. Escenario 1	36
Gráfica 6. Flujo de residuos sólidos municipales en t/año para el año 2030. Escenario 1.....	40
Gráfico 7. Porcentaje de valorización por tipo de residuo reciclable. Escenario 2	49
Gráfica 8. Flujo de residuos sólidos municipales en t/año para el año 2040. Escenario 2.....	54

Índice de imágenes

Imagen 1. Imágenes de una planta de tratamiento mecánico-biológico.....	8
Imagen 2. Línea de clasificación manual	9
Imagen 3. Esquema de línea de clasificación semiautomatizada	9

Imagen 4. Esquema de línea de clasificación automatizada	10
Imagen 5. Línea de producción CDR	11
Imagen 6. CDR y horno cementero	12
Imagen 7. Planta de compostaje en hileras descubierta	13
Imagen 8. Planta de compostaje en hileras cubierta	13
Imagen 9. Sistema cerrado: biorreactor	14
Imagen 10. Planta de compostaje estático, cubierta y con aireación forzada	14
Imagen 11. Planta de compostaje en pilas	14
Imagen 12. Planta de biometanización de Can Barba, Terrassa, España	16
Imagen 13. Planta de biometanización en Holkham, Inglaterra	16
Imagen 14. Planta de biometanización en Surrey, Inglaterra	16

Índice de figuras

Figura 1. El proceso de compostaje	12
Figura 2. Ciclo de compostaje	13
Figura 3. Valor energético del biogás	17

Anexos

Anexo 1. Matriz comparativa entre las tecnologías de compostaje y digestión anaerobia

Abreviaturas

AdR	asociación de recicladores y recicladoras
ANDI	Asociación Nacional de Empresarios Colombianos
CDR	combustible derivado de residuos
Corponor	Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental
DA	digestión anaerobia
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas
DIAN	Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales
EC	economía circular
ECA	estaciones de clasificación y aprovechamiento
GIRS	gestión integral de residuos solidos
GIZ	Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit (Sociedad Alemana de Cooperación Internacional)
IAT	incentivo al aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos
INN	Instituto Nacional de Normalización
NDC	contribución determinada a nivel nacional
PET	tereftalato de polietileno
PGIRS	plan de gestión integral de residuos solidos
PREVEC	Programa de Empleos Verdes en el Marco de la Economía Circular
RCD	residuos de construcción y demolición
REP	responsabilidad extendida del productor
ROM	residuos orgánicos municipales
RSM	residuos sólidos municipales
RUPS	registro único de prestadores de servicios
SSPD	Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios
TPA	tonelada por año
TMB	tratamiento mecánico-biológico
UAESP	Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos
WFA	sistemas con ventilación forzada
WOFA	sistemas sin ventilación forzada

1 Introducción

1.1 Antecedentes generales

El PREVEC busca, entre sus objetivos principales, aumentar las tasas de valorización de residuos provenientes del servicio público de aseo (SPA), bajo una perspectiva de economía circular (EC) y creación de empleos verdes. En particular, se busca que Cúcuta aumente en al menos un 15 % las tasas de valorización identificadas al inicio del proyecto, gracias a la implementación de diferentes medidas y estrategias desarrolladas como parte de los diferentes indicadores definidos.

Uno de los indicadores (indicador 1.1 del PREVEC) busca, precisamente, «disponer de recopilaciones de datos relativos a tipos y volúmenes de residuos, así como un análisis del potencial de reciclaje de estos», para lo que se ha diseñado y desarrollado un plan de trabajo enfocado en la recopilación de datos, entendimiento del mercado actual de la valorización de residuos y el planteamiento de escenarios futuros de gestión a nivel municipal, que permitan estimar el potencial de valorización alcanzable con base en distintos supuestos.

Luego de la recopilación de datos, y del desarrollo de un plan de caracterización de residuos en la fuente orientado a conocer la composición de los residuos sólidos en Cúcuta, el trabajo del PREVEC se concentró en conocer la cadena de valor para la valorización de residuos en sus fracciones orgánica y reciclable. Para esto, se contactaron diferentes actores de esta cadena de valor y se investigaron antecedentes a partir de fuentes secundarias disponibles, lo que permitió conocer la realidad actual de la cadena, así como sus fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas.

El resultado de este trabajo se puede ver en los documentos *Estudio del mercado de valorización de los residuos sólidos orgánicos de Cúcuta* y *Estudio del mercado de valorización de los residuos reciclables en Cúcuta*, en los que sobresale la conclusión de un mercado incipiente a nivel local y creciente a nivel nacional, con claras necesidades de incentivos y de desarrollos regulatorios que permitan garantizar los flujos de materiales a través de la cadena de valor, de una forma sostenible tanto técnica, como económica, idealmente al crear y consolidar capacidad local en la industria de la valorización o transformación.

En este sentido, los estudios de mercado antes mencionados concluyen que la industria para la valorización de las diferentes corrientes (orgánicos, reciclables e incluso la fracción no reciclable) está preparada para garantizar la demanda respectiva, en la medida en que condiciones de calidad, volumen y costo de los materiales recuperados se cumplan a satisfacción, incluyendo los costos logísticos que implica el movimiento de materiales valorizables a otras regiones del país. Es necesario intervenir en dicha cadena, desde una aproximación regulatoria (marco regulatorio que impulse y facilite la economía circular), social (sensibilización de la población), técnica (introducción de diferentes tecnologías que aseguren calidad y disponibilidad de los materiales valorizables) y financiera (inyección de recursos económicos en la cadena de valor, y financiamiento). También se visualiza la necesidad de contar con incentivos para el crecimiento local (Cúcuta) de capacidad, principalmente, en el eslabón de la transformación o valorización propiamente.

En la medida en que estos desarrollos se produzcan, es posible plantear escenarios futuros que determinan ciertos potenciales, que son los que se desarrollan en este documento.

1.2 Alcance y objetivo

Este documento se enfoca en analizar el potencial de valorización, en términos de volúmenes y tasas por tipo de material, de los residuos reciclables y orgánicos generados en Cúcuta, de acuerdo con distintos escenarios futuros de segregación en la fuente y de recolección selectiva planteados.

Como se indicó, los escenarios planteados se basan en suposiciones de cobertura poblacional de una eficiente segregación en la fuente y de la implementación formal de la recolección selectiva en diferentes grados de cobertura de la población total, con horizontes a 2030 y 2040.

Además, para los diferentes escenarios planteados, se supone la introducción de tecnologías y modelos operativos que permitan procesar, de forma eficiente y con economías de escala, los volúmenes proyectados para cada una de las corrientes residuales consideradas, apoyándose en las conclusiones respectivas de los estudios de mercado desarrollados.

Los materiales para los que se realiza el análisis corresponden a los residuos denominados «reciclables», entre los que se consideran las corrientes de celulosas, plásticos, metales y vidrios.

En el caso de la fracción orgánica, esta corresponde a la caracterizada en los estudios específicos y proyectada en el tiempo, según criterios de crecimiento poblacional, que corresponden a la corriente de compostables en el caso de análisis de esta tecnología, y a la fracción completa en el caso de otras tecnologías, como la biodigestión.

Los escenarios previstos, que definen el alcance del análisis, son los que se describen en el siguiente capítulo.

2 Definición de escenarios

Para el análisis del potencial de valorización de los residuos sólidos orgánicos y reciclables generados en Cúcuta, se propone evaluar tres escenarios futuros con distintos niveles de segregación en la fuente y de recolección selectiva (escenario 0, escenario 1 y escenario 2). A continuación, se define cada uno de ellos.

2.1 Definición del escenario 0

El escenario 0 corresponde a la proyección de la situación actual sin segregación en la fuente y recolección selectiva, incluyendo los principales proyectos e iniciativas en desarrollo, que consideran volúmenes u objetivos concretos.

Específicamente, se incluyen los siguientes proyectos e iniciativas:

- **Proyecto piloto de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos del Parque Agroecológico Metropolitano**

El proyecto del Parque Agroecológico Metropolitano, que está desarrollando la administración municipal de Cúcuta con la Fundación MIMA, incluye una planta de aprovechamiento de residuos sólidos. El proyecto consiste en implementar en el corto plazo un sistema piloto significativo de valorización de residuos sólidos orgánicos y reciclables en el municipio, que sirva de modelo para desarrollar un escalamiento hacia el futuro.

En esta primera fase del modelo piloto (que es la que se incluye en los cálculos de este escenario), se espera llegar, en el corto plazo (24 meses), a aprovechar 50 toneladas diarias (aproximadamente 1500 toneladas mensuales) de residuos orgánicos y reciclables, en una proporción inicial de 90 % orgánicos y máximo 10 % reciclables, provenientes de usuarios considerados grandes generadores, como plazas de mercado, supermercados, restaurantes, hoteles, empresas de alimentos, entre otros. Para tal efecto, se plantea construir una planta de aprovechamiento con dos áreas de procesamiento: una de productos reciclables como plásticos, vidrio, cartón, papel, chatarra, aluminio y cobre; y la segunda, y más representativa, es el área de biodegradación de productos orgánicos frescos, utilizando dos tecnologías básicas: lombricultura y compostaje controlado.

- **Resolución 1407 de 2018 (REP de envases y empaques)**

Esta resolución plantea alcanzar un 30 % de valorización de residuos de envases y empaques en el año 2030. Además, indica que, a partir de 2023, los productores con cobertura nacional deberán ampliar la cobertura de los planes de gestión ambiental de manera gradual y permanente a la ciudad de Cúcuta, entre otras ciudades.

Por lo tanto, para el cálculo de las proyecciones de las cantidades de residuos reciclables (celulosas, plásticos, metales y vidrio) destinados a valorización y disposición final en este escenario, el punto de partida son las toneladas aprovechadas reportadas en el SUI para el año 2021 (8840 toneladas a marzo 2022). A partir de estas cifras se considera lo siguiente:

- En 2023 se adiciona el 50 % de la capacidad de valorización de residuos reciclables proyectada para el Parque Agroecológico Metropolitano (900 t/año) y, en el año 2024, se adiciona la capacidad restante, alcanzando el 100 % de la capacidad de

valorización reciclable proyectada para el Parque Agroecológico Metropolitano (1800 t/año).

- A partir del año 2024, el porcentaje de valorización se incrementa entre 1 % y 2 % anual (dependiendo del material), como resultado de la implementación de la REP de envases y empaques en Cúcuta.

En el caso de los residuos orgánicos, el punto de partida son las toneladas valorizadas actualmente, que se estiman en 380 t/año, de acuerdo con los resultados del estudio de mercado (PREVEC, 2021). A partir de estas cifras, se considera lo siguiente:

- En el año 2023, se adiciona el 50 % de la capacidad de valorización de residuos orgánicos proyectada para el proyecto piloto de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos del Parque Agroecológico Metropolitano (8100 t/año) y, en 2024, se adiciona la capacidad restante, alcanzando el 100 % de la capacidad de valorización de residuos orgánicos proyectada para el proyecto piloto de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos del Parque Agroecológico Metropolitano (16 200 t/año).

2.2 Definición del escenario 1

En el escenario 1 se propone la implementación progresiva de un programa de segregación en la fuente y de recolección selectiva de los RSM hasta cubrir un 50 % de la población en el año 2030.

Gráfica 1. Propuesta de segregación en la fuente y recolección selectiva para el año 2030. Escenario 1



Fuente: GOPA Infra (2022)

Se plantea que la población segregue sus residuos en cuatro flujos: reciclables (celulosas, plásticos y metales), vidrio, orgánicos y rechazo.

El vidrio debe contar con un sistema de recolección diferenciado debido a lo siguiente:

- Por motivos de salud y seguridad operacional del personal de recolección, pues los vidrios se pueden romper y generar riesgo de cortes en el personal; además tienen un gran peso.
- Los residuos de vidrios pueden dañar la maquinaria de las plantas de clasificación, por lo que se debe evitar que ingresen a estas.
- Los residuos de vidrio tienen un canal de reciclaje diferenciado y existen empresas interesadas, exclusivamente, en estos residuos, por ejemplo, O-I Peldar.

Para la clasificación de los residuos reciclables recogidos selectivamente, se analiza tanto la continuación de un sistema, como el actual, mediante ECA, así como la implementación de una planta de clasificación y pretratamiento a escala industrial centralizada, que podría ser manejada por las mismas AdR o por el gremio Alianza R.

La valorización de la totalidad de los residuos orgánicos recogidos selectivamente se plantea mediante compostaje, debido al horizonte de tiempo evaluado (hasta 2030). Esta tecnología es más simple y robusta (soporta mejor las impurezas), por lo que se considera más adecuada mientras se consolida la segregación en la fuente y la recolección selectiva.

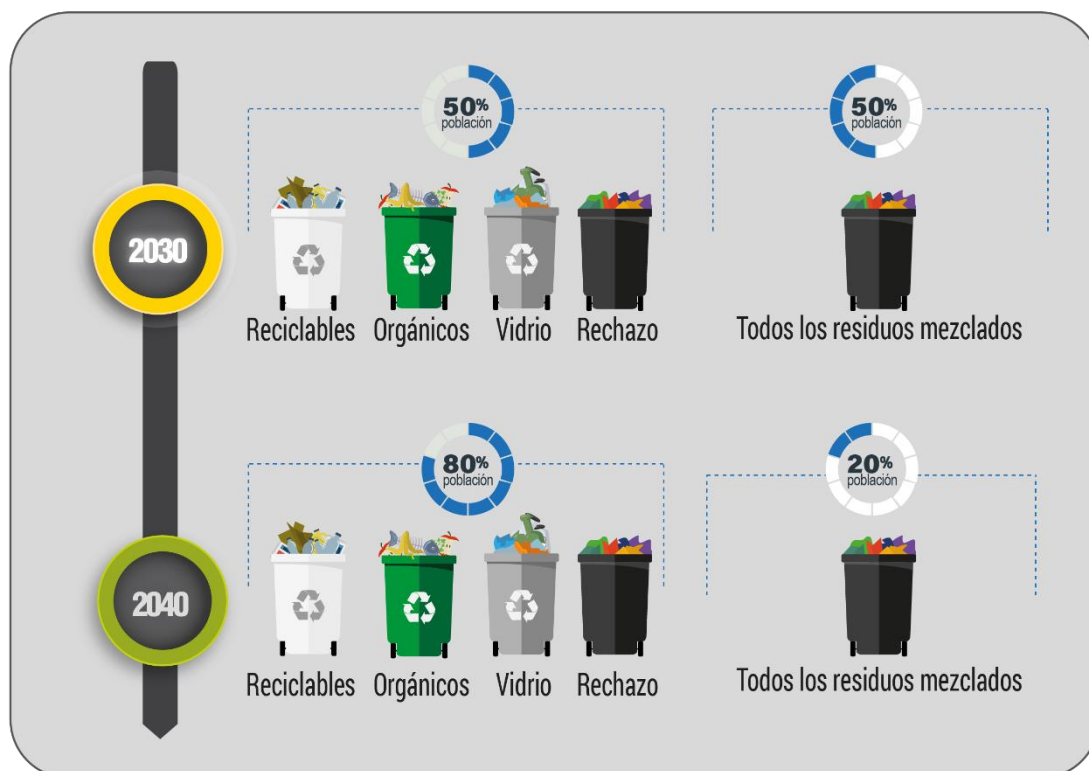
Para el cálculo de las proyecciones de las cantidades de residuos destinados a valorización y disposición final en este escenario, se han utilizado, como punto de partida, las proyecciones de las cantidades de generación de RSM que se presentan en el capítulo 3. A estas cantidades, se les aplica el porcentaje de la población con segregación en la fuente y recolección selectiva (50 % en el año 2030), así como la tasa de captura¹, que se estima en 70 % para el año 2030, como resultado de la implementación de medidas de sensibilización y participación de la población.

2.3 Definición del escenario 2

El escenario 2 se plantea como la continuación del escenario 1, por lo que empieza en el año 2031 y va hasta el año 2040. En este escenario, se propone la implementación progresiva de un programa de segregación en la fuente y recolección selectiva de los RSM hasta cubrir un 80 % de la población en 2040.

¹ Corresponde a una medición del porcentaje de un material valorizable determinado que, efectivamente, se separa en la fuente. Este indicador corresponde al cociente entre la cantidad entregada de un determinado material y el total generado.

Gráfica 2. Propuesta de segregación en la fuente y recolección selectiva. Escenario 2



Fuente: GOPA Infra (2022).

Al igual que para el escenario 1, se plantea que la población segregue sus residuos en cuatro flujos: reciclables (celulosas, plásticos y metales), vidrio, orgánicos y rechazo.

Para la valorización de los residuos reciclables recogidos selectivamente, se plantea un sistema de clasificación y pretratamiento a escala industrial.

La valorización de los residuos orgánicos recogidos selectivamente se plantea, en su mayoría, mediante compostaje y se propone la implementación de una planta de digestión anaerobia a nivel demostrativo para la posterior implementación de futuras plantas similares.

Para el cálculo de las proyecciones de las cantidades de residuos destinados a valorización y disposición final en este escenario, se han utilizado, como punto de partida, las proyecciones de las cantidades de generación de RSM que se presentan en el capítulo 3. A estas cantidades se les aplica el porcentaje de la población con segregación en la fuente y recolección selectiva (80 % en 2040), así como la tasa de captura, que se estima en 80 % para el año 2040, como resultado de la implementación de medidas de sensibilización y participación de la población.

2.4 Consideraciones generales para todos los escenarios

A continuación, se describen las consideraciones principales que se han tenido en cuenta para el análisis de los tres escenarios definidos previamente.

2.4.1 Implementación de sistemas de tratamiento mecánico-biológico

En todos los escenarios, se plantea la implementación de sistemas de tratamiento mecánico-biológico (TMB) como alternativa para el tratamiento de los residuos no recogidos de forma selectiva (rechazo), que tienen un contenido significativo de materia orgánica.

Este sistema de tratamiento forma parte integral de la infraestructura de tratamiento de residuos en diversos países, como Alemania, España, etc., y se menciona, también, como alternativa para la gestión integral de residuos sólidos (GIRS) en el documento de actualización de la contribución determinada a nivel nacional (NDC², por sus siglas en inglés) de Colombia para el periodo 2020-2030.

El tratamiento mecánico-biológico (TMB) es una combinación de procesos físicos (clasificación de residuos) y biológicos para el tratamiento de los residuos con contenido significativo de materia orgánica. Una ventaja clave de los sistemas TMB es que pueden ser configurados para alcanzar distintos objetivos. Algunos de los objetivos más comunes de las instalaciones TMB son:

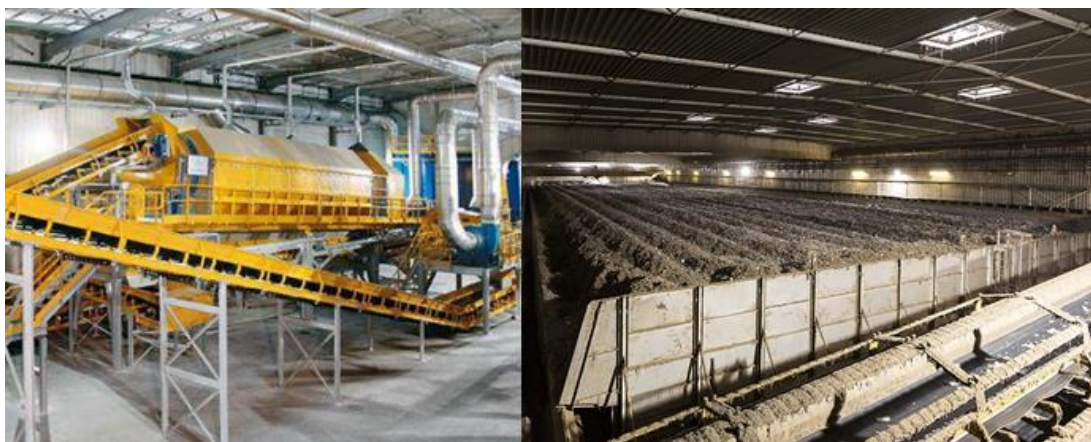
- Pretratamiento de los residuos antes de su disposición final.
- Desvío de residuos sólidos municipales no biodegradables que van a rellenos sanitarios mediante su clasificación mecánica en materiales para reciclaje y/o recuperación de energía como combustible derivado de residuos (CDR).
- Desvío de residuos sólidos municipales biodegradables que van a rellenos sanitarios mediante:
 - Reducción de masa antes de su disposición en el relleno sanitario.
 - Reducción de la biodegradabilidad antes de su disposición en el relleno sanitario.
 - Estabilización en un producto similar al compost para su uso en la tierra.
 - Conversión en biogás para recuperación de energía.
 - Secado de los residuos para producir una fracción orgánica con alto poder calorífico para uso como CDR.

Las instalaciones de TMB pueden funcionar con diferentes líneas y tecnologías en función de las necesidades y objetivos. En las instalaciones más comunes, la primera etapa está conformada por el tratamiento mecánico (aunque algunas instalaciones pueden invertir los procesos), que incluye, además de la recuperación de materiales valorizables, la separación de la materia orgánica contenida en los residuos de entrada. Los procesos biológicos que siguen pueden utilizar las distintas tecnologías existentes, tales como compostaje y/o digestión anaerobia. Entre las distintas alternativas de TMB, el tratamiento

² Nationally Determined Contribution.

mecánico seguido por el compostaje aeróbico es la tecnología más probada y económica. Esta es la alternativa que se propone en el presente análisis.

Imagen 1. Imágenes de una planta de tratamiento mecánico-biológico



Fuente: www.paprec.com

2.4.2 Clasificación y pretratamiento a escala industrial

A medida que se implementan estrategias de segregación en la fuente y de recolección selectiva, naturalmente, surgen necesidades de optimización en la operación de clasificación por tipo de materialidad. Es necesario considerar que la recolección selectiva, para ser eficiente en términos logísticos, implica que los materiales reciclables se recolectan en un mismo contenedor o bolsa, como los envases livianos, por ejemplo, incluso en algunos modelos con celulosas incluidas. Esto permite que, con base en una optimización logística, se maximice la recolección selectiva de estos materiales, que es necesario clasificar, luego, por tipo de material en instalaciones especialmente diseñadas para el efecto.

Las plantas de clasificación y pretratamiento se convierten, de esta forma, en un eslabón fundamental de la cadena de valor, ya que en ellas es posible generar volúmenes y calidad adecuada para los posteriores procesos de transformación de los diferentes materiales involucrados. Esto se ratifica al observar la experiencia internacional en países con avances significativos en gestión integral de residuos y altas tasas de valorización, donde este tipo de instalaciones son un elemento fundamental del sistema.

Mientras en Europa abundan las instalaciones de clasificación y pretratamiento que, como se indicó, constituyen un eslabón clave en la cadena de valor, en América Latina comienzan a aparecer de la mano de avances regulatorios en torno a residuos sólidos y en particular de envases y empaques. Aquí, la implementación de regulaciones en torno a la responsabilidad extendida del productor (REP) para envases y empaques, con base en la que se establecen metas de recolección y valorización crecientes en el tiempo, implican la necesidad de avanzar en la construcción y operación de esta infraestructura. Así, proyectos de este tipo ya se van convirtiendo en una realidad en países como Chile, Brasil y México, principalmente.

En cuanto al tamaño y capacidad de procesamiento, las plantas de clasificación y pretratamiento se pueden diseñar según las necesidades específicas que implique la gestión local. Sin perjuicio de lo anterior, la experiencia internacional muestra que grandes

plantas con capacidades superiores a las 100 000 t/año solamente se justifican para grandes ciudades donde los flujos de materiales están asegurados, así como también las condiciones económicas de la gestión. En general, y tomando como referencia la experiencia europea, se observa que, las instalaciones de mediano tamaño, de entre 50 000 y 70 000 t/año de capacidad, resultan ser más flexibles y con menos riesgos de inversión. Ese es, precisamente, el rango de tamaño que más se observa en la actualidad. En el caso particular de Cúcuta, como se observa más adelante, se ha definido un tamaño que podría calificarse como pequeño, con una capacidad de 30 000 t/año.

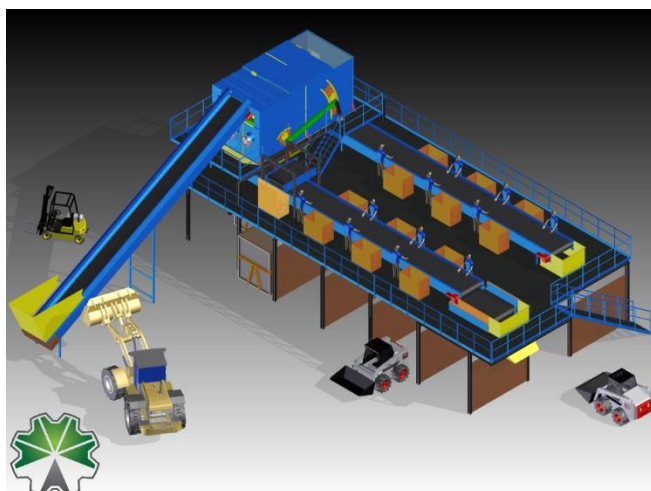
Una planta de clasificación cuenta con diversos procesos mecánicos, que podrán estar más o menos automatizados según la disponibilidad de recursos y el costo de mano de obra. Revisando la experiencia internacional, es posible observar plantas que operan 100 % con base en clasificación manual, mientras hay otras con altos grados de automatización fundamentada en la utilización de lectores ópticos (tecnología de lectura infrarroja) que seleccionan diferentes materiales, aumentando los niveles de calidad en la clasificación. Para el caso de las necesidades proyectadas en Cúcuta, se proponen, precisamente, plantas de tamaño pequeño, con una alta incidencia de clasificación manual.

Imagen 2. Línea de clasificación manual

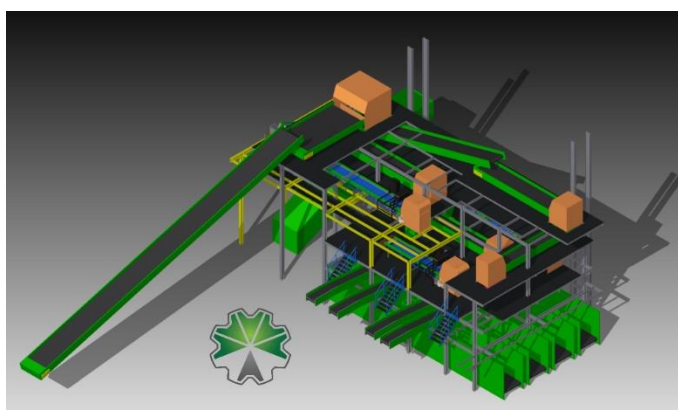


Fuente: Deysa.com.ar

Imagen 3. Esquema de línea de clasificación semiautomatizada



Fuente: parinisrl.it

Imagen 4. Esquema de línea de clasificación automatizada

Fuente: parinisrl.it

Una planta de clasificación consta, en general, de las siguientes instalaciones y equipamiento:

- Área de recepción de residuos reciclables separados en la fuente
- Equipo de trituración primaria o abertura de bolsas
- Sector de separación de voluminosos e impropios
- Equipo de clasificación por forma y/o tamaño (trommel o separador balístico)
- Equipo separador de metales
- Cintas de clasificación para materiales 2D y 3D, con puestos de clasificación manual
- Eventual (deseado): automatización con base en separadores ópticos para fracciones de mayor valor (PET, PEAD, PP, por ejemplo)
- Boxes para cada tipo de material clasificado
- Compactadora/ embaladora
- Área de acumulación de rechazo (fracción no reciclable)
- Sector de almacenamiento
- Área de despacho
- Otros equipos e infraestructura específica

2.4.3 Uso de rechazo de clasificación y TMB para preparación de CDR

Las plantas de clasificación de envases y empaques generan, en promedio, aproximadamente un 30 % de rechazo en sus operaciones de clasificación, que corresponde a la fracción no reciclable de los residuos inorgánicos. Esta condición de «fracción no reciclable» se puede deber a los grados de contaminación con que llegue el material, o a la presencia de materiales que no cuentan con alternativas disponibles para su reciclaje, como envases multicapas, tipos específicos de plásticos, etc.

Esta fracción no reciclable cuenta, en general, con un interesante potencial calorífico. Su poder calorífico neto gira en torno a las 4000 kcal/kg, lo que lo convierte en un material atractivo para ser utilizado como combustible en ciertos procesos industriales, entre estos, la industria cementera es la que cuenta con mayor experiencia a nivel internacional.

La industria cementera, durante el proceso de producción de clínker (materia prima principal del cemento), demanda altos volúmenes de combustible fósil, que, en el caso de la industria cementera colombiana, corresponde, principalmente, a carbón (una alternativa al carbón es el coque de petróleo, también conocido como petcoke). Esta alta demanda de

energía térmica, con base en combustibles fósiles, ha llevado a la industria cementera a plantear estrategias de sostenibilidad basadas en la búsqueda de combustibles alternativos. El denominado combustible derivado de residuos (CDR) se ha convertido en una alternativa real de esa industria para disminuir su consumo de combustibles fósiles, con importantes impactos positivos en la disminución de emisiones de CO₂.

Las características del proceso productivo del clínker lo hacen una opción ideal para reemplazar combustibles fósiles por CDR, disminuyendo las emisiones, dando una gestión eficiente y sostenible a importantes volúmenes de residuos y controlando sus costos operativos. Esta actividad, en conjunto con el reemplazo de materias primas vírgenes por corrientes específicas de ciertos residuos, es conocida como coprocesamiento, que se ha consolidado como una de las principales estrategias de sostenibilidad de la industria cementera a nivel mundial.

En Europa, por ejemplo, la industria cementera satisface más del 50 % de su demanda de combustibles a través del coprocesamiento de combustibles derivados de residuos, mientras que, en América Latina, ese indicador no supera el 15 %, lo que demuestra el gran potencial que se puede aprovechar. Adicionalmente, es importante destacar que Colombia cuenta con plantas cementeras de la mejor tecnología disponibles, que hacen que ese potencial sea aún más evidente.

También, resulta relevante el hecho de que la industria cementera colombiana ha asumido el compromiso de avanzar en coprocesamiento, poniéndose como meta reemplazar al menos el 30 % de los combustibles fósiles que demanda hacia el año 2030, lo que implica una oportunidad real de dar un destino sostenible, basado en la valorización, a la fracción no reciclable de los residuos inorgánicos.

Para su materialización, el coprocesamiento de CDR requiere de la implementación de tecnologías de pretratamiento que permitan producir un CDR de calidad a partir de la fracción no reciclable de residuos sólidos y, también, de la implementación de inversiones en las plantas cementeras para recepción y alimentación del CDR a sus procesos.

Imagen 5. Línea de producción CDR



Fuente: Untha.com

Imagen 6. CDR y horno cementero



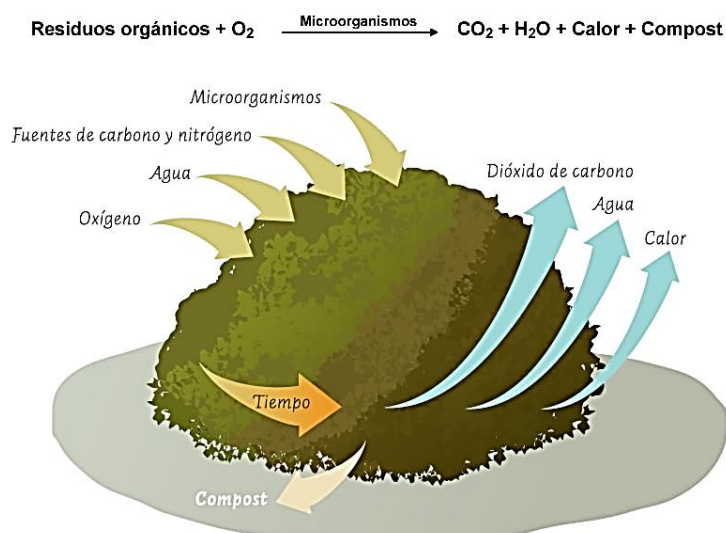
Fuente: coactiva.cl

2.4.4 Tecnologías para el tratamiento/ valorización de residuos orgánicos

2.4.4.1 Compostaje

El compostaje es un sistema de tratamiento de residuos orgánicos a través del cual los residuos se descomponen en condiciones controladas por efecto de la acción de microorganismos, en presencia de oxígeno. Este proceso ocurre en presencia de humedad y genera elevadas temperaturas que permiten higienizar la mezcla, produciendo dióxido de carbono, agua y materia orgánica estabilizada (INN, 2015), denominada compost. Se estima que, del total de residuos orgánicos que entran a un proceso de compostaje, entre el 20 y el 30 % termina convertido en compost.

Figura 1. El proceso de compostaje



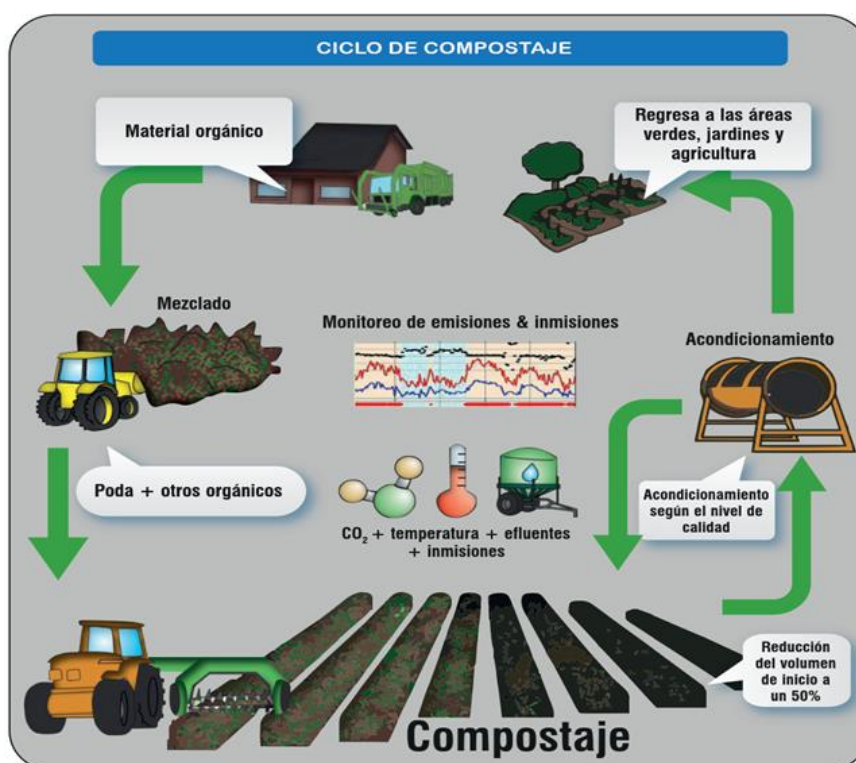
Fuente: <http://residus.gencat.cat/>

Las condiciones que favorecen el crecimiento de los microorganismos aeróbicos son (Programa Reciclo Orgánicos, 2019): presencia de oxígeno, temperatura adecuada (etapa inicial ~ 50 °C, etapa final ~ 40 °C), humedad (50 a 70 % en peso) y una relación C/N balanceada. Otros factores que pueden influir en el desarrollo son el pH (compostaje activo ~ 5, etapa de curado ~ 8,0 a 9,0), fuentes energéticas de fácil solubilización, como azúcares simples y la superficie de contacto o tamaño de partícula. Para cumplir con estas condiciones, normalmente los ROM se deben mezclar con materiales o residuos vegetales

voluminosos secos y ricos en carbono antes de iniciar el proceso de compostaje, como poda de árboles, corte de césped o residuos con alto contenido lignocelulósico de actividades agrícolas.

Las tecnologías de compostaje se pueden clasificar, principalmente, en las siguientes categorías: 1) sistemas abiertos (siendo el compostaje en hileras el más común) o cerrados (biorreactores o tambores); y 2) sistemas con ventilación forzada (WFA) o sin ventilación (WOFA). La selección de la tecnología dependerá de la capacidad requerida, del espacio disponible, las características de los residuos y las condiciones ambientales, entre otros. La siguiente figura muestra el concepto de flujo del proceso de compostaje.

Figura 2. Ciclo de compostaje



Fuente: GOPA Infra (2022).

A continuación, se presentan algunas imágenes de distintas plantas de compostaje.

Imagen 7. Planta de compostaje en hileras descubierta



Fuente: <https://www.rts.com/blog/what-is-commercial>

Imagen 8. Planta de compostaje en hileras cubierta



Fuente: <http://proferco.com.co/procesos.html>

Imagen 9. Sistema cerrado: biorreactor



Fuente: <https://bit.ly/2YcePY1>

Imagen 10. Planta de compostaje estático, cubierta y con aireación forzada



Fuente: <https://bit.ly/3zPQlKB>

Imagen 11. Planta de compostaje en pilas



Fuente: <https://bit.ly/2XZoq4w>

El principal producto del compostaje es el compost. Debido a que las propiedades físicas y químicas de los ROM varían mucho, el compost también puede tener características variables, especialmente, si el proceso de compostaje no se controla estrechamente o no se lleva a cabo en su totalidad.

Las principales características que suelen afectar la idoneidad del compost como enmienda del suelo son: la madurez, la disponibilidad de nutrientes, el pH, la presencia de contaminantes, la capacidad de retención de agua y la porosidad. Como enmienda del suelo, el compost se puede utilizar como fuente de nutrientes de liberación lenta, como potenciador de las propiedades físicas del suelo, como manto o como material de cama. En general, el compost de alta calidad tiene un color oscuro, un olor agradable a tierra, una gran capacidad de retención de agua y una gran aireación (Harrison, 2008).

Entre los beneficios del compost se encuentran los siguientes:

1. Varios estudios indican que el uso de compost en la tierra puede mejorar parámetros de las plantas y del suelo, lo que haría del compost una opción interesante para la restauración del suelo, así como para aprovechar sus propiedades como fertilizante. El compost repone nutrientes y materia orgánica, mantiene la humedad y el crecimiento de las plantas, aumenta la absorción de los fertilizantes por parte de las plantas, evita la erosión del suelo y reduce las necesidades de riego³.

³ El 45 % de los suelos se enfrenta a un agotamiento de nutrientes en determinadas zonas, que se ve agravado por los fertilizantes sintéticos (Banco Mundial, 2018).

2. La adición de compost aumenta el contenido de materia orgánica del suelo, lo que mejora la agregación y la estabilidad, mejorando así la estructura del suelo (Diacono & Montemurro, 2010).
3. La estabilidad de la agregación del suelo evita el sellado de la superficie, mejora la infiltración del agua y aumenta la capacidad de retención del agua, reduciendo así la generación de escorrentía y la erosión del suelo (ROU, 2007).
4. Además, el aumento de los niveles de materia orgánica del suelo favorece el secuestro de carbono (Favoino & Hogg, 2008), que se ha estimado en 0,18 t CO₂ eq por tonelada de compost (Lou & Nair, 2008).
5. Mejora de la actividad biológica (Bastida *et al.*, 2008).
6. Mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas (Boldrin *et al.*, 2009).
7. Supresión de las enfermedades transmitidas por el suelo (Bonanomi, 2007).
8. Varios autores han identificado un mayor rendimiento con la aplicación de compost y una mejor calidad de los cultivos cosechados.
9. Reciclaje de nutrientes, especialmente el fósforo (un recurso finito), y disminución de la necesidad del uso de fertilizantes químicos y su contaminación relacionada.

Ahora bien, es preciso tener en cuenta que la aplicación de compost también puede provocar inconvenientes ambientales y agronómicos, como emisiones de gases y lixiviados, y aumento del contenido de sales y metales pesados, etc. (Hargreaves *et al.*, 2008). Sin embargo, estas cuestiones están, en general, directamente asociadas con la calidad del compost final.

2.4.4.2 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia (también denominada biodigestión o biometanización) consiste en tratar de forma controlada los residuos orgánicos en ausencia de oxígeno. Se trata de un proceso complejo en el cual intervienen diferentes grupos de microorganismos. La materia orgánica se descompone en compuestos más sencillos que son transformados en ácidos grasos volátiles, que son los principales intermediarios y moduladores del proceso. Estos ácidos son consumidos por los microorganismos metanogénicos que producen metano y dióxido de carbono, los principales componentes del biogás. Este proceso se lleva a cabo en reactores a prueba de aire, comúnmente llamados digestores.

Hay muchos tipos de plantas de biodigestión. Las tecnologías de digestión anaerobia se pueden clasificar, principalmente, en las siguientes categorías: 1) sistemas húmedos o sistemas secos, dependiendo del contenido de sólidos totales presentes en el sustrato; 2) sistemas continuos o por lote, dependiendo del tipo de alimentación; 3) sistemas mesófilicos o termófilicos, dependiendo de la temperatura del proceso; y 4) sistemas de una etapa o multietapas, dependiendo del número de etapas del proceso.

La configuración que tenga una planta se ajustará al tipo de suministro que reciba y a un análisis local de ventajas y desventajas que presente cada alternativa. A continuación, se presentan algunas imágenes de plantas de DA.

Imagen 12. Planta de biometanización de Can Barba, Terrassa, España

Fuente: <https://www.retema.es/articulo/remodelacion-de-la-planta-de-biometanizacion-de-can-barba-terrassa-oz3DS>

Imagen 13. Planta de biometanización en Holkham, Inglaterra

Fuente: <https://www.holkham.co.uk/about-us/renewable-energy/anaerobic-digestion>

Imagen 14. Planta de biometanización en Surrey, Inglaterra

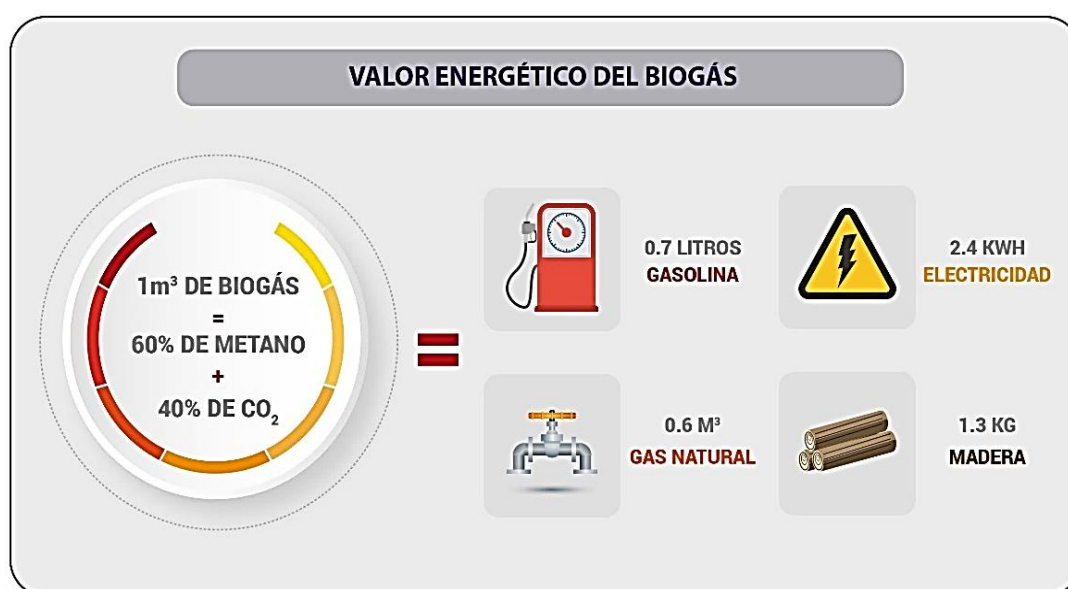
Fuente: <https://resource.co/sustainability/article/new-anaerobic-digestion-plant-opens-surrey>

Se obtienen dos productos del proceso: biogás y digestato. El biogás es un gas rico en metano (CH_4) en una concentración de entre 55 % y 70 % en volumen. Casi todo lo demás corresponde a dióxido de carbono (CO_2), pero suele tener otros compuestos, como trazas de nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), vapor de agua y amoníaco

(NH₃), que actúan como impurezas y puede ser necesario retirarlos, dependiendo del uso final.

En promedio, la producción de biogás en las plantas de digestión anaerobia de ROM se estima en 100 m³ de biogás por tonelada de residuo tratada, lo que puede variar dependiendo, principalmente, de las características de los residuos de entrada (contenido de sólidos volátiles) y de las condiciones del proceso. El metano es el componente energético útil en el biogás; este último tiene un poder calorífico variable. En promedio, 1 m³ de biogás contiene 6 kWh (21,6 MJ) de energía.

Figura 3. Valor energético del biogás



Fuente: <https://www.redagricola.com/>

Por lo general, el biogás producido tiene los siguientes usos:

- Generación de energía eléctrica y térmica. Por lo general, la electricidad se consume en la propia planta y/o se exporta a la red eléctrica o para su uso en zonas cercanas, mientras que el calor se aprovecha en el propio proceso de producción del biogás y, también, se puede exportar para uso por consumidores y consumidoras cercanas. La generación de energía eléctrica es de, aproximadamente, 200 kWh/t (Eawag, 2014). Esto representa una potencia instalada de, aproximadamente, 0,50 MW para una planta con capacidad de tratamiento de 20 000 toneladas por año (tpa).
- Generación de biometano mediante un proceso de enriquecimiento (*upgrading*) del biogás. El biometano se puede usar en reemplazo del gas natural, sobre todo, mediante inyección directa a la línea de gas o en vehículos. La generación de biometano suele ser de, aproximadamente, 60 % del biogás producido.

El otro producto, el digestato, es un biofertilizante que se puede utilizar como aditivo o estabilizador de suelos en la agricultura, en mezclado de tierras, así como en la horticultura y el paisajismo. Se recomienda deshidratar y estabilizar el digestato a través de procesos como el compostaje antes de su utilización, como mínimo durante cuatro semanas, para asegurar su higienización (eliminación de patógenos).

La DA es un proceso tecnológicamente más complejo y fácil de perturbar que los tratamientos biológicos aeróbicos (por ejemplo, compostaje). Cambios en las condiciones circundantes, los residuos de entrada o los niveles de sustancias inhibitoras tóxicas

pueden interrumpir o detener fácilmente el proceso anaerobio (Eawag, 2014). Por eso, la DA se ha venido utilizando, principalmente, para tratar residuos de actividades agrícolas, ya que estas corrientes son más homogéneas, están mejor definidas y son más limpias.

Al mismo tiempo, esta tecnología tiene ventajas en comparación con los tratamientos biológicos aeróbicos, como:

- Menor ocupación de espacio. El requerimiento de área para la DA se encuentra entre 0,10 y 0,25 m²/tpa, mientras que, para el compostaje, se requieren entre 0,4 y 1,0 m²/tpa, dependiendo del sistema que se utilice (BID, 2022).
- Generación de energía renovable.
- Menor tiempo de descomposición de los residuos.

3 Generación de residuos sólidos municipales y su proyección (2021-2040)

El punto de partida para las proyecciones de las cantidades de residuos destinados a valorización y disposición final en cada uno de los escenarios definidos previamente son las proyecciones de las cantidades de RSM generados en Cúcuta entre los años 2021 y 2040.

Se consideran, como generación total de RSM, las cantidades de residuos dispuestas y aprovechadas reportadas en el SUI para el año 2021 (250 372 toneladas de residuos dispuestos + 8840 toneladas de residuos aprovechados). La distribución de estas toneladas por tipo de residuos se realiza con base en la composición promedio obtenida en el *Estudio de caracterización de residuos sólidos realizada en Cúcuta* en el año 2021, que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Composición promedio de los RSM

Descripción	%	Generación año 2021 en t/año
Orgánicos	57	148 328
Celulosas	8	20 389
Plásticos	15	39 003
Metales	1	3099
Vidrios	3	7661
Otros⁴	16	40 731
Total	100,0	259 212

Fuente: GOPA Infra (2021).

A partir de estos volúmenes, se proyecta la generación, hasta el año 2040, por tipo de residuo. Para esta proyección, se ha utilizado el crecimiento de población indicado para los próximos años en la actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos del municipio de San José de Cúcuta del año 2021 y un incremento anual del 1 % de la PPC (MinAm-MEF).

En la siguiente tabla, se presentan la generación de RSM para el año 2021 y su proyección para los años 2022 a 2040.

⁴ Incluye residuos peligrosos y residuos no aprovechables, que no tienen potencial de valorización.

Tabla 2. Generación actual y proyección de la generación de RSM en Cúcuta en t/año (2021-2030)

Descripción	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Orgánicos	148 328	150 590	152 791	155 036	157 279	159 542	161 832	164 150	166 495	168 870
Celulosas	20 389	20 700	21 002	21 311	21 619	21 930	22 245	22 564	22 886	23 212
Plásticos	39 003	39 598	40 177	40 767	41 357	41 952	42 554	43 164	43 780	44 405
Metales	3099	3147	3193	3239	3286	3334	3381	3430	3479	3529
Vidrios	7661	7778	7892	8008	8124	8241	8359	8479	8600	8723
Otros	40 731	41 352	41 957	42 573	43 189	43 810	44 439	45 076	45 720	46 372
Total	259 212	263 164	267 012	270 935	274 853	278 808	282 810	286 862	290 960	295 110

Fuente: GOPA Infra (2022).

Tabla 3. Proyección de la generación de RSM en Cúcuta en t/año (2031-2040)

Descripción	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Orgánicos	171 279	173 651	176 002	178 339	180 669	182 995	185 311	187 615	189 907	192 189
Celulosas	23 544	23 870	24 193	24 514	24 834	25 154	25 472	25 789	26 104	26 418
Plásticos	45 038	45 662	46 280	46 894	47 507	48 119	48 728	49 334	49 936	50 536
Metales	3579	3628	3678	3726	3775	3824	3872	3920	3968	4016
Vidrios	8847	8969	9091	9212	9332	9452	9572	9691	9809	9927
Otros	47 033	47 685	48 330	48 972	49612	50 250	50 886	51 519	52 149	52 775
Total	299 320	303 465	307 573	311 657	315 729	319 793	323 841	327 868	331 874	335 861

Fuente: GOPA Infra (2022).

4 Análisis del escenario 0

4.1 Resumen del escenario 0

- Corresponde a la proyección de la situación actual sin segregación en la fuente y recolección selectiva, incluyendo los principales proyectos e iniciativas en desarrollo, que consideran volúmenes u objetivos concretos.
- Los proyectos e iniciativas que se consideran son el proyecto piloto de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos del Parque Agroecológico Metropolitano y la implementación de la Resolución 1407-2018 (REP de envases y empaques) a partir del año 2023.
- Clasificación de los residuos reciclables en ECA.
- Tratamiento de los residuos orgánicos en plantas de compostaje.
- Implementación de una instalación TMB a nivel demostrativo.
- Valorización del rechazo con alto poder calorífico procedente de la TMB como CDR en la industria cementera.

4.2 Proyección de las cantidades de RSM para valorización y disposición final

En este ítem, se proyectan las cantidades de RSM destinados a valorización y disposición final en este escenario.

Para el cálculo de las proyecciones de las cantidades de residuos reciclables (celulosas, plásticos, metales y vidrio), el punto de partida son las toneladas aprovechadas reportadas en el SUI para el año 2021 (8840 toneladas a marzo 2022). A partir de estas cifras, se considera lo siguiente:

- En el año 2023, se adiciona el 50 % de la capacidad de valorización de residuos reciclables proyectada para el proyecto piloto de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos del Parque Agroecológico Metropolitano (900 t/año) y en el año 2024 se adiciona la capacidad restante, para alcanzar el 100 % de la capacidad de valorización reciclable proyectada para el proyecto piloto de la planta de aprovechamiento del Parque Agroecológico Metropolitano (1800 t/año).
- A partir de 2024, el porcentaje de valorización se incrementa entre 1 % y 2 % anual (dependiendo del material), como resultado de la implementación de la REP de envases y empaques en Cúcuta.

En el caso de los residuos orgánicos, el punto de partida son las toneladas valorizadas actualmente, que se estiman en 380 t/año, de acuerdo con los resultados del estudio de mercado (PREVEC, 2021).

A partir de estas cifras, se considera lo siguiente:

- En el año 2023, se adiciona el 50 % de la capacidad de valorización de residuos orgánicos proyectada para el proyecto piloto de la planta de aprovechamiento de

residuos sólidos del Parque Agroecológico Metropolitano (8100 t/año) y, en el año 2024, se adiciona la capacidad restante, hasta alcanzar el 100 % de la capacidad de valorización de residuos orgánicos proyectada para el proyecto piloto de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos del Parque Agroecológico Metropolitano (16 200 t/año).

En los siguientes ítems, se analizan, con detalle, los valores que se presentan en las siguientes tablas; sin embargo, de forma general, podemos observar que el porcentaje de residuos reciclables y orgánicos destinados a valorización se incrementa en 8,4 % entre los años 2022 y 2030, pasando de 3,6 % a 12,0 %.

Tabla 4. Proyección de la cantidad de RSM destinados a valorización y disposición final en Cúcuta en t/año. Escenario 0 (2022-2030)

Descripción	Destino	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Celulosas	Valorización	5654	6221	7033	7567	8114	8676	9251	9841	10 446
	Disposición final (DF)	15 046	14 782	14 278	14 052	13 816	13 569	13 313	13 045	12 767
Plásticos	Valorización	2423	2665	3261	3722	4195	4681	5180	5691	6217
	DF	37 174	37 512	37 506	37 635	37 757	37 873	37 984	38 089	38 188
Metales	Valorización	628	694	842	920	1000	1082	1166	1252	1341
	DF	2518	2498	2397	2366	2334	2299	2264	2227	2188
Vidrios	Valorización	269	295	400	487	577	669	763	860	959
	DF	7509	7597	7608	7636	7664	7690	7716	7740	7763
Orgánicos	Valorización	380	8480	16 580	16 580	16 580	16 580	16 580	16 580	16 580
	DF	150 210	144 311	138 456	140 699	142 962	145 252	147 570	149 915	152 290
Otros	DF	41 352	41 957	42 573	43 189	43 810	44 439	45 076	45 720	46 372
Total reciclables	Valorización	8975	9875	11 537	12 696	13 886	15 107	16 360	17 645	18 963
	DF	62 248	62 389	61 789	61 689	61 570	61 432	61 276	61 100	60 906
Total	Valorización	9355	18 355	28 117	29 276	30 466	31 687	32 940	34 225	35 543
	DF	253 810	248 657	242 818	245 577	248 342	251 123	253 922	256 735	259 568

Fuente: GOPA Infra (2022).

Tabla 5. Porcentaje de valorización por tipo de residuo en Cúcuta. Escenario 0 (2021-2030)

Descripción	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Orgánicos	0,3 %	0,3 %	5,6 %	10,7 %	10,5 %	10,4 %	10,2 %	10,1 %	10,0 %	9,8 %
Celulosas	27,3 %	27,3 %	29,6 %	33,0 %	35,0 %	37,0 %	39,0 %	41,0 %	43,0 %	45,0 %
Plásticos	6,1 %	6,1 %	6,6 %	8,0 %	9,0 %	10,0 %	11,0 %	12,0 %	13,0 %	14,0 %
Metales	20,0 %	20,0 %	21,7 %	26,0 %	28,0 %	30,0 %	32,0 %	34,0 %	36,0 %	38,0 %
Vidrios	3,5 %	3,5 %	3,7 %	5,0 %	6,0 %	7,0 %	8,0 %	9,0 %	10,0 %	11,0 %
Promedio reciclables	12,6 %	12,6 %	13,7 %	15,7 %	17,1 %	18,4 %	19,7 %	21,1 %	22,4 %	23,7 %
Promedio total	3,6 %	3,6 %	6,9 %	10,4 %	10,7 %	10,9 %	11,2 %	11,5 %	11,8 %	12,0 %*

Fuente: GOPA Infra (2022).

*Este porcentaje no incluye la valorización como CDR de las 6000 toneladas procedentes de la instalación TMB, con lo cual, la tasa de valorización se incrementa a 14,1 %.

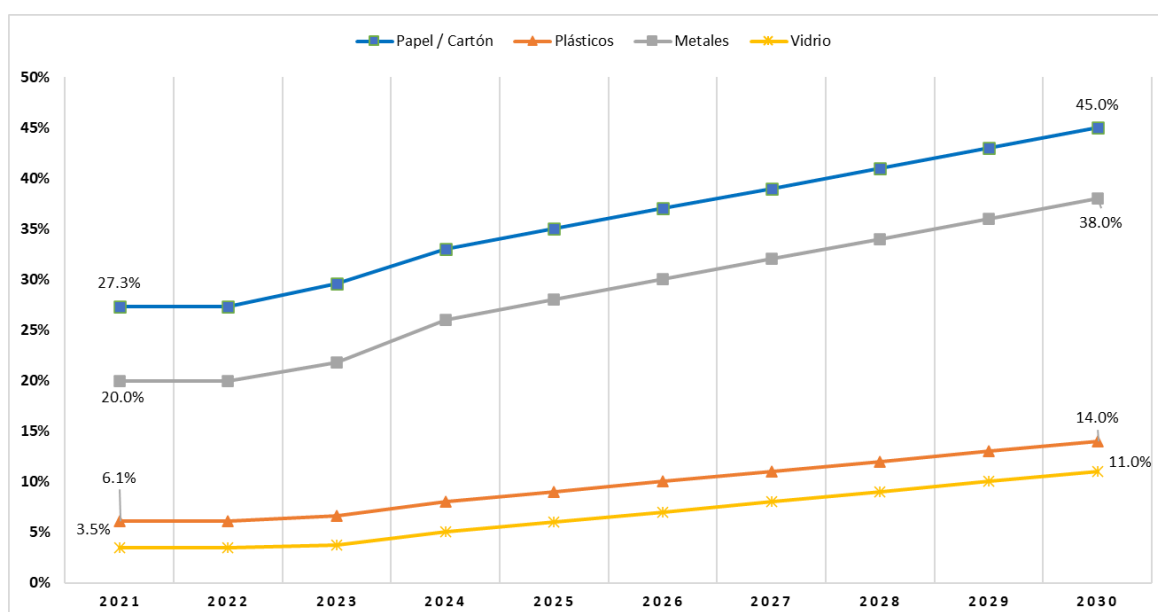
4.3 Análisis de las cantidades de residuos reciclables

4.3.1 Cantidades de residuos reciclables destinados a valorización

Como se puede ver en las tablas anteriores, en promedio, el porcentaje de residuos reciclables destinados a valorización se estima en 12,6 % en el año 2021, y se incrementa a 23,7 % en el año 2030.

En la siguiente gráfica, se muestra la variación en el porcentaje de residuos reciclables destinados a valorización entre los años 2021 y 2030, por tipo de material.

Gráfica 3. Porcentaje de valorización por tipo de residuo reciclable. Escenario 0



Fuente: GOPA Infra.

Como se puede ver en la gráfica anterior:

- El porcentaje de celulosas destinadas a valorización se estima en 27,3 % para el año 2021 y se proyecta un incremento de este a lo largo del tiempo, hasta llegar a 45,0 % en el año 2030.
- El porcentaje de plásticos destinados a valorización se estima en 6,1 % en el año 2021 y se proyecta un incremento de este a lo largo del tiempo, hasta llegar a 14,0 % en el año 2030.
- El porcentaje de metales destinados a valorización se estima en 20,0 % en el año 2021 y se proyecta un incremento de este a lo largo del tiempo, hasta llegar a 38,0 % en el año 2030.
- El porcentaje de vidrios destinados a valorización se estima en 3,5 % en el año 2021 y se proyecta un incremento de este a lo largo del tiempo, hasta llegar a 11,0 % en el año 2030.

4.3.2 Clasificación y pretratamiento de residuos reciclables

En total, se estima que, en el año 2030, estaría llegando a las estaciones de clasificación y pretratamiento (ECA) un total de 19 000 toneladas de residuos reciclables, cifra que, para el año 2021, se estimó en 8840 t/año, de acuerdo con los datos reportados en el SUI.

De acuerdo con la información obtenida del registro único de prestadores de servicios públicos (RUPS) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) con fecha noviembre 2021, en el año 2021, había un total de 27 ECA en Cúcuta. Considerando las 8840 t/año de residuos reciclables mencionadas para el año 2021, se calcula que, cada ECA gestiona, en promedio, 327 toneladas de residuos reciclables por año. Tomando como base esta capacidad de 327 t/año por ECA, se calcula que, para gestionar las 19 000 t/año de residuos reciclables proyectadas para el año 2030, se necesitarían, aproximadamente, 31 ECA adicionales.

4.3.3 Transformación de residuos reciclables

Con base en los resultados del estudio de mercado (PREVEC, 2021), se sabe que la industria transformadora está interesada en recibir más cantidad de material posconsumo del que reciben en la actualidad, por lo que, muy probablemente, las cantidades de residuos reciclables destinadas a valorización en este escenario resultarán aún insuficientes para satisfacer la demanda de esta industria.

Específicamente, en el caso de los plásticos, para el año 2022, se proyecta que se destinen a valorización 2423 toneladas, cantidad que se incrementa a 6217 toneladas para el año 2030, principalmente como consecuencia de la implementación de la REP en Cúcuta a partir del año 2023.

En entrevistas realizadas en el marco del estudio de mercado (PREVEC, 2021), se tuvo conocimiento de que la industria transformadora de plástico tiene, entre sus planes a corto y mediano plazos, el incremento de capacidad de procesamiento de plásticos.

Específicamente, en Cúcuta, dos de los actores más representativos de la industria transformadora de plásticos, Andecol y Proyecciones Plásticas Lirios del Campo, que actualmente transforman, aproximadamente, 4800 y 3000 t/año de plásticos, respectivamente, se encuentran en un continuo proceso de crecimiento y han manifestado de manera expresa que tienen necesidad de recibir mayores volúmenes de material posconsumo.

Asimismo, a nivel nacional, Apropet tiene, entre sus planes de crecimiento, realizar una ampliación de su planta para finales del año 2022, lo que implicaría triplicar la capacidad de su planta de reciclaje de PET (actualmente, 700 t/mes). Del mismo modo, Enka también tiene planes de duplicar la capacidad de su planta (actualmente, 1500 t/mes) en el corto y mediano plazos. Tan solo entre estas dos empresas, habría un incremento de capacidad de procesamiento de plásticos de, aproximadamente, 34 800 t/año. Además, hay que considerar que otras industrias del sector también tienen planes de incrementar su capacidad. Ese es el caso de Essentia, aunque esta empresa indicó que esta información es aún confidencial.

En el caso de las celulosas, para el año 2022, se proyecta que se destinen a valorización 5654 toneladas, cantidad que se incrementa a 10 446 toneladas para el año 2030, principalmente, como consecuencia de la implementación de la REP en Cúcuta a partir del año 2023.

Actualmente, no hay industria transformadora de celulosas en Cúcuta, pero sí 15 empresas transformadoras a nivel nacional, muchas de las cuales reciben el material proveniente de Cúcuta a través de los intermediarios o comercializadoras. De acuerdo con la información de la DIAN y el DANE, en el año 2021 estas empresas realizaron importaciones de papel y cartón posconsumo, equivalentes a 140 903 toneladas⁵, lo que significa que la oferta nacional es aún deficitaria al compararla con la capacidad de procesamiento. La Cámara de Pulpa, Papel y Cartón de la ANDI declara que, además, hay diversas iniciativas para adaptarse a las nuevas realidades y exigencias de los mercados, incluyendo la maximización en la utilización de materias primas recicladas, lo que implica un permanente proceso de adaptación y de crecimiento en la capacidad de recepción y valorización de residuos a calidades adecuadas.

En el caso del vidrio, para el año 2022, se proyecta que se destinen a valorización 269 toneladas, cantidad que se incrementa a 959 toneladas para el año 2030, principalmente, como consecuencia de la implementación de la REP en Cúcuta a partir del año 2023.

Actualmente, no existe industria transformadora de vidrio en Cúcuta y, como se desprende de las cifras, este es el residuo reciclable que menos se destina a valorización en Cúcuta debido, principalmente, a su bajo precio (aproximadamente, 70 COP/kg) lo que no genera incentivos para su recolección. Sin embargo, el actor principal (O-I Peldar) declara que está en condiciones de recibir y procesar el 100 % del vidrio posconsumo potencialmente generado. Asimismo, esta empresa afirma que, para potenciar y hacer sostenible la recepción de vidrio posconsumo desde diferentes regiones del país, está trabajando en el aumento de su capacidad logística y en un formato de colaboración con otros actores de la cadena.

En el caso de los metales, para el año 2022, se proyecta una valorización de 628 toneladas, cantidad que se incrementa a 1341 toneladas para el año 2030.

Actualmente, no hay industria transformadora de metales en Cúcuta, solamente fundiciones «artesanales» de aluminio y hierro colado. La mayor parte del material sale de Cúcuta hacia las grandes ciudades a través de los intermediarios o comercializadoras; Normetales es el principal comercializador en Cúcuta.

De acuerdo con la información del estudio de mercado (PREVEC, 2021), la demanda de la chatarra, a nivel nacional, en ocasiones es mayor a la oferta, por lo que las grandes empresas siderúrgicas deben realizar importaciones de chatarra para suplir sus necesidades. Por lo tanto, no se ven inconvenientes por parte de la industria transformadora para valorizar las cantidades proyectadas.

Un ejemplo de lo anterior es la empresa Diaco (Gerdau), localizada en Boyacá, que continuamente realiza campañas de recolección de residuos metálicos ferrosos para sus procesos productivos, en conjunto con organizaciones de recicladores y recicladoras al capacitar y aportar recursos para fortalecer la cadena de abastecimiento de chatarra. En 2020, Diaco trabajaba de forma directa con más de 4000 recicladores y recicladoras con capacitaciones en mejores prácticas, fortalecimiento de capacidades, procesos de formalización, mejoramiento de ECA, aspectos ambientales, salud y seguridad, y calidad de la chatarra, entre otros temas. Todo lo anterior con el objetivo de industrializar la actividad de la población recicladora y asegurar mayores volúmenes de una forma sostenible.

⁵ <https://www.maroc.com.co/>

4.3.4 ¿Bajo las condiciones de este escenario, se logra cumplir con las metas de la Resolución 1407 de 2018 (REP)?

Bajo el supuesto de que los residuos reciclables de origen municipal corresponden, principalmente, a materiales provenientes de envases y empaques, los porcentajes indicados cumplen con las metas establecidas en la Resolución 1407 de 2018, sobre responsabilidad extendida del productor (REP) para envases y empaques, que se presentan en la siguiente tabla.

Por lo tanto, se puede concluir que estas metas no son lo suficientemente ambiciosas como para lograr un cambio significativo en la valorización de los residuos reciclables e impulsar la economía circular.

Tabla 6. Metas establecidas en la Resolución REP para envases y empaques

Año	Meta en %
2021	10
2022	12
2023	14
2024	16
2025	18
2026	20
2027	22
2028	24
2029	27
2030	30

Fuente: Resolución 1407 de 2018.

4.4 Análisis de las cantidades de residuos orgánicos

4.4.1 Cantidades de residuos orgánicos destinados a valorización

Como se puede ver en las tablas previas, se observa que, el porcentaje de residuos orgánicos destinados a valorización se estima en 0,3 % en el año 2021 y se proyecta un incremento de este a lo largo del tiempo, hasta llegar a 9,8 % en el año 2030, lo que representa un total de, aproximadamente, 16 580 t/año de residuos orgánicos valorizados.

4.4.2 Tratamiento de residuos orgánicos

De acuerdo con la información del estudio de mercado (PREVEC, 2021), actualmente hay, en Cúcuta, una capacidad instalada para el tratamiento de residuos orgánicos de solamente 380 t/año, correspondientes a una iniciativa a pequeña escala con la tecnología de la mosca soldado-negra de la empresa Biotecnocol y al compostaje *in situ* que se realiza en la plaza de mercado mayorista Cenabastos.

Las 16 200 t/año adicionales que se busca valorizar corresponden a lo previsto en el proyecto piloto del Parque Agroecológico Metropolitano, que está desarrollando la administración municipal de Cúcuta con la Fundación MIMA. En este proyecto, se incluye una planta de aprovechamiento de residuos sólidos con capacidad para aprovechar 50 t/día de residuos orgánicos y reciclables (18 000 t/año), en una proporción de 90 % orgánicos y máximo 10 % reciclables, provenientes de usuarios considerados como grandes generadores, como plazas de mercado, supermercados, restaurantes, hoteles y empresas de alimentos, entre otros.

De esto se desprende que la planta de aprovechamiento de residuos sólidos tendrá una capacidad inicial para tratar 16 200 t/año de residuos orgánicos utilizando dos tecnologías básicas: lombricultura y compostaje controlado.

4.5 Tratamiento del rechazo que se destina a disposición final

De acuerdo con las proyecciones de este escenario, las cantidades de residuos que se destinan a disposición final se incrementan de 253 810 toneladas, en el año 2022, a 259 568 toneladas en el año 2030, lo que representa un incremento del 2,3 %.

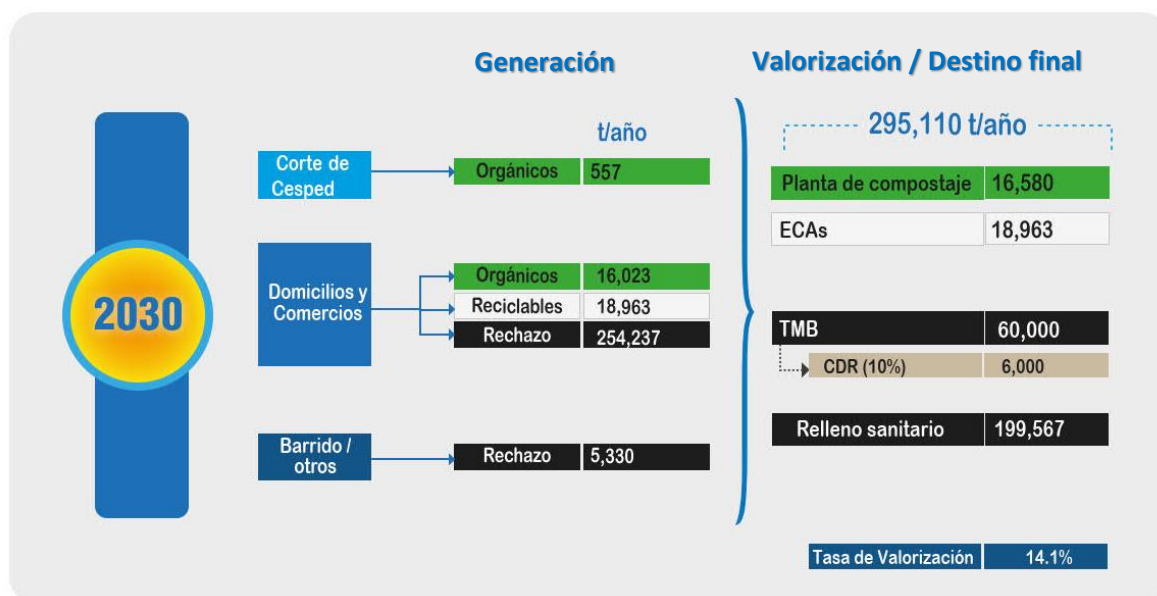
Como se mencionó en el capítulo 2, para todos los escenarios se plantea la implementación de sistemas de tratamiento mecánico-biológico (TMB) como alternativa para el tratamiento de los residuos no recogidos de forma selectiva (rechazo). En el caso específico de este escenario, se propone la implementación de una instalación de TMB a nivel demostrativo para la posterior implementación de futuras plantas similares.

Con base en referencias internacionales, la capacidad de una instalación TMB podría ser de alrededor de 60 000 t/año y la inversión se estima en 50 dólares por tonelada tratada al año, lo que representa una inversión del orden de los 3 millones de dólares. El costo de operación (OPEX) de estas plantas se estima en 7 USD/ton, lo que representaría un costo de 420 000 dólares por año. La reducción de masa se estima entre 40 % y 60 %. El material restante se debe disponer en el relleno sanitario.

4.6 Análisis de potencial para escenario 0

En la siguiente gráfica, se presentan los flujos de residuos proyectados para el año 2030 en este escenario.

Gráfica 4. Flujo de residuos sólidos municipales en t/año para el año 2030. Escenario 0



Fuente: GOPA Infra (2022).

Como se puede observar en la gráfica anterior, se proyecta que, para el año 2030, se valore un total de 35 600 toneladas de residuos orgánicos y reciclables (16 600 ton de orgánicos + 19 000 ton de reciclables). Esto representa una tasa de valorización del 12,0 %. Si a este porcentaje se agregan las 6000 toneladas procedentes de la instalación de TMB a valorizar como CDR, entonces, la tasa de valorización se incrementa a 14,1 %. Esta misma tasa se calculó en 3,6 % para el año 2021, lo que significa un incremento de 10,5 puntos porcentuales en 9 años.

Se plantea que, los residuos orgánicos se valoren en la futura planta piloto de aprovechamiento de residuos sólidos del Parque Agroecológico Metropolitano, y que los residuos reciclables se gestionen en las ECA, como sucede en la actualidad. Esto representaría una generación de compost de, aproximadamente, 3300 t/año (asumiendo una tasa de conversión del 20 %).

Asimismo, se proyecta que, en el año 2030, se destinen a disposición final, aproximadamente, 260 000 toneladas de RSM, de las cuales 60 000 podrían ser previamente tratadas en una instalación TMB.

En este escenario, habría una fuente potencial para la generación de CDR: el material con alto poder calorífico separado en la instalación TMB, que se estima en un 10 % (6000 t/año).

En Cúcuta, Cemex cuenta con la planta cementera Los Patios, ubicada en el municipio del mismo nombre, a 10 km de la ciudad de Cúcuta. La empresa ha declarado estar interesada en el desarrollo del coprocesamiento⁶, lo que, en el mediano y largo plazos, implica la existencia de una alternativa de valorización para la fracción inorgánica no reciclable de los residuos generados en Cúcuta. Para el cumplimiento de la meta del 15 % de sustitución de

6 Coprocesamiento: incorporación de combustibles y/ o materias primas derivadas de residuos, con el propósito de reemplazar el uso de combustibles tradicionales fósiles y/ o materias primas vírgenes en procesos productivos intensivos en la demanda de energía y recursos naturales. La industria cementera, internacionalmente, ha logrado la implementación de estos procesos de forma exitosa y a escala industrial.

combustibles fósiles, se demandaría un volumen de unas 34 000 t/año de CDR, por lo que no habría limitaciones para valorizar energéticamente las cantidades indicadas previamente. Adicionalmente, la capacidad teórica de consumo de valorización por coprocesamiento de la fracción no reciclable, a través de su consumo como CDR, alcanza un máximo de unas 180 000 t/año, considerando un 80 % de sustitución de combustibles fósiles.

4.7 ¿Cómo se puede lograr la tasa de valorización proyectada para el escenario 0?

Como se ha visto en los ítems previos, en este escenario, la tasa de valorización pasa de 3,6 % a 14,1 % entre los años 2021 y 2030. Si bien esto representa una mejora, no se considera significativo como para avanzar hacia una economía circular en el marco de la gestión de los residuos sólidos.

A pesar de esto, para alcanzar el porcentaje de valorización proyectado para el año 2030 (14,1 %), se debe tomar una serie de medidas para alcanzar la capacidad de tratamiento requerida para valorizar las cantidades de residuos proyectadas (por ejemplo, plantas de tratamiento de residuos orgánicos, ECA, instalación de TMB a nivel demostrativo).

A continuación, se proponen algunas acciones:

- Proceso de cooperación público-privada entre los operadores de las plantas privadas de tratamiento de residuos orgánicos y la autoridad municipal, idealmente, bajo una modalidad de cooperación público-privada (PPP). En este sentido, y considerando iniciativas locales en desarrollo o que, al menos, ya cuentan con un concepto claro de desarrollo, destaca el proyecto impulsado por la Fundación MIMA, que está a la espera de concretar acuerdos de cooperación con la Alcaldía de Cúcuta para su materialización.
- Exploración de mecanismos para la cooperación internacional que permitan el desarrollo de proyecto demostrativo a escala industrial para la implementación de una planta de TMB en Cúcuta.
- Proceso de cooperación público-privada entre la industria cementera, autoridad municipal y autoridades nacionales con competencias en la materia, para el reconocimiento e impulso de la tecnología de coprocesamiento como alternativa preferente para la valorización de la fracción no reciclable de residuos de envases y empaques, para dar certidumbre y sostenibilidad a las inversiones respectivas.
- Incorporación y reconocimiento de la fracción no reciclable valorizada energéticamente por coprocesamiento en la remuneración por servicio de aprovechamiento.
- Plan específico de búsqueda, gestión y acompañamiento de proyectos que califiquen a financiamiento por la vía del incentivo al aprovechamiento, considerando diferentes alternativas de valorización.

5 Análisis del escenario 1

5.1 Resumen del escenario 1

- Implementación progresiva de un programa de segregación en la fuente y recolección selectiva de los RSM hasta cubrir un 50 % de la población en el año 2030.
- Segregación en la fuente en cuatro flujos: reciclables (celulosas, plásticos y metales), vidrio, orgánicos y rechazo.



- Clasificación de residuos reciclables en ECA o plantas de clasificación.
- Tratamiento de residuos orgánicos en plantas de compostaje.
- Implementación de una instalación TMB a nivel demostrativo.
- Valorización del rechazo con alto poder calorífico procedente de la TMB y plantas de clasificación como CDR en la industria cementera.

5.2 Proyección de las cantidades de residuos para valorización y disposición final

Para el cálculo de las proyecciones de las cantidades de residuos destinados a valorización y disposición final en este escenario, se han utilizado, como punto de partida, las proyecciones de las cantidades de generación de RSM que se presentan en el capítulo 3. A estas cantidades se les aplica el porcentaje de la población con segregación en la fuente y recolección selectiva (50 % en el año 2030), así como la tasa de captura, que se estima en 70 % para el año 2030, como resultado de la implementación de medidas de sensibilización y participación de la población.

En los siguientes ítems, se analizan, con detalle, los valores que se presentan en las siguientes tablas; sin embargo, de forma general, podemos observar que, el porcentaje de residuos reciclables y orgánicos destinados a valorización se incrementa en 25,9 % entre los años 2022 y 2030, pasando de 3,6 % a 29,5 %.

Tabla 7. Proyección de la cantidad de RSM destinados a valorización y disposición final en Cúcuta en t/año. Escenario 1 (2022-2030)

Descripción	Destino	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Celulosas	Valorización	5654	7261	8839	10 068	10 225	10 506	12 361	14 312	16 363
	DF	15 046	13 741	12 472	11 551	11 705	11 739	10 203	8574	6849
Plásticos	Valorización	2423	3745	4559	5193	5274	5419	6376	7382	8440
	DF	37 174	36 432	36 208	36 164	36 678	37 135	36 788	36 398	35 965
Metales	Valorización	628	884	1077	1226	1245	1280	1506	1743	1993
	DF	2518	2308	2163	2060	2088	2102	1924	1736	1535
Vidrios	Valorización	269	514	625	712	723	743	875	1013	1158
	DF	7509	7378	7383	7411	7517	7616	7604	7587	7565
Orgánicos	Valorización	380	8526	13 674	20 446	29 062	37 949	44 649	51 697	59 105
	DF	150 210	144 266	141 362	136 832	130 480	123 882	119 502	114 799	109 766
Otros	DF	41 352	41 957	42 573	43 189	43 810	44 439	45 076	45 720	46 372
Total reciclables sin vidrio	Valorización	8706	11 891	14 474	16 487	16 744	17 205	20 242	23 438	26 796
	DF	54 738	52 481	50 843	49 775	50 472	50 975	48 915	46 707	44 350
Total	Valorización	9 355	20 930	28 774	37 645	46 530	55 898	65 766	76 147	87 058
	DF	253 810	246 082	242 161	237 208	232 279	226 912	221 096	214 813	208 052

Fuente: GOPA Infra (2022).

Tabla 8. Porcentaje de valorización por tipo de residuo en Cúcuta. Escenario 1 (2022-2030)

Descripción	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Orgánicos	0,3 %	5,6 %	8,8 %	13,0 %	18,2 %	23,5 %	27,2 %	31,1 %	35,0 %
Celulosas	27,3 %	34,6 %	41,5 %	46,6 %	46,6 %	47,2 %	54,8 %	62,5 %	70,5 %
Plásticos	6,1 %	9,3 %	11,2 %	12,6 %	12,6 %	12,7 %	14,8 %	16,9 %	19,0 %
Metales	20,0 %	27,7 %	33,2 %	37,3 %	37,4 %	37,8 %	43,9 %	50,1 %	56,5 %
Vidrios	3,5 %	6,5 %	7,8 %	8,8 %	8,8 %	8,9 %	10,3 %	11,8 %	13,3 %
Promedio reciclables	12,6 %	17,2 %	20,6 %	23,1 %	23,1 %	23,5 %	27,2 %	31,1 %	35,0 %
Promedio total	3,6 %	7,8 %	10,6 %	13,7 %	16,7 %	19,8 %	22,9 %	26,2 %	29,5 %*

Fuente: GOPA Infra (2022).

*Este porcentaje no incluye la valorización como CDR de las 6000 toneladas procedentes de la instalación TMB, con lo cual la tasa de valorización se incrementa a 31,5 %.

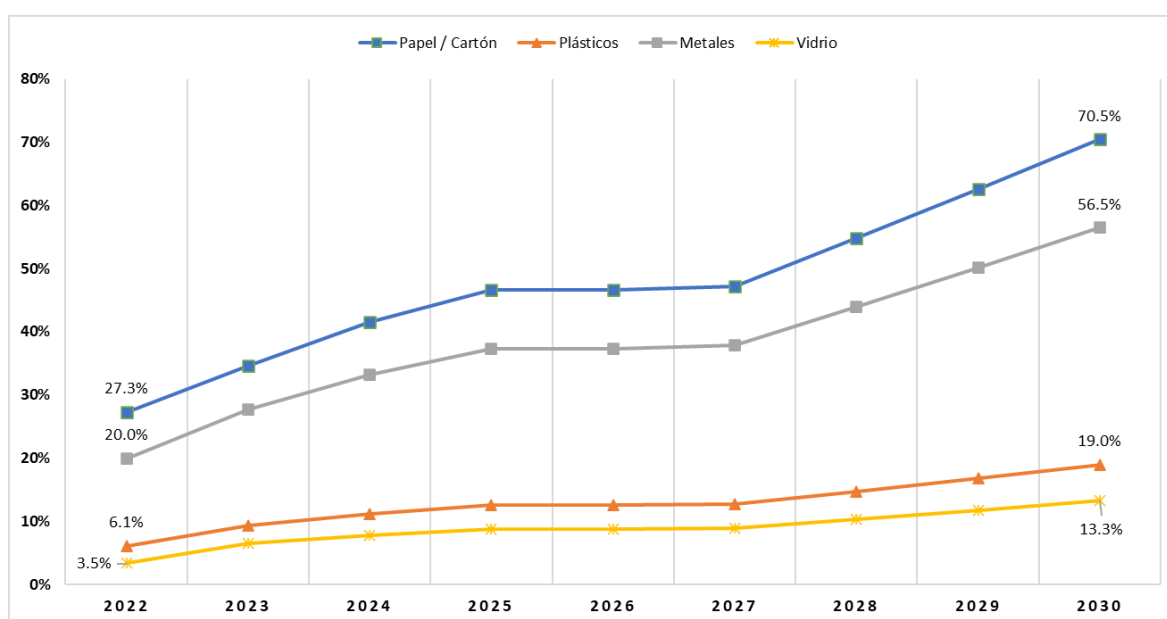
5.3 Análisis de las cantidades de residuos reciclables y propuestas para su valorización

5.3.1 Cantidades de residuos reciclables destinados a valorización

Como se puede ver en las tablas anteriores, en promedio, el porcentaje de residuos reciclables destinados a valorización se estima en 12,6 % en el año 2022, y se incrementaría a 35 % en el año 2030.

En la siguiente gráfica, se muestra la variación en el porcentaje de residuos reciclables destinados a valorización entre los años 2022 y 2030, por tipo de material.

Gráfica 5. Porcentaje de valorización por tipo de residuo reciclable. Escenario 1



Fuente: GOPA Infra (2022).

Como se puede ver en el gráfico anterior:

- El porcentaje de celulosas destinadas a valorización se estima en 27,3 % para el año 2022 y se proyecta un incremento de este a lo largo del tiempo, hasta llegar a 70,5 % en el año 2030.
- El porcentaje de plásticos destinados a valorización se estima en 6,1 % en el año 2021 y se proyecta un incremento de este a lo largo del tiempo, hasta llegar a 19,0 % en el año 2030.
- El porcentaje de metales destinados a valorización se estima en 20,0 % en el año 2021 y se proyecta un incremento de este a lo largo del tiempo, hasta llegar a 56,5 % en el año 2030.
- El porcentaje de vidrios destinados a valorización se estima en 3,5 % en el año 2021 y se proyecta un incremento de este a lo largo del tiempo, hasta llegar a 13,3 % en el año 2030.

5.3.2 Clasificación y pretratamiento de residuos reciclables

Con base en los datos del escenario 1, en 2030 se necesitaría una capacidad instalada de pretratamiento y clasificación de aproximadamente 27 000 t/año para gestionar los residuos reciclables recogidos de forma selectiva, sin considerar el vidrio. No se incluye el vidrio ya que se propone que este tenga una gestión diferenciada por las razones previamente indicadas.

Si esta actividad se continúa realizando mediante ECA, se necesitaría triplicar el número de estas, pasando de 27 a aproximadamente 83 (asumiendo que cada ECA gestiona en promedio 327 toneladas de residuos reciclables por año). Este incremento no parece factible básicamente debido a lo siguiente:

- Espacio disponible.
- Eficiencia de clasificación.
- Economías de escala para costos y volúmenes.
- Calidad de los materiales clasificados.
- Factibilidad de producir CDR a partir de la fracción no reciclable. Sería poco eficiente desde el punto de vista logístico recoger la fracción no reciclable de más de 80 ECA.

Estos desafíos se podrían superar con la implementación de una planta de clasificación y pretratamiento a escala industrial centralizada, que podrían manejar las AdR o el gremio Alianza R. Por lo tanto, para este escenario, se plantea realizar esta actividad en una planta de clasificación y pretratamiento a escala industrial, según lo descrito en el ítem 2.4.2.

De acuerdo con las proyecciones de cantidades de residuos reciclables que deben ser gestionadas, se recomienda la implementación de una planta de clasificación de 30 000 t/año de capacidad. La inversión en infraestructura y equipos para una planta de clasificación de esta capacidad está en el rango de los 3 a 5 millones de dólares en el caso de clasificación 100 % manual, que aumenta a un rango de 4 a 6 millones de dólares para plantas semiautomatizadas. Los costos de operación están en el rango de 30 a 40 dólares por tonelada de material a clasificar.

De acuerdo con la experiencia internacional, las actividades de clasificación y pretratamiento a escala industrial logran una eficiencia promedio del 70 % en cuanto a material efectivamente valorizable vía reciclaje. Por lo tanto, la cantidad de material reciclable (excepto vidrio) que se dirigiría a la industria transformadora se estima en 19 000 toneladas en el año 2030.

Al mismo tiempo, y de acuerdo con la experiencia internacional, se estima un volumen de rechazo correspondiente al 30 % del material ingresado a pretratamiento y clasificación industrial, lo que se estima en 8000 toneladas en el año 2030. Este material estaría disponible para la producción de CDR en la medida en que existan las inversiones de carácter privado que son necesarias para su procesamiento, tanto de pretratamiento (trituration y mezcla), como de coprocesamiento en las plantas cementeras. Estas inversiones dependerán del volumen a tratar, pero como referencia se puede indicar que una planta de pretratamiento para producción de CDR diseñada para unas 30 000 t/año implica una inversión de unos 4 a 5 millones de dólares, con un costo operativo de unos 40 a 50 dólares por tonelada.

5.3.3 Transformación de residuos reciclables

Como se puede observar, en este escenario la industria transformadora, tanto en Cúcuta como a nivel nacional, contaría con más material posconsumo. De acuerdo con lo mencionado para el escenario 0 en el ítem 4.3.3, la industria transformadora a nivel nacional está interesada en recibir más cantidad de material posconsumo del que recibe en la actualidad, por lo que esto sería una ventaja.

Además, la mayor cantidad de material posconsumo disponible en Cúcuta podría ser, también, un incentivo para el crecimiento de la industria transformadora local.

5.4 Análisis de las cantidades de residuos orgánicos y propuestas para su valorización

5.4.1 Cantidades de residuos orgánicos destinados a valorización

La cantidad de residuos orgánicos municipales (ROM) destinados a valorización se incrementa, progresivamente, hasta alcanzar las 59 105 t/año en el año 2030, lo que equivale al 35 % de los residuos orgánicos generados.

5.4.2 Tratamiento de residuos orgánicos

Como se identificó en el estudio de mercado (PREVEC, 2021), actualmente en Cúcuta hay una capacidad de valorización de residuos orgánicos de 380 t/año. Por lo tanto, sería necesario implementar capacidad adicional hasta alcanzar una capacidad de valorización de residuos orgánicos de aproximadamente 60 000 t/año para el año 2030.

Se recomienda iniciar esta ampliación de capacidad con plantas de compostaje. Esta tecnología es más simple y robusta (soporta mejor las impurezas), por lo que se considera más adecuada mientras se consolida la segregación en la fuente y recolección selectiva de los residuos orgánicos.

Con este objetivo, se propone implementar dos plantas de compostaje con aireación forzada con una capacidad de tratamiento de, aproximadamente, 30 000 t/año cada una para el año 2030 (60 000 t/año en total), que se podrían implementar los años 2023 y 2026, de acuerdo con las proyecciones de generación de residuos orgánicos.

En este punto, es importante tener en cuenta la complejidad del licenciamiento ambiental requerido para plantas con capacidad superior a 20 000 t/año; sin embargo, se considera que para una eficiente gestión de residuos las plantas de compostaje deben tener una capacidad superior a las 20 000 t/año indicadas. Sería recomendable, entonces, establecer un plan de trabajo específico con Corponor y otras autoridades con competencias regulatorias en la materia para facilitar los procesos de obtención de permisos.

De acuerdo con la información del estudio de mercado (PREVEC, 2021), el costo de inversión (CAPEX) para una planta de compostaje con aireación forzada de 30 000 t/año de capacidad es en promedio de 120 USD/t, lo que representaría una inversión total de aproximadamente 3,6 millones de dólares por planta. La inversión total para las dos plantas requeridas se estima en 7,2 millones de dólares. El costo de operación (OPEX) de estas plantas se estima en 12 USD/ton, lo que representaría un costo de 360 000 dólares por año por planta. Estos costos de inversión y operación será posible cubrirlos en la medida en que las plantas accedan a la tarifa correspondiente.

5.4.3 Demanda potencial de compost

Al mismo tiempo, se debe analizar si existe demanda para el compost que estarían produciendo estas instalaciones. La producción estimada de compost por año se presenta en la siguiente tabla (se asume una tasa de conversión del 20 %).

Tabla 9. Estimación de la producción de compost para el escenario 1

Año	Residuos orgánicos destinados a valorización (t/año)	Compost producido (t/año)
2022	380	76
2023	8526	1705
2024	13 674	2735
2025	20 446	4089
2026	29 062	5812
2027	37 949	7590
2028	44 649	8930
2029	51 697	10 339
2030	59 105	11 821

Fuente: GOPA Infra (2022).

De acuerdo con el estudio de mercado (PREVEC, 2021), la demanda de compost estimada para el año 2030 en Norte de Santander por parte del sector agrícola se encuentra entre 5400 toneladas (escenario bajo) y 8600 toneladas (escenario alto), lo que hace suponer que no existe suficiente demanda a nivel local para el compost producido en 2030. Sin embargo, en el *Estudio de mercado de valorización de residuos orgánicos en Bogotá*, se identificó que el compost producido en el área metropolitana de Bogotá se vende a nivel nacional. A nivel nacional, la demanda de compost estimada para el año 2030 se encuentra entre 128 000 toneladas (escenario bajo) y 216 000 toneladas (escenario alto), con lo cual se podría concluir que sí existe suficiente demanda de compost a nivel nacional para la producción estimada en este escenario. Adicionalmente, se prevé una demanda de compost por parte del sector ganadero, para restauración de suelos, para jardinería y por parte de entidades distritales y nacionales.

5.5 Tratamiento del rechazo que se destina a disposición final

De acuerdo con las proyecciones de este escenario, las cantidades de residuos que se destinan a disposición final se reducen de 253 810 toneladas en el año 2022 a 208 052 toneladas en el año 2030, lo que representa una reducción del 18 %.

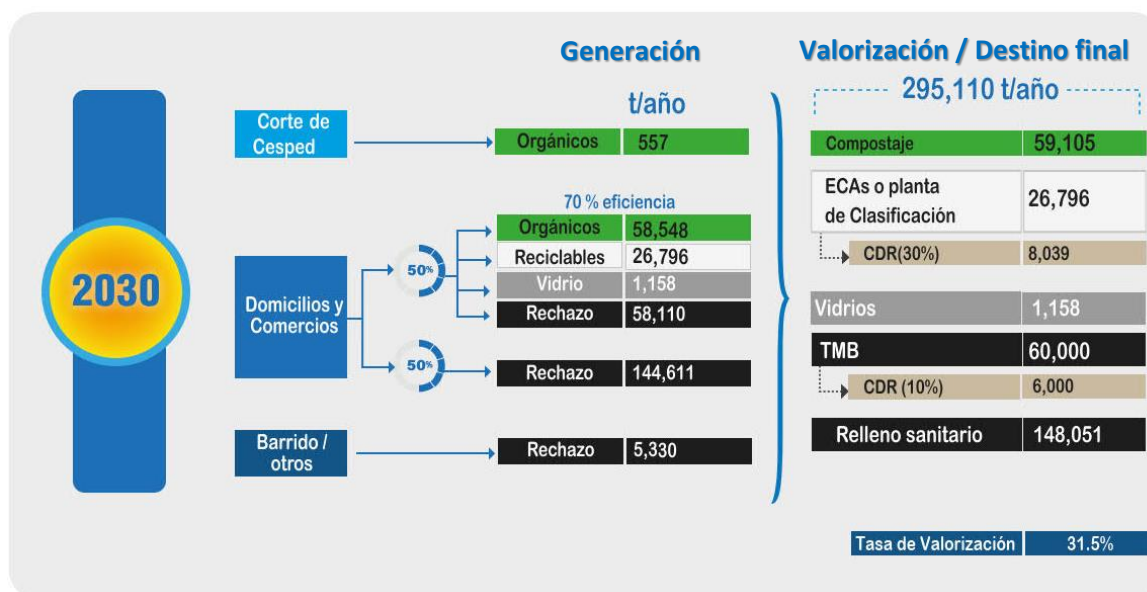
Como se mencionó en el capítulo 2, para todos los escenarios se plantea la implementación de sistemas de tratamiento mecánico-biológico (TMB) como alternativa para el tratamiento de los residuos no recogidos de forma selectiva (rechazo). En el caso específico de este escenario, se propone la implementación de una instalación de TMB a nivel demostrativo para la posterior implementación de futuras plantas similares.

Con base en referencias internacionales, la capacidad de una instalación de TMB podría ser de alrededor de 60 000 t/año y la inversión se estima en 50 dólares por tonelada tratada al año, lo que representa una inversión del orden de los 3 millones de dólares. El costo de operación (OPEX) de estas plantas se estima en 7 USD/ton, lo que representaría un costo de 420 000 dólares por año. La reducción de masa se estima entre 40 % y 60 %. El material restante se debe disponer en el relleno sanitario.

5.6 Análisis de potencial para escenario 1

En la siguiente gráfica, se presentan los flujos de residuos proyectados para el año 2030 en este escenario.

Gráfica 6. Flujo de residuos sólidos municipales en t/año para el año 2030. Escenario 1



Fuente: GOPA Infra (2022).

Como se puede observar en el gráfico anterior, se proyecta que, para el año 2030, se valore un total de 88 000 toneladas de residuos orgánicos y reciclables (60 000 ton de orgánicos + 28 000 ton de reciclables). Esto representa una tasa de valorización del 29,5 %. Si a esta tasa se agregan las 6000 toneladas procedentes de la instalación TMB a valorizar como CDR, entonces, la tasa de valorización se incrementa a 31,5 %, 17,4 puntos porcentuales por encima de lo proyectado en el escenario 0 para 2030.

Para la valorización de estos residuos, se propone la implementación de la siguiente infraestructura.

Tabla 10. Infraestructura a implementar en el escenario 1 para la valorización de los residuos reciclables y orgánicos

Infraestructura	Cantidad	Capacidad por planta (t/año)	Inversión estimada (millones de dólares)	Capacidad total al año 2030 (t/año)
Planta de clasificación y pretratamiento	1	30 000	5,0	30 000
Planta de compostaje	2	30 000	7,2	60 000

Fuente: GOPA Infra (2022).

Asimismo, se proyecta que, en el año 2030, se destinen a disposición final 208 000 toneladas, de las cuales 60 000 podrían ser previamente tratadas en una instalación de TMB.

De acuerdo con lo indicado en los ítems anteriores, en este escenario, se tendrían dos potenciales fuentes para la generación de CDR: 1) el rechazo de las instalaciones de clasificación y pretratamiento a escala industrial, que se estima en 30 % (8000 t/año en el año 2030); y 2) el material con alto poder calorífico separado en la instalación de TMB, que se estima en un 10 % (6000 t/año).

Como se mencionó en el escenario 0, en Cúcuta, Cemex cuenta con la planta cementera Los Patios, ubicada en el municipio del mismo nombre, a 10 km de la ciudad de Cúcuta. La empresa ha declarado estar interesada en el desarrollo del coprocesamiento, lo que en el mediano y largo plazos implica una alternativa de valorización para la fracción inorgánica no reciclable de los residuos generados en Cúcuta. Para el cumplimiento de la meta del 15 % de sustitución de combustibles fósiles, se demandaría un volumen de unas 34 000 t/año de CDR, por lo que no habría limitaciones para valorizar energéticamente las cantidades indicadas. Adicionalmente, la capacidad teórica de consumo de valorización por coprocesamiento de la fracción no reciclable a través de su consumo como CDR, alcanza un máximo de unas 180 000 t/año, considerando un 80 % de sustitución de combustibles fósiles.

5.7 ¿Qué medidas se recomienda implementar para concretizar el escenario 1?

En este escenario se propone la implementación progresiva de un programa de segregación en la fuente y de recolección selectiva de los RSM hasta cubrir un 50 % de la población en el año 2030, lo que es clave para alcanzar el porcentaje de valorización proyectado.

Para lograr este porcentaje de cobertura, así como una alta participación de la población y una eficiente segregación en la fuente y posterior clasificación de los materiales, se considera necesario implementar una serie de medidas de sensibilización con diferentes grupos de interés, como hogares que forman parte del programa de segregación en la fuente y recolección selectiva, población en general y asociaciones de recicladores y recicladoras. A continuación, se proponen algunas medidas:

- Desarrollo de un plan estratégico con base en proyectos piloto que permitan definir estrategias adecuadas de intervención, identificar técnicas eficientes de contenerización, hacer más eficiente la recolección selectiva y analizar técnicas de clasificación y pretratamiento.
- Sectorización de la ciudad, definiendo sectores que se deben intervenir para la implementación de la recolección selectiva de forma sistemática y organizada.
- Desarrollo de campañas orientadas a la ciudadanía, incluyendo:
 - Producción de material de difusión para fomentar una correcta separación en la fuente
 - Capacitación y visitas domiciliarias a los hogares identificados
 - Charlas y/o ferias de sensibilización para la población en general
- Plan de trabajo específico con la población recicladora, incluyendo:
 - Charlas y/o inducciones con los recicladores formalizados
 - Evaluaciones, reuniones y gestión para los recicladores informales
- Trabajo articulado con programas posconsumo.
- Ordenanzas municipales específicas orientadas a la segregación en la fuente y recolección selectiva.

En el caso específico de los residuos reciclables, se plantean, a continuación, algunas recomendaciones de gestión para alcanzar los niveles de valorización definidos en este escenario:

- Estudio de incentivos para la inversión en sistemas modernos y eficientes para la clasificación y pretratamiento de residuos, que permitan procesar los volúmenes involucrados de forma eficiente en calidad y costo.
- Actualización de la regulación sobre la responsabilidad extendida del productor, introduciendo metas más ambiciosas y específicas por tipo de material, con incentivos de cumplimiento de metas que garanticen la instalación de una cadena de valor eficiente y robusta.
- Proceso de cooperación público-privada entre la industria cementera, autoridad municipal y autoridades nacionales con competencias en la materia para el reconocimiento e impulso de la tecnología de coprocesamiento como alternativa preferente para la valorización de la fracción no reciclable de residuos de envases y empaques, para dar certidumbre y sostenibilidad a las inversiones respectivas.
- Incorporación y reconocimiento de la fracción no reciclable valorizada energéticamente por coprocesamiento en la remuneración por servicio de aprovechamiento.
- Crear y/o fortalecer mecanismos de investigación y desarrollo tendientes a la búsqueda y desarrollo de alternativas de valorización para corrientes como los textiles, que, actualmente, no cuentan con cadenas de valor claras ni menos consolidadas.

En el caso específico de los residuos orgánicos, se plantean, a continuación, algunas recomendaciones de gestión para alcanzar los niveles de valorización definidos en este escenario:

- Iniciar la implementación de la segregación en la fuente y recolección selectiva con usuarios comerciales y grandes productores, tanto por la cantidad recogida como por la calidad de los residuos. Fomentar los sistemas de recogida separada de estos residuos, y facilitar y potenciar la gestión diferenciada en los comercios (con recogidas privadas o mediante los servicios municipales, ya sea en circuitos diferenciados o integrados en los circuitos domiciliarios, según sea adecuado en cada caso). Esto permite mejorar sensiblemente los resultados de recogida separada globales.
- Estudio de incentivos para la inversión en sistemas modernos y eficientes para el tratamiento de los residuos orgánicos, que permitan procesar los volúmenes involucrados de forma eficiente en calidad y costo.
- Implementación de un plan de trabajo específico con Corponor y otras autoridades con competencias regulatorias en la materia para facilitar los procesos de obtención de licencia ambiental para las plantas de compostaje con capacidad superior a 20 000 t/año.
- Sensibilizar a los usuarios en la importancia de segregar correctamente los residuos orgánicos. Los residuos orgánicos recogidos de forma selectiva deben tener un bajo nivel de materiales no solicitados o impropios (menos de un 5 % y, preferiblemente, inferior a un 1 o 2 %, expresados en peso). Así, si el nivel de impropios es suficientemente bajo (elevado grado de pureza de los residuos orgánicos), se asegura un proceso adecuado y la obtención de productos de alta calidad. Cuando el nivel de impropios de la fracción orgánica traspasa el 5 % o incluso supera ampliamente estos valores de referencia (10 a 20 %), no solo se deteriora la calidad de la fracción orgánica por transferencia de contaminantes, perceptibles (vidrios, plásticos, etc.) o no (metales pesados), sino que surgen dificultades adicionales para su tratamiento, que, finalmente, se traducen, inevitablemente, en un deterioro de la calidad de los productos terminados.
- Para la recolección selectiva, se debe tener en consideración que la alta densidad y baja compactibilidad de estos residuos hace que deban ser recogidos mediante vehículos no compactadores y normalmente de menor capacidad (se pueden utilizar vehículos con dispositivo de compactación, pero en modo desactivado). Los vehículos también deben disponer de juntas de estanqueidad para garantizar que no se producen pérdidas de lixiviados.
- Implementar incentivos económicos para las municipalidades, con el fin de modificar la forma en que gestionan sus residuos orgánicos, o hacia el sector privado, para materializar inversiones en infraestructura de valorización, así como para el uso de los productos generados de la valorización de los residuos orgánicos.
- Desincentivar la disposición final de residuos orgánicos. Esta situación puede ser abordada, principalmente, de dos formas, como se ha hecho en varios países (principalmente de la Unión Europea): 1) implementación gradual de un impuesto a los rellenos sanitarios; y 2) prohibir la disposición final de residuos orgánicos en los rellenos sanitarios.
- Realizar una implementación gradual de las instalaciones de valorización, comenzando con plantas de compostaje mientras se consolida la segregación en la fuente y la recolección selectiva de los residuos orgánicos. El compostaje es una tecnología más robusta y soporta mejor las impurezas, además de ser más

económica. A medida que se vayan consolidando la segregación en la fuente y la recolección selectiva, se puede pensar en la implementación de otras tecnologías, como la digestión anaerobia.

- Desarrollar el mercado del compost a través de planes de mercadeo y educación/ sensibilización sobre sus beneficios a potenciales consumidores y consumidoras del producto, y crear un sello/ etiqueta (ecológica) para que el consumidor o consumidora se pueda orientar mejor.

Otras medidas o acciones estratégicas, de carácter general, serían:

- Exploración de mecanismos para la cooperación internacional que permitan el desarrollo de proyecto demostrativo a escala industrial, para la implementación de una planta de TMB en Cúcuta.
- Plan específico de búsqueda, gestión y acompañamiento de proyectos que califiquen a financiamiento por la vía del incentivo al aprovechamiento, considerando diferentes alternativas de valorización.

6 Análisis del escenario 2

6.1 Resumen del escenario 2

- Implementación progresiva de un programa de segregación en la fuente y recolección selectiva de los RSM hasta cubrir un 80 % de la población en el año 2040.
- Segregación en la fuente en cuatro flujos: reciclables (celulosas, plásticos y metales), vidrio, orgánicos y rechazo.



- Clasificación de residuos reciclables en plantas de clasificación.
- Tratamiento de residuos orgánicos en plantas de compostaje e implementación de una planta de biodigestión a nivel demostrativo.
- Implementación de instalaciones TMB.
- Valorización del rechazo con alto poder calorífico proveniente de las TMB y plantas de clasificación como CDR en la industria cementera.

6.2 Proyección de las cantidades de residuos para valorización y disposición final

Para el cálculo de las proyecciones de las cantidades de residuos destinados a valorización y disposición final en este escenario, se han utilizado, como punto de partida, las proyecciones de las cantidades de generación de RSM que se presentan en el capítulo 3. A estas cantidades, se les aplica el porcentaje de la población con segregación en la fuente y recolección selectiva (80 % en el año 2040), así como la tasa de captura, que se estima

en 80 % para el año 2040, como resultado de la implementación de medidas de sensibilización y participación de la población.

En los siguientes ítems, se analizan, con detalle, los valores que se presentan en las siguientes tablas; sin embargo, de forma general, podemos observar que el porcentaje de residuos reciclables y orgánicos destinados a valorización se incrementa en 22,2 % entre los años 2031 y 2040, pasando de 31,7 % a 53,9 %.

Tabla 11. Proyección de la cantidad de RSM destinados a valorización y disposición final en Cúcuta en t/año. Escenario 2 (2031-2040)

Descripción	Destino	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Celulosas	Valorización	17 985	19 096	19 354	19 611	19 867	20 123	20 378	20 631	20 883	21 134
	DF	5559	4774	4839	4903	4967	5031	5094	5158	5221	5284
Plásticos	Valorización	9102	10 210	12 015	14 194	16 540	18 988	21 538	24 191	26 948	29 811
	DF	35 936	35 452	34 265	32 701	30 967	29 131	27 190	25 143	22 988	20 725
Metales	Valorización	2169	2433	2864	2981	3 020	3059	3098	3 136	3174	3213
	DF	1409	1195	814	745	755	765	774	784	794	803
Vidrios	Valorización	1226	1375	1619	1912	2228	2558	2902	3259	3630	4016
	DF	7621	7594	7472	7299	7104	6894	6670	6432	6179	5911
Orgánicos	Valorización	64 452	70 016	75 804	81 822	88 076	94 572	101 309	108 292	115 521	123 001
	DF	106 827	103 635	100 198	96 517	92 593	88 423	84 001	79 324	74 387	69 188
Otros	DF	47 033	47 685	48 330	48 972	49 612	50 250	50 886	51 519	52 149	52 775
Total reciclables sin vidrio	Valorización	29 257	31 739	34 233	36 786	39 428	42 170	45 013	47 958	51 006	54 158
	DF	50 524	49 015	47 389	45 648	43 792	41 820	39 729	37 517	35 182	32 723
Total	Valorización	94 935	103 131	111 656	120 520	129 732	139 300	149 224	159 509	170 157	181 175
	DF	204 384	200 334	195 917	191 137	185 997	180 494	174 617	168 360	161 717	154 686

Fuente: GOPA Infra (2022).

Tabla 12. Porcentaje de valorización por tipo de residuo en Cúcuta. Escenario 2 (2031-2040)

Descripción	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Orgánicos	37,6 %	40,3 %	43,1 %	45,9 %	48,8 %	51,7 %	54,7 %	57,7 %	60,8 %	64,0 %
Celulosas	76,4 %	80,0 %	80,0 %	80,0 %	80,0 %	80,0 %	80,0 %	80,0 %	80,0 %	80,0 %
Plásticos	20,2 %	22,4 %	26,0 %	30,3 %	34,8 %	39,5 %	44,2 %	49,0 %	54,0 %	59,0 %
Metales	60,6 %	67,1 %	77,9 %	80,0 %	80,0 %	80,0 %	80,0 %	80,0 %	80,0 %	80,0 %
Vidrios	13,9 %	15,3 %	17,8 %	20,8 %	23,9 %	27,1 %	30,3 %	33,6 %	37,0 %	40,5 %
Promedio reciclables	37,6 %	40,3 %	43,1 %	45,9 %	48,8 %	51,7 %	54,7 %	57,7 %	60,8 %	64,0 %
Promedio total	31,7 %	34,0 %	36,3 %	38,7 %	41,1 %	43,6 %	46,1 %	48,7 %	51,3 %	53,9 %*

Fuente: GOPA Infra (2022).

*Este porcentaje no incluye la valorización como CDR de las 12 000 toneladas procedentes de la instalación TMB, con lo cual la tasa de valorización se incrementa a 57,5 %.

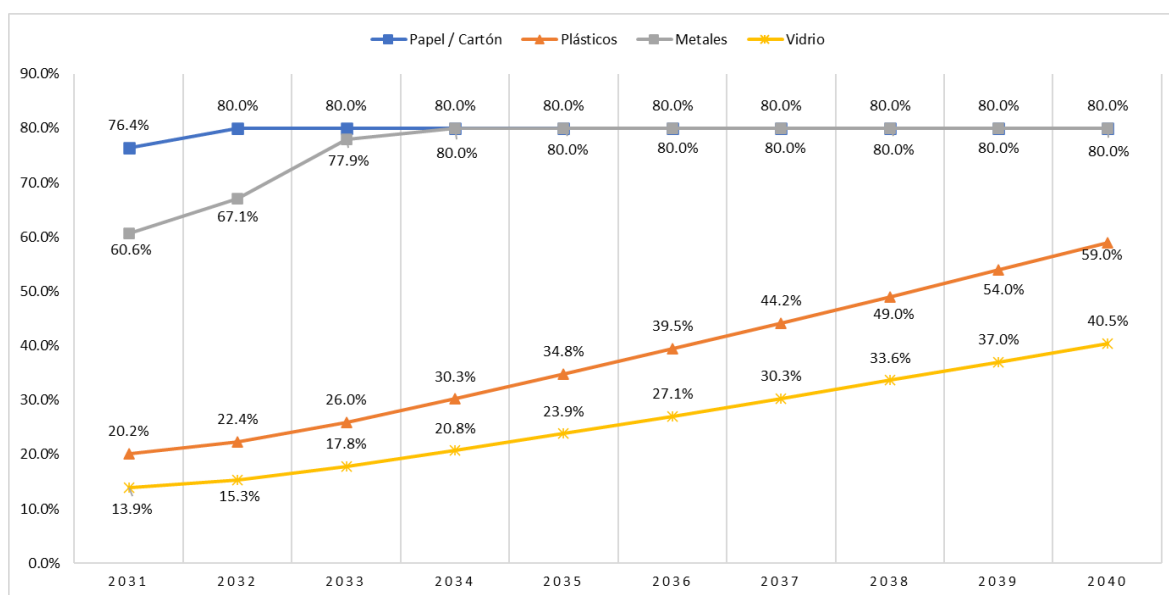
6.3 Análisis de las cantidades de residuos reciclables y propuestas para su valorización

6.3.1 Cantidades de residuos reciclables destinados a valorización

Como se puede ver en las tablas anteriores, en promedio, el porcentaje de residuos reciclables destinados a valorización se estima en 37,6 % en el año 2031, y se incrementaría a 64 % en 2040.

En la siguiente gráfica se muestra la variación en el porcentaje de residuos reciclables destinados a valorización entre los años 2031 y 2040, por tipo de material.

Gráfico 7. Porcentaje de valorización por tipo de residuo reciclable. Escenario 2



Fuente: GOPA Infra (2022).

Como se puede ver en el gráfico anterior:

- El porcentaje de celulosas destinadas a valorización se estima en 76,4 % para el año 2031 y se proyecta un incremento de este a lo largo del tiempo, hasta llegar a 80 % en 2040.
- El porcentaje de plásticos destinados a valorización se estima en 20,2 % en el año 2031 y se proyecta un incremento de este a lo largo del tiempo, hasta llegar a 59 % en 2040.
- El porcentaje de metales destinados a valorización se estima en 60,6 % en el año 2031 y se proyecta un incremento de este a lo largo del tiempo, hasta llegar a 80 % en 2040.
- El porcentaje de vidrios destinados a valorización se estima en 13,9 % en el año 2031 y se proyecta un incremento de este a lo largo del tiempo, hasta llegar a 40,5 % en 2040.

6.3.2 Clasificación y pretratamiento de residuos reciclables

Con base en estas cantidades, se estima que en 2040 se necesitaría una capacidad instalada de pretratamiento y clasificación de aproximadamente 55 000 t/año para gestionar los residuos reciclables recogidos de forma selectiva, sin considerar el vidrio.

En este escenario se plantea realizar esta actividad con un sistema de clasificación y pretratamiento a escala industrial. Por lo tanto, sería necesario implementar una planta de 30 000 t/año adicional a la definida en el escenario 1. Por lo tanto, en 2040 habría un total de dos plantas de 30 000 t/año de capacidad, cada una para la clasificación y pretratamiento de los residuos reciclables recogidos selectivamente, sumando una capacidad total de tratamiento de 60 000 t/año.

La inversión en infraestructura y equipos para una planta de clasificación de estas características y capacidad está en el rango de los 3 a 5 millones de dólares en el caso de clasificación 100 % manual, que aumenta a un rango de 4 a 6 millones de dólares para plantas semiautomatizadas. La inversión total para la planta requerida en este escenario se estima en 5 millones de dólares. Los costos de operación están en el rango de 30 a 40 USD/ton de material por clasificar.

De acuerdo con la experiencia internacional, las actividades de clasificación y pretratamiento a escala industrial logran una eficiencia promedio del 70 % en cuanto a material efectivamente valorizable vía reciclaje. Por lo tanto, la cantidad de material reciclable (celulosas, plásticos y metales) que se dirigiría a la industria transformadora se estima en 38 500 toneladas en 2040. Adicionalmente, en este mismo año, también se estarían dirigiendo a la industria transformadora, aproximadamente, 4000 toneladas de vidrio. De acuerdo con los resultados del estudio de mercado (PREVEC, 2021), se entiende que la industria transformadora está interesada en recibir todo el material reciclable disponible, por lo que debería ampliar su capacidad de tratamiento en caso de ser necesario.

Al mismo tiempo, y de acuerdo con la experiencia internacional, se estima un volumen de rechazo correspondiente al 30 % del material ingresado a pretratamiento y clasificación industrial, que se estima en 16 500 toneladas en 2040. Este material estaría disponible para la producción de CDR en la medida en que existan las inversiones de carácter privado, que son necesarias para su procesamiento, tanto de pretratamiento (trituración y mezcla), como de coprocesamiento en las plantas cementeras. Estas inversiones dependerán del volumen a tratar, pero como referencia se puede indicar que, una planta de pretratamiento para producción de CDR diseñada para unas 30 000 t/año implica una inversión de unos 4 a 5 millones de dólares, con un costo operativo de unos 40 a 50 dólares por tonelada.

6.4 Análisis de las cantidades de residuos orgánicos y propuestas para su valorización

6.4.1 Cantidades de residuos orgánicos destinados a valorización

La cantidad de residuos orgánicos municipales (ROM) destinados a valorización se estima en 64 452 t/año para el año 2031 y se incrementa, progresivamente, hasta alcanzar las 123 000 t/año en el año 2040, lo que equivale al 64 % de los residuos orgánicos generados.

6.4.2 Tratamiento de residuos orgánicos

Considerando lo propuesto para el escenario 1, en 2030 se tendría una capacidad de valorización de residuos orgánicos de, aproximadamente, 60 000 t/año, por lo que sería necesario ampliar esta capacidad hasta alcanzar una capacidad de valorización de residuos orgánicos de, como mínimo, 123 000 t/año.

Adicionalmente, se espera que, para el año 2031, ya estén consolidadas la segregación en la fuente y la recolección selectiva de residuos orgánicos, por lo que se pueden incluir tecnologías que requieren una mayor y mejor separación de estos. Por lo tanto, se propone, en este escenario, la implementación de una planta de digestión anaerobia a nivel demostrativo para la posterior implementación de futuras plantas similares.

En este orden de ideas, se propone, para este escenario, la implementación de dos plantas adicionales de compostaje con una capacidad de 25 000 t/año cada una, y una planta de digestión anaerobia a nivel demostrativo con una capacidad de 20 000 t/año. Se estima que la producción de biogás de esta planta sería de, aproximadamente, 2 millones de m³ (100 m³ por tonelada tratada) (BID, 2022). Con base en el valor energético del biogás, esto significaría una generación de energía eléctrica de 4800 MWh/año o una producción de 1,2 millones de m³ de biometano.

Estas plantas se podrían implementar progresivamente de la siguiente forma: una en el año 2031, una en el año 2035 y una en el año 2038, de acuerdo con las proyecciones de generación de residuos orgánicos. La planta de biodigestión se podría implementar en el año 2035. En 2040, se alcanzaría una capacidad de valorización de 130 000 t/año (60 000 t/año en el escenario 1 más 70 000 t/año en el escenario 2), como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 13. Capacidad total de valorización de residuos orgánicos en 2040

Tecnología	Capacidad total al 2040 (t/año)	Observaciones
Compostaje	110 000	60 000 t/año por implementar entre los años 2022 y 2030; 50 000 t/año por implementar entre los años 2031 y 2040.
Digestión anaerobia	20 000	20 000 t/año por implementar entre los años 2031 y 2040.
Total	130 000	

Fuente: GOPA Infra (2022).

De acuerdo con la información del estudio de mercado (PREVEC, 2021), el costo de inversión (CAPEX) para una planta de compostaje con aireación forzada de 25 000 t/año de capacidad es, en promedio, de 120 USD/t, lo que representaría una inversión total de aproximadamente 3 millones de dólares por planta. La inversión total para las dos plantas requeridas se estima en 6 millones de dólares. El costo de operación (OPEX) de estas plantas se estima en 12 USD/ton, lo que representaría un costo de 300 000 dólares por año por planta. Estos costos de inversión y operación será posible cubrirlos en la medida que las plantas accedan a la tarifa correspondiente.

De acuerdo con la información de este mismo estudio, el costo de inversión (CAPEX) para una planta de digestión anaerobia se encuentra entre 360 y 440 USD/t, lo que representaría una inversión total de entre 7,2 y 8,8 millones de dólares para la planta de 20 000 t/año. El costo de operación (OPEX) de estas plantas se estima entre 20 y 60 USD/ton, lo que representaría un costo aproximado de 800 000 dólares por año por planta.

6.4.3 Demanda potencial de compost

Al mismo tiempo, se debe analizar si existe demanda para el compost que estarían produciendo las instalaciones de compostaje. La producción estimada de compost por año se presenta en la siguiente tabla (se asume una tasa de conversión del 20 %). Para estas estimaciones, se asume que la planta de biodigestión empieza a operar a partir del año 2035.

Tabla 14. Estimación de la producción de compost para el escenario 2

Año	Residuos orgánicos destinados a valorización (t/año)	Compost producido (t/año)
2031	64 452	12 890
2032	70 016	14 003
2033	75 804	15 161
2034	81 822	16 364
2035	68 076	13 615
2036	74 572	14 914
2037	81 309	16 262
2038	88 292	17 658
2039	95 521	19 104
2040	103 001	20 600

Fuente: GOPA Infra (2022).

De acuerdo con las proyecciones de GOPA Infra, con base en la información del estudio de mercado (PREVEC, 2021), la demanda de compost estimada para el año 2040 en Norte de Santander, por parte del sector agrícola, se estima en 10 268 toneladas. Sin embargo, la demanda a nivel nacional se estima en 259 000 toneladas. Como se mencionó previamente en el escenario 1, en el estudio de mercado realizado para Bogotá, se identificó que el compost producido en el área metropolitana de Bogotá se vende a nivel nacional, por lo que se puede inferir que sí existe una demanda a nivel nacional para

absorber el compost producido. Adicionalmente, también se prevé una demanda de compost por parte del sector ganadero, para restauración de suelos, para jardinería y por parte de entidades distritales y nacionales.

6.5 Tratamiento del rechazo que se destina a disposición final

De acuerdo con las proyecciones de este escenario, las cantidades de residuos que se destinan a disposición final se reducen de 204 384 toneladas en el año 2031 a 154 686 toneladas en el año 2040, lo cual representa una reducción del 24,3 %.

Como se mencionó en el capítulo 2, para todos los escenarios se plantea la implementación de sistemas de tratamiento mecánico-biológico (TMB) como alternativa para el tratamiento de los residuos no recogidos de forma selectiva (rechazo). Para el caso específico de este escenario, se plantea la instalación de una planta de TMB adicional de 60 000 t/año, para un total de dos plantas en 2040, con una capacidad total de tratamiento de 120 000 t/año.

Como se mencionó, la inversión para una planta de esta capacidad se estima en 50 dólares por tonelada tratada al año, lo que representa una inversión del orden de los 3 millones de dólares por planta. El costo de operación (OPEX) de estas plantas se estima en 7 USD/ton, lo que representaría un costo de 420 000 dólares por año por planta. La reducción de masa se estima entre 40 % y 60 %, dependiendo de si se utiliza, o no, el material con alto poder calorífico para la producción de CDR. El material restante se debe disponer en el relleno sanitario.

Con la implementación de estas plantas, se reducirían las cantidades de residuos que van al relleno sanitario. En la siguiente tabla, se muestran las cantidades de residuos que van a disposición final en este escenario, luego se restan los volúmenes de residuos que se irían a las instalaciones TMB y, finalmente, se suma el rechazo de estas mismas TMB (aproximadamente, 50 %), que se destinaría al relleno sanitario, con lo que se obtienen las cantidades finales de residuos que se estarían destinando al relleno sanitario.

Tabla 15. Cantidades de residuos a relleno sanitario en el escenario 2, en t/año

Año	A disposición final (A)	Residuos a TMB (B)	Rechazo TMB (C)	A relleno sanitario (A-B+C)
2031	204 384	60 000	30 000	174 384
2032	200 334	60 000	30 000	170 334
2033	195 917	60 000	30 000	165 917
2034	191 137	60 000	30 000	161 137
2035	185 997	120 000	60 000	179 997
2036	180 494	120 000	60 000	120 494
2037	174 617	120 000	60 000	114 617
2038	168 360	120 000	60 000	108 360
2039	161 717	120 000	60 000	101 717

Año	A disposición final (A)	Residuos a TMB (B)	Rechazo TMB (C)	A relleno sanitario (A-B+C)
2040	154 686	120 000	60 000	94 686

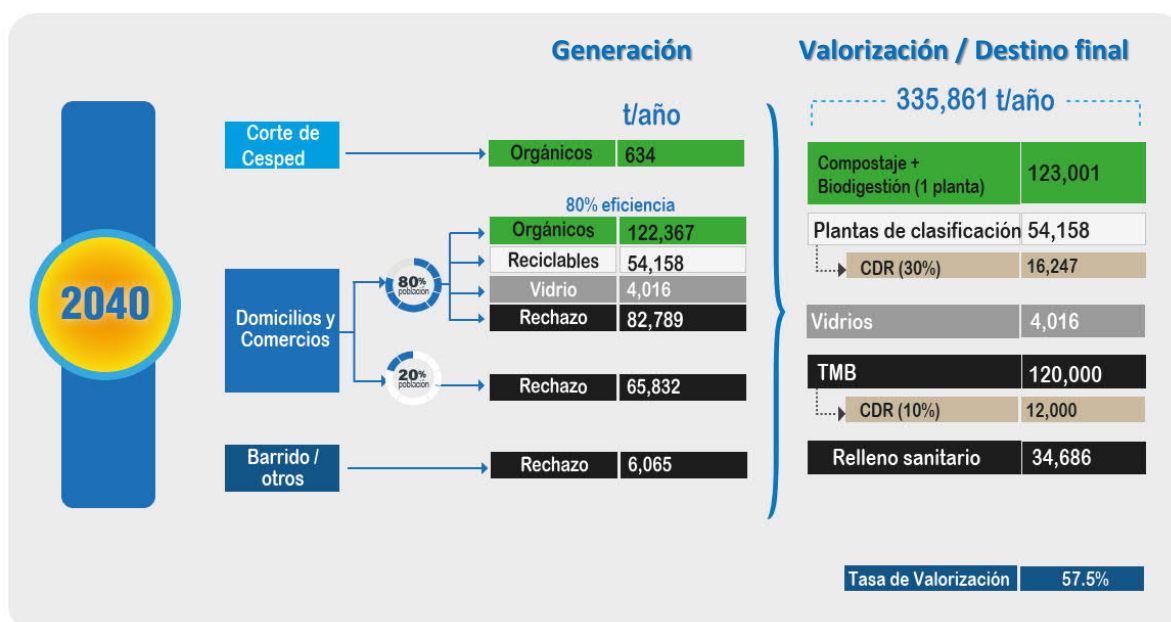
Fuente: GOPA Infra (2022).

Con la instalación de las plantas TMB, las cantidades de residuos que se destinan al relleno sanitario disminuyen en un 45,7 % entre los años 2031 y 2040.

6.6 Análisis de potencial escenario 2

En la siguiente gráfica, se presentan los flujos de residuos proyectados para el año 2040 en este escenario.

Gráfica 8. Flujo de residuos sólidos municipales en t/año para el año 2040. Escenario 2



Fuente: GOPA Infra (2022).

Como se puede observar en el gráfico anterior, se proyecta que, para el año 2040, se valoricen un total de 182 000 toneladas de residuos orgánicos y reciclables (123 000 ton de orgánicos + 59 000 ton de reciclables). Esto representa un porcentaje de valorización del 53,9 %. Si a este porcentaje se agregan las 12 000 toneladas procedentes de la instalación TMB a valorizar como CDR, entonces, el porcentaje de valorización se incrementa a 57,5 %, 26 puntos porcentuales por encima de lo proyectado para el año 2030 en el escenario 1.

Para la valorización de estos residuos, se propone la implementación de la siguiente infraestructura.

Tabla 16. Infraestructura a implementar en el escenario 2 para la valorización de los residuos reciclables y orgánicos

Infraestructura	Cantidad	Capacidad por planta (t/año)	Inversión estimada (millones de dólares)	Capacidad total al año 2040 (t/año), incluyendo infraestructura de escenario 1
Planta de clasificación y pretratamiento	1	30 000	5	60 000
Planta de compostaje	2	25 000	6	110 000
Planta de digestión anaerobia	1	20 000	8	20 000

Fuente: GOPA Infra (2022).

Asimismo, se proyecta que, en el año 2040, se destinen a disposición final 154 686 toneladas, de las cuales 120 000 podrían que ser previamente tratadas en dos instalaciones de TMB con una capacidad de 60 000 t/año cada una.

De acuerdo con lo indicado en los ítems anteriores, en este escenario, habría dos potenciales fuentes para la generación de CDR: 1) el rechazo de las instalaciones de clasificación y pretratamiento a escala industrial que se estima en 30 % (16 300 t/año en el año 2040); y 2) el material con alto poder calorífico separado en las instalaciones de TMB, que se estima en un 10 % (12 000 t/año).

Como se mencionó en los escenarios 0 y 1, en Cúcuta, Cemex cuenta con la planta cementera Los Patios, ubicada en el municipio del mismo nombre, a 10 km de la ciudad de Cúcuta. La empresa ha declarado estar interesada en el desarrollo del coprocesamiento, lo que, en el mediano y largo plazos, implica la existencia de una alternativa de valorización para la fracción inorgánica no reciclable de los residuos generados en Cúcuta. Para el cumplimiento de la meta del 15 % de sustitución de combustibles fósiles, se demandaría un volumen de unas 34 000 t/año de CDR, por lo que no habría limitaciones para valorizar energéticamente las cantidades indicadas previamente. Adicionalmente, la capacidad teórica de consumo de valorización por coprocesamiento de la fracción no reciclable a través de su consumo como CDR, alcanza un máximo de unas 180 000 t/año, considerando un 80 % de sustitución de combustibles fósiles.

6.1 ¿Qué medidas se recomienda implementar para concretizar el escenario 2?

Además de las recomendaciones propuestas en el escenario 1, en este escenario se recomienda lo siguiente para la implementación de la planta de digestión anaerobia a nivel demostrativo:

- Exploración de mecanismos para la cooperación internacional que permitan el desarrollo de un proyecto demostrativo a escala industrial, para la implementación de una planta de biodigestión en Cúcuta.

7 Conclusiones y recomendaciones

A continuación, se presentan las principales conclusiones del estudio.

- La tasa de valorización de residuos reciclables y orgánicos para Cúcuta se estimó en 3,6 % para el año 2021, de acuerdo con los datos reportados en el SUI para residuos reciclables y la información levantada en el estudio de mercado (PREVEC, 2021) para residuos orgánicos. Para los residuos reciclables, se estimó en 12,6 % y, para los orgánicos, en 0,3 %.
- En el escenario 0, se proyecta la situación actual (nula segregación en la fuente y recolección selectiva) y se considera la implementación del proyecto piloto de la planta de aprovechamiento de residuos sólidos del Parque Agroecológico Metropolitano y de la implementación de la REP de envases y empaques en Cúcuta a partir del año 2023. Con esto, la tasa de valorización de residuos orgánicos y reciclables se incrementa a 14,1 % al año 2030, lo que representa un aumento de 10,5 puntos porcentuales con respecto al año 2021. Para los residuos reciclables, se proyecta un incremento en la tasa de valorización hasta llegar al 23,7 %, y para los residuos orgánicos un incremento hasta alcanzar un 9,8 %.
- Si bien estos resultados representan una mejora con respecto a la situación actual, se considera que aún son poco significativos como para impulsar una economía circular en torno a la gestión de los residuos sólidos en Cúcuta.
- En el escenario 1, se propone la implementación progresiva de un programa de segregación en la fuente y de recolección selectiva de los RSM hasta cubrir un 50 % de la población en el año 2030. Asimismo, se incorpora tecnología probada y consolidada a nivel internacional en el sector residuos, como plantas de clasificación, compostaje y TMB, además de la utilización de la fracción no reciclable para la producción de combustible derivado de residuos (CDR) que va a ser utilizado por la industria cementera (a través de su coprocesamiento). Con esto, se alcanza una tasa de valorización de residuos reciclables y orgánicos del 31,5 % al año 2030, lo que representa un aumento de 27,9 puntos porcentuales con respecto al año 2021. Por lo tanto, se puede concluir que, con la incorporación de gestión y tecnología, se avanza hacia una gestión integral y se logran mejores resultados.
- En el escenario 2, se propone la implementación progresiva de un programa de segregación en la fuente y de recolección selectiva de los RSM hasta cubrir un 80 % de la población en el año 2040. Asimismo, se incorpora un mayor número de instalaciones de tratamiento de residuos, así como una instalación de digestión anaerobia a nivel demostrativo. Con esto, se alcanza una tasa de valorización de residuos reciclables y orgánicos del 57,5 % en 2040, lo que representa un aumento de 26 puntos porcentuales con respecto a lo proyectado en el escenario 1 para el año 2030.
- Para alcanzar estas tasas de valorización, se propone que en 2040 se hayan implementado, en Cúcuta, dos plantas de clasificación de 30 000 t/año cada una, cuatro plantas de compostaje de 25 000 a 30 000 t/año cada una, una planta de biodigestión a nivel demostrativo de 20 000 t/año, dos plantas de TMB de 60 000 t/año cada una y las operaciones necesarias para la producción de CDR y su posterior coprocesamiento en plantas cementeras (inversiones a ser materializadas por la industria).

- Por lo tanto, se puede concluir que es necesario incorporar programas de segregación en la fuente y de recolección selectiva, así como tecnologías para el tratamiento de los residuos para avanzar hacia una gestión integral y mejorar, de forma relevante, las tasas de valorización.

Las principales recomendaciones para alcanzar los resultados proyectados serían:

- Implementación de medidas de sensibilización con diferentes grupos de interés (por ejemplo, hogares que forman parte del programa de segregación en la fuente y recolección selectiva, población en general y asociaciones de recicladores y recicladoras) para lograr los porcentajes de cobertura de segregación en la fuente y de recolección selectiva propuestos, así como una alta participación de la población y una eficiente segregación en la fuente.
- Estudio de incentivos para la inversión en sistemas modernos y eficientes para la clasificación y pretratamiento de residuos reciclables y el tratamiento de residuos orgánicos, que permitan procesar los volúmenes involucrados de forma eficiente en calidad y costo.
- Actualización de la regulación sobre la responsabilidad extendida del productor, introduciendo metas más ambiciosas y específicas por tipo de material, con incentivos de cumplimiento de metas que garanticen la instalación de una cadena de valor eficiente y robusta.
- Implementación de un plan de trabajo específico con Corponor y otras autoridades con competencias regulatorias en la materia para facilitar los procesos de obtención de licencia ambiental para las plantas de compostaje con capacidad superior a 20 000 t/año.
- Implementar incentivos económicos para las municipalidades, con el fin de modificar la forma en que gestionan sus residuos orgánicos, o hacia el sector privado, para materializar inversiones en infraestructura de valorización, así como para el uso de los productos generados de la valorización de los residuos orgánicos.
- Desincentivar la disposición final de residuos orgánicos. Esta situación puede ser abordada, principalmente, de dos formas, como se ha hecho en varios países (principalmente de la Unión Europea): 1) implementación gradual de un impuesto a los rellenos sanitarios; y 2) prohibir la disposición final de residuos orgánicos en los rellenos sanitarios.
- Desarrollar el mercado del compost a través de planes de mercadeo y educación/sensibilización sobre sus beneficios a potenciales consumidores y consumidoras del producto, y crear un sello/ etiqueta (ecológica) para que el consumidor o consumidora se pueda orientar mejor.
- Exploración de mecanismos para la cooperación internacional que permitan el desarrollo de proyectos demostrativos a escala industrial, para la implementación de una planta TMB y una planta de biodigestión en Cúcuta.
- Proceso de cooperación público-privada entre la industria cementera, autoridad municipal y autoridades nacionales con competencias en la materia, para el reconocimiento e impulso de la tecnología de coprocesamiento como alternativa preferente para la valorización de la fracción no reciclable de residuos de envases y empaques, para dar certidumbre y sostenibilidad a las inversiones respectivas.

-
- Incorporación y reconocimiento de la fracción no reciclable valorizada energéticamente por coprocesamiento, en la remuneración por servicio de aprovechamiento.
 - Plan específico de búsqueda, gestión y acompañamiento de proyectos que califiquen a financiamiento por la vía del incentivo al aprovechamiento, considerando diferentes alternativas de valorización.

Referencias

- Banco Interamericano de Desarrollo, BID. (2022). *Hacia la valorización de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. Conceptos básicos, análisis de viabilidad y recomendaciones de políticas públicas*. BID.
- Bastida *et al.* (2008). Application of fresh and composted organic wastes modifies structure, size and activity of soil microbial community under semiarid climate. *Applied Soil Ecol.*, 40, 318-329.
- Boldrin, A., Andersen, J. K., Moller, J., Christensen, T. H., Favoino, E. (2009). Composting and compost utilization: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Manage. Res.*, 27, 800-812. doi:10.1177/0734242X09345275
- Bonanomi, G., Antignani, V., Pane, C., Scala, E. (2007). Suppression of soilborne fungal diseases with organic amendments. *J. Plant Pathol.*, 89, 311-324.
- Diacono, M. & Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 30, 401-422. doi:10.1051/agro/2009040
- Favoino, E. & Hogg, D. (2008). The potential role of compost in reducing greenhouse gases. *Waste Manage. Res.*, 26, 61-69. doi:10.1177/0734242X08088584
- GOPA Infra. (2021). *Estudio de caracterización de residuos sólidos*. GOPA Infra.
- Harrison, (2008). Composting and formation of humic substances. *Encyclopedia of Ecology*, 713-719.
- Instituto Nacional de Normalización, INN. (2015). *NCh 2880: Compost. Requisitos de calidad y composición*. INN.
- Lou, X.F. & Nair, J. (2009). The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions. A review. *Bioresource Technology*, 100, 3792-3798.
- MINAM-MEF. Guía de identificación, formulación y evaluación social de proyectos de residuos sólidos municipales a nivel de perfil, Perú. MINAM-MEF
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (26 de julio de 2018). Resolución 1407 de 2018. Por la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones. D.O. n.º 50.673.
- PREVEC. (2021). *Estudio del mercado de valorización de los residuos orgánicos en Cúcuta*. PREVEC.
- Programa Reciclo Orgánicos. (2019). *Manual compostaje, una herramienta para combatir el cambio climático*. Programa Reciclo Orgánicos.
- ROU. (2007). *Life cycle inventory and life cycle assessment for wind-row composting systems*. NSW Department of Environment and Conservation.
- Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag. (2014). *Anaerobic digestion of biowaste in developing countries*. Eawag.

ANEXOS

Anexo 1

MATRIZ COMPARATIVA ENTRE LAS TECNOLOGÍAS DE COMPOSTAJE Y DIGESTIÓN ANAEROBIA

Criterio	Compostaje	Digestión anaerobia
Tecnología probada	Tecnología probada a escala industrial con más de 25 años de utilización comprobada	Tecnología probada a escala industrial con más de 25 años de utilización comprobada
Número de instalaciones en funcionamiento a nivel mundial	Existen en operación más de 3500 instalaciones de compostaje para residuos de jardinería (verdes) o residuos orgánicos domiciliarios (Pinasseau <i>et al.</i> , 2018)	> 120 instalaciones centralizadas de la fracción orgánica de residuos municipales. Existen, además, más de 2500 instalaciones individuales en granjas o sitios similares (Pinasseau <i>et al.</i> , 2018)
Disponibilidad esperada y confiabilidad de operación	>8500 h/año	>8000 h/año
Tiempo de proceso	3 a 6 meses, dependiendo de la tecnología	25 a 30 días, sin considerar el posterior compostaje del digestato
Salidas del proceso	Compost, lixiviado, emisiones y rechazos	Biogás, digestato, agua residual y rechazos
Porcentaje de desviación de residuos	Si se aprovecha el compost, la cantidad de residuos destinados al relleno sanitario se reduce entre un 25 % y un 40 %	Si la fracción sólida del digestato se utiliza como compost, el residuo que va al relleno sanitario se reduce entre un 50 % y un 60 %; de lo contrario, disminuye entre un 33 % y un 38 % (Colturato, 2021)
Requerimiento de área	Cerrado: 0,1 a 0,4 m ² /TPA de residuos orgánicos Con aireación forzada: 0,4 a 0,5 m ² /TPA de residuos orgánicos Pilas estáticas: 0,6 a 1,0 m ² /TPA de residuos orgánicos	0,10 a 0,25 m ² /TPA de residuos orgánicos
Complejidad técnica	Baja-media	Mediana-alta
Calificación del personal	Personal calificado para la operación de la maquinaria y la realización de monitoreos de temperatura y humedad	Personal calificado para la operación de la maquinaria y realización de monitoreos, y personal no calificado para procesar la materia prima
Condiciones técnicas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Separación y pretratamiento de la fracción orgánica 2. El contenido de humedad de los residuos debe estar entre el 45 % y el 60 % 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Separación y pretratamiento de la fracción orgánica 2. Temperatura estable para las condiciones óptimas de descomposición y generación de biogás

Criterio	Compostaje	Digestión anaerobia
Condiciones para la implementación exitosa de la tecnología	Mercado para el compost/ posibilidades para certificar el compost	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarifa suficientemente alta para la electricidad generada a partir del biogás 2. Incorporación del biogás como fuente de energía no convencional dentro del mercado energético 3. Incentivo para el uso del biometano
Inversión (CAPEX)	80 a 160 USD/TPA, según escala del proyecto	360 a 440 USD/TPA, según escala del proyecto
Costos anuales de operación y mantenimiento (OPEX)	10 a 20 USD/TPA, según escala del proyecto	20 a 60 USD/TPA, según escala del proyecto
Vida útil	20 años	25 años (con mantenimiento adecuado)
Escala	1000 TPA a 200 000 TPA	20 000 TPA a 240 000 TPA (Banco Mundial, 2011)
Consumos	<i>Agua:</i> 0,14 m ³ /t a 0,33 m ³ /t de residuos orgánicos <i>Combustibles:</i> 20,6 kWh/t de residuos orgánicos separados en la fuente	<i>Agua:</i> ~0,1 t/t de residuos orgánicos separados en la fuente
Salidas del proceso	<i>Emisiones:</i> 816 g a 1132 g de CH ₄ /t de residuos orgánicos; 371 g NH ₃ /t de residuos orgánicos; 0,150 kg N ₂ O/t de residuos orgánicos <i>Compost:</i> 0,2 t/t de residuos orgánicos a 0,5 t/t de residuos orgánicos <i>Lixiviado:</i> ~0,03 m ³ /t de residuos a 0,1 m ³ /t de residuos <i>Rechazos/material no compostable:</i> aprox. 0,1 t/t de residuos orgánicos separados en su origen	<i>Biogás:</i> 80 Nm ³ /t a 120 Nm ³ /t de residuos orgánicos ingresados (Pinasseau <i>et al.</i> , 2018) <i>Digestato:</i> 0,4 t/t de residuos orgánicos <i>Agua residual:</i> entre 0,1 t/t de residuos orgánicos y 0,5 t/t de residuos orgánicos, según la tecnología <i>Emisiones fugitivas de CH₄:</i> ~0-411 g/t de residuos orgánicos separados en la fuente <i>Rechazos/material no compostable:</i> aprox. 0,2 t/t de residuos orgánicos separados en su origen
Balance de energía	<i>Consumo de energía eléctrica:</i> 8,4 kWh/t de residuos orgánicos <i>Generación de energía eléctrica:</i> n/a	<i>Consumo de energía térmica:</i> 20 kWh/t a 120 kWh/t de residuos orgánicos

Criterio	Compostaje	Digestión anaerobia
		<p><i>Consumo de energía eléctrica:</i> 20 kWh/t a 55 kWh/t de residuos orgánicos, aproximadamente el 15 % de la energía producida</p> <p><i>Generación de energía eléctrica:</i> 200 kWh/t a 250 kWh/t de residuos orgánicos</p> <p><i>Generación de calor:</i> 200 kWh/t a 250 kWh/t de residuos orgánicos</p>

Fuente: elaborado por GOPA Infra con base en BID (2022).