

EVALUACIÓN ECONÓMICA AMBIENTAL DEL APROVECHAMIENTO DE  
RESIDUOS SÓLIDOS ORDINARIOS EN EL COMPONENTE DE DISPOSICIÓN  
FINAL DEL SISTEMA DE ASEO DE CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

VICTORIA ALEJANDRA ARELLANO PÁJARO  
Cohorte XIV

Universidad de Manizales  
Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas  
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente  
Manizales, Colombia  
2017

EVALUACIÓN ECONÓMICA AMBIENTAL DEL APROVECHAMIENTO DE  
RESIDUOS SÓLIDOS ORDINARIOS EN EL COMPONENTE DE DISPOSICIÓN  
FINAL DEL SISTEMA DE ASEO DE CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

VICTORIA ALEJANDRA ARELLANO PÁJARO

Cohorte XIV

Tesis de investigación presentada como parte de los requisitos para optar al título de:  
Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Director:

Natalia Mejía Franco

Economista, MSc. en Desarrollo Regional y Planificación del Territorio, Docente de la  
Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Universidad de Manizales

Línea de Investigación:

Desarrollo Social y Humano

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias Contables, Económicas y Administrativas

Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Manizales, Colombia

2017

*A mi madre, esposo e hijo, quienes me  
bendicen con su amor, apoyo y confianza.*

## **Agradecimientos**

A Dios por darme la oportunidad de continuar con mi formación académica, otorgarme salud y entendimiento para llevar acabo la meta trazada.

A la empresa Caribe Verde S.A. E.S.P., puntualmente a su Director Técnico Operativo el Ingeniero Adolfo Hernández Tous y su Directora Administrativa y Financiera la Ingeniera Cindy Jiménez Castaño, por apoyar en este proceso de aprendizaje.

A María del Pilar Sánchez Muñoz, Economista, MSc. en Economía, Doctora en Desarrollo Sostenible, Docente de la Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales; por brindarme su acompañamiento y asesoría.

A Natalia Mejía Franco, Economista, MSc. en Desarrollo Rural y Planificación del Territorio, Doctora en Desarrollo Sostenible, Docente de la Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Manizales; por su acompañamiento y asesoría.

## Resumen

La presente investigación realiza una evaluación económica ambiental del aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios en el componente de disposición final del sistema de aseo de Cartagena de Indias D.T. y C., es decir, se determina la viabilidad real de efectuar aprovechamiento teniendo en cuenta los beneficios y costos ambientales sobre la operación del relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos.

Para el logro del objetivo de investigación, se efectúa una evaluación técnica y ambiental del relleno sanitario, identificando las condiciones operativas actuales y sus indicadores ambientales, calculando a su vez aspectos como vida útil, emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y generación de lixiviado.

De igual forma, se diseñan escenarios hipotéticos de tecnologías de aprovechamiento para el tratamiento de los residuos sólidos ordinarios de Cartagena, evaluándose la variación en la vida útil del relleno sanitario por la entrada en operación de las tecnologías, la incidencia en la generación de lixiviado y emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

Para finalmente, determinar la viabilidad económica ambiental de las alternativas de aprovechamiento analizadas, por medio de una evaluación económica tipo Análisis Costo Beneficio (ACB), en la que se realiza una comparación del Valor Presente Neto (VPN) de beneficios y costos de cada escenario, para establecer la alternativa que da mayores beneficios a la sociedad.

Entre los resultados obtenidos se encuentra que, si el relleno sanitario continúa con la tendencia de recepción, podrá disponer residuos sólidos hasta el año 2020; la entrada en operación de un sistema de incineración, compostaje o biomecánico le daría la posibilidad de extenderle la vida útil de 3 a 7 años dependiendo la densidad de compactación; reducir las emisiones de GEI entre 18% y 37%; y reducir la producción de lixiviado entre un 34% y 56%, con respecto a una gestión sin aprovechamiento.

Finalmente, de acuerdo a los resultados de Análisis Costos/Beneficio, se identifica la tecnología de compostaje, como la opción tecnológica con mayor viabilidad económica y ambiental para Distrito de Cartagena de Indias, siendo de las tres (3) tecnologías analizadas la única que alcanza niveles de rentabilidad por encima de la Tasa Social de Descuento (TSD)

para proyectos de inversión social, esto se asocia a que demanda menor inversión inicial y a que los costos medios de operación se asimilan a los ingresos por tarifa de disposición final.

También se pudo establecer, que aun con el alto flujo de beneficios de las tecnologías de incineración y de una planta mecanizada complementada con un sistema de compostaje, por los altos costos de inversión y operativos de estos sistemas, no se alcanza una rentabilidad, debido a que los costos medios operativos superan los ingresos (tarifa y venta de subproductos).

**Palabras clave:** Relleno sanitario, residuos sólidos ordinarios, compostaje, incineración, tratamiento biomecánico, Análisis costo beneficio.

## Abstract

The present investigation carries out an environmental economic evaluation of the recovery of domestic waste in the final disposal component of Cartagena de Indias D.T. and C., that is, the feasibility of technologies of waste management considering the environmental benefits and costs on the operation of Loma de los Cocos landfill.

To achieve the research objective, a technical and environmental assessment of the landfill is carried out, identifying the current operational conditions and their environmental indicators, calculating aspects such as lifetime, greenhouse gas emission (GHG) and leachate production.

Likewise, hypothetical scenarios of wastewater treatment technologies are designed for the treatment of Urban Solid Waste in Cartagena, evaluating the variation in the lifetime of the landfill with the operation of the technologies, the incidence of leachate generation and emission of greenhouse gases (GHG).

Finally, to determine the environmental economic viability of the utilization alternatives analyzed, by means of an economic evaluation type Cost Benefit Analysis (CBA), in which a comparison of the Net Present Value (NPV) of benefits and costs of each scenario, to establish the alternative that gives greater benefits to society.

Among the results obtained is that, if the landfill continues with the reception trend, it will be able to dispose of solid waste until 2020; the entry into operation of an incineration, composting or biomechanical system would give it the possibility of extending the lifetime of 3 to 7 years depending on the density of compaction; reduce GHG emissions by 18% to 37%; and reduced the production of leachate between 34% and 56%, with respect to a management without use of systems.

Finally, according to the results of Cost / Benefit Analysis, the composting technology is identified as the technological option with greater economic and environmental viability for the District of Cartagena de Indias, being of the three (3) technologies analyzed the only one that reaches the levels of profitability above the Social Discount Rate (TSD) for social investment projects, this is associated with lower initial investment demand since the average operating costs are assimilated to final disposal fee revenues.

It could also be established that, even with the high flow of benefits of incineration technologies and a Materials Recovery Facilities with a composting system, these systems, having high investment and operating costs, do not become profitable, since costs operating means exceed revenues (recurrent rate and sale of by-products).

**Keywords:** Landfill, urban solid waste, composting, incineration, mechanical biological treatment, cost-benefit analysis.



## Tabla de Contenido

1.	Introducción.....	1
2.	Justificación.....	3
3.	Planteamiento del Problema.....	5
3.1.	Descripción.....	5
3.2.	Planteamiento de la Pregunta de Investigación.....	6
3.3.	Delimitación del Problema.....	6
3.4.	Objetivos.....	6
3.4.1	Objetivo general.....	6
3.4.2	Objetivos específicos.....	6
4.	Marco Teórico.....	8
4.1	Marco Conceptual.....	8
4.1.1.	Perspectivas sobre el desarrollo.....	8
4.1.2.	Gestión de Residuos Sólidos Ordinarios como estrategia de desarrollo.....	12
4.1.3.	Perspectiva en la gestión de residuos del distrito de Cartagena de indias.....	13
4.1.4.	Técnicas de tratamiento y disposición final de residuos ordinarios.....	16
4.2	Marco Normativo.....	20
4.2.1.	Política Colombiana de Aprovechamiento de Residuos Sólidos Ordinarios.....	20
5.	Metodología.....	24
5.1.	Caracterización del Área de Estudio.....	24
5.1.1.	Caracterización del Distrito de Cartagena.....	24
5.1.2.	Caracterización de la Gestión de los Residuos Sólidos Ordinarios.....	27
5.1.3.	Descripción del Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos.....	31
5.2.	Periodo de Ejecución.....	37
5.3.	Procedimiento de Análisis.....	38

5.3.1.	Identificación de las condiciones técnicas y ambientales actuales del Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma De Los Cocos.....	38
5.3.2.	Diseño de escenarios de aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios. ....	39
5.3.3.	Análisis costo beneficio.....	40
6.	Resultados y Discusión.....	43
6.1.	Condiciones Técnicas y Ambientales Actuales del Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos .....	43
6.1.1.	Cumplimiento de requisitos técnicos y operativos del Relleno Sanitario .....	43
6.1.2.	Análisis ambiental del Relleno Sanitario.....	48
6.1.3.	Proyección del crecimiento del Relleno Sanitario.....	60
6.2.	Diseño de Escenarios de Aprovechamiento .....	62
6.2.1.	Tratamiento térmico por incineración. ....	63
6.2.2.	Tratamiento biológico por compostaje.....	69
6.2.3.	Tratamiento mecánico para la recuperación de materiales y compostaje. ....	75
6.3.	Valoración Económica Ambiental.....	82
6.3.1.	Análisis de costos de implementación de las alternativas de aprovechamiento. ....	82
6.3.2.	Determinación monetaria de costos y beneficio ambiental de los escenarios. ....	87
6.3.3.	Relación beneficio costos de escenarios.....	90
7.	Conclusiones y Recomendaciones .....	92
7.1.	Conclusiones.....	92
7.2.	Recomendaciones .....	95
8.	Literaturas citadas.....	96
9.	Anexos.....	100

## Lista de Tablas

Tabla 1 objetivos y metas del programa de aprovechamiento – PGIRS Cartagena 2015.....	16
Tabla 2 Composición física de los residuos sólidos ordinarios del Distrito de Cartagena de Indias .....	29
Tabla 3 Cronograma de monitoreo del relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos 2014.....	48
Tabla 4 Relación DBO <sub>5</sub> /DQO año 2014 .....	49
Tabla 5 Producción de lixiviado sin aprovechamiento 2005-2039 .....	51
Tabla 6 Resultados de caracterización de agua superficial 2014 .....	52
Tabla 7 Resultados de caracterización de agua subterránea 2014 .....	54
Tabla 8 Generación de Metano en el relleno Sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos sin aprovechamiento de residuos.....	57
Tabla 9 Composición de las partículas por tamaño y su presencia 2015 .....	59
Tabla 10 Cálculo de vida útil del relleno Sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos ..	61
Tabla 11 Estimación de área requerida adicional para disposición final hasta el 2025 .....	62
Tabla 12 Proyección de extensión de vida útil del relleno sanitario con tratamiento por incineración .....	64
Tabla 13 Emisiones reducidas escenario incineración.....	66
Tabla 14 Producción de lixiviado en el relleno sanitario con incineración 2005-2039 .....	68
Tabla 15 Proyección de extensión de vida útil del relleno sanitario con tratamiento por compostaje.....	71
Tabla 16 Emisiones reducidas escenario compostaje .....	71
Tabla 17 Producción de lixiviado en el relleno sanitario con compostaje 2005-2039.....	74
Tabla 18 Proyección de extensión de vida útil del relleno sanitario con tratamiento por MRF+Compostaje .....	77

Tabla 19 Emisiones reducidas escenario.....	78
Tabla 20 Producción de lixiviado en el relleno sanitario con MRF 2005-2039 .....	81
Tabla 21 Recursos valorizados por cada tecnología .....	85
Tabla 22 Flujo de fondos de escenarios de aprovechamiento .....	86
Tabla 23 VPN de los costos y beneficios en escenarios .....	90

## Lista de Figuras

Figura 1 Esquema de pozo de extracción de biogás.....	32
Figura 2 Grafica de histórico de densidades del relleno sanitario Parque Ambiental Loma De Los Cocos.....	33
Figura 3 Área de influencia directa del Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma De Los Cocos.....	36
Figura 4 Producción de lixiviado sin aprovechamiento 2005-2039.....	51
Figura 5 Ubicación de Piezómetro en el relleno sanitario .....	53
Figura 6 Concentración de metano en el Aire – Calculo de explosividad. Tomada de (Caribe Verde S.A. E.S.P., 2015, pág. 31).....	56
Figura 7 Puntos de muestreo de calidad de Aire. Tomado de (Caribe Verde S.A. E.S.P., 2015, pág. 33).....	57
Figura 8 Monitoreo Partículas suspendidas totales 2015 .....	58
Figura 9 Monitoreo Partículas respirables PM <sub>10</sub> 2015 .....	59
Figura 10 Producción de lixiviado sin aprovechamiento vs aprovechamiento con incineración 2005-2039.....	68
Figura 11 Producción de lixiviado sin aprovechamiento vs aprovechamiento con compostaje 2005-2039.....	74
Figura 12 Producción de lixiviado sin aprovechamiento vs aprovechamiento con MRF con Compostaje 2005-2039 .....	80

**Lista de Anexos**

Anexo 1. Resultados de aplicación de lista de chequeo basada en el Título F numeral 6 del RAS 2000 .....	100
Anexo 2. Datos históricos de disposición final de residuos de Cartagena de Indias 2006-2015 .....	109
Anexo 3. Proyección de generación de residuos sólidos ordinarios con densidad de 800 kg/m <sup>3</sup> .....	110
Anexo 4. Proyección de generación de residuos sólidos ordinarios con densidad de 1.034 Kg/m <sup>3</sup> .....	111
Anexo 5. Proyecciones de disposición final de residuos con escenario I Incineración con densidad de 800 kg/m <sup>3</sup> .....	112
Anexo 6. Proyecciones de disposición final de residuos con escenario I Incineración con densidad de 1034 kg/m <sup>3</sup> .....	113
Anexo 7. Proyecciones de disposición final de residuos con escenario II Compostaje con densidad de 800 kg/m <sup>3</sup> .....	114
Anexo 8. Proyecciones de disposición final de residuos con escenario II Compostaje con densidad de 1034 kg/m <sup>3</sup> .....	115
Anexo 9. Proyecciones de disposición final de residuos con escenario III MRF + Compostaje con densidad de 800 kg/m <sup>3</sup> .....	116
Anexo 10. Proyecciones de disposición final de residuos con escenario III MRF + Compostaje con densidad de 1034 kg/m <sup>3</sup> .....	117
Anexo 11. Corrección de composición física de residuos a disponer en el relleno sanitario .....	118
Anexo 12. Estimación de costos de Escenario I.....	119
Anexo 13. Estimación de costos de escenario II.....	121

## Lista de abreviaturas

Abreviatura	Término
ACB	Análisis Costo Beneficio
ASE	Área De Servicio Exclusivo
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CER	Certificado de Emisiones Reducidas
RDC	Combustibles Derivados de Residuos
CRA	Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico
CARDIQUE	Corporación Autónoma Regional Del Canal Del Dique
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DNP	Departamento Nacional de Planeación
D.T. y C	Distrito Turístico y Cultural
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
LIE	límite Inferior de Explosividad
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MTD	Mejores Técnicas Disponibles
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
PST	Partículas Suspendidas Totales
PGIRS	Plan De Gestión Integral De Residuos Sólidos
PMA	Plan de Manejo Ambiental
<i>PND</i>	Plan Nacional de Desarrollo
PEAD	Polietileno de alta densidad
PPC	producción per cápita
PACARIBE	Promoambiental del Caribe S.A. E.S.P.
RAS	Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico
RESPEL	Residuos Sólidos Peligrosos
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SEPA	Siglas en ingles de Agencia de Protección Medio Ambiental Escoces
IPPC	Siglas en ingles de Directiva de Prevención y Control Integrado de la Contaminación
IED	Siglas en ingles de directiva sobre emisiones industriales
BREF	Siglas en ingles de documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles
MRF	Siglas en ingles de instalaciones de recuperación de materiales
SUI	Sistema Único de Información de Servicios públicos
SSPD	Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios

---

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
TIR	Tasa Interna de Retorno
TSD	Tasa Social de Descuento
tCO <sub>2eq</sub>	Tonelada de Dióxido de Carbono equivalente
TMB	Tratamiento Mecánico Biológico
US EPA	United States Environmental Protection Agency
VPN	Valor Presente Neto

---



## 1. Introducción

La presente investigación se refiere a la valoración económica ambiental de alternativas de aprovechamiento para el Distrito de Cartagena de Indias considerando los impactos o beneficios ambientales sobre el Relleno Sanitario Parque Ambiental loma de los Cocos en la viabilidad económica de los sistemas de tratamiento.

En la actualidad, el Distrito de Cartagena de Indias presenta una creciente producción de residuos por encima de lo estimado, situación que afecta la vida útil de su relleno sanitario. Adicionalmente, el diseño del mismo, fue sobre el logro de metas de aprovechamiento anuales, metas que no han sido cumplida, por lo que, se infiere que la vida útil real del relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos es menor de la estimada inicialmente.

Sumado a lo anterior, a nivel nacional se han venido desarrollado políticas entorno a la gestión integral de los residuos sólidos, promoviendo que los municipios a partir de medidas locales planeen la gestión de sus residuos bajo el enfoque de desarrollo sostenible, y alcancen a su vez metas de aprovechamiento, por lo que, se hace relevante analizar alternativas de aprovechamiento de residuos e incorporar en este criterios económicos y ambientales.

La investigación alrededor a este tema de importancia nacional y local, se realiza por el interés de conocer la viabilidad de realizar gestión de residuos sólidos ordinarios a partir de sistemas de tratamiento o disposición final distintos al relleno sanitario, no solo a partir de flujos financieros sino también considerando el costo de los beneficios ambientales.

En el marco de la realización del estudio, se parte de un diagnóstico operativo y ambiental de las condiciones actuales del relleno sanitario, se procede a determinar y proyectar al año 2025 el comportamiento de los impactos ambientales relevantes del mismo (Demanda de área, lixiviado y biogás).

En segunda instancia, se diseñan escenarios de aprovechamiento de residuos y de igual forma se proyecta el comportamiento de las variables ambientales ya mencionadas en el periodo de 2016 a 2025, identificándose las posibles reducciones con respecto a un escenario de operación sin aprovechamiento.

En tercera instancia, se procede a realizar una evaluación económica ambiental, empleando el método de Análisis Costo Benéfico, en donde se establecen como beneficios los costos de la variación de los impactos ambientales analizados en cada escenario.

Por último, se establecen los resultados del desarrollo metodológico, conclusiones y recomendaciones del estudio, y las referencias bibliográficas.

## 2. Justificación

A nivel nacional, se ha evidenciado grandes avances en la gestión de los residuos sólidos ordinarios, focalizada principalmente en el fortalecimiento y creciente regulación del sistema de aseo. Con el objetivo de seguir avanzando y seguir mejorando la gestión nacional, el Gobierno ha establecido una Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos sobre el interés de satisfacer necesidades sociales, económicas y ambientales, y determina como su tercer eje temático “*la promoción de la reutilización, aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos*” (Departamento Nacional de Planeación, 2016).

El Distrito de Cartagena de Indias, como una de las principales ciudades de Colombia, posee un sistema de aseo consolidado que cubre recolección, transporte y disposición final de residuos. La recolección y transporte (no selectiva de residuos) se presta bajo la libre competencia, mientras que la disposición final es desarrollada en el predio Los Cocos bajo la técnica de relleno sanitario por una empresa concesionaria desde el 2005.

El Distrito frente a la nueva política de gestión de residuos sólidos y el establecimiento de otras normas, cuenta con una oportunidad de establecer e impulsar un sistemas de aseo que les permita aprovechar sus residuos sólidos ordinarios, esto en el marco de obtener los mayores beneficios sociales, ambientales y económicos posibles.

Al revisar la Resolución 0754 de 2014, por la cual se adopta *la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de Gestión*, en su numeral 4.4.7. de *Programa de aprovechamiento*, se muestra el requerimiento de efectuar estudios de factibilidad que consideren aspectos sociales, económicos, ambientales, técnicos, financieros y comerciales, con el fin de determinar la viabilidad de los proyectos y su sostenibilidad en el tiempo.

Por lo anterior, el desarrollo de esta investigación abarca un tema novedoso que permite conocer los costos ambientales asociados a alternativas de aprovechamiento que modernicen el sistema de aseo Distrital, cumplir con las metas nacionales de aprovechamiento y a la vez reducir o eliminar los impactos más relevantes de la operación propia del relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos.

La investigación realizada cuantifica técnicamente los impactos relevantes sobre el componente de disposición final y los costos asociados a estos, partiendo que cualquier alternativa de aprovechamiento genera cambios que deben ser considerados en la definición de los beneficios o costos de las posibles alternativas de aprovechamiento.

Por lo anterior, los resultados sirven de soporte para la toma de decisión de la técnica o tecnología de aprovechamiento en el Distrito, dado que identifica los beneficios ambientales asociados y los impactos negativos evitados, que se reflejan en protección de ecosistema y bienestar social de las zonas circunvecinas al relleno sanitario.

De ahí que, el aporte desde el punto de vista práctico de esta investigación, es conocer por medio de una valoración económica de bienes y servicios ambientales la mitigación a largo plazo de los impactos ambientales sobre la zona de influencia del relleno, teniendo como referente la inclusión de tecnología o técnica de aprovechamiento que reducirían las consecuencias ambientales ya existente por la disposición final de los residuos sólidos ordinarios mediante la técnica de relleno sanitario.

Así mismo, esta es el punto de partida para que el municipio como responsable de la gestión de sus residuos defina a qué tipo de tecnologías, método o técnica de aprovechamiento efectuar su estudio de factibilidad para la próxima actualización del Plan De Gestión Integral De Residuos Sólidos – PGIRS-.

### **3. Planteamiento del Problema**

#### **3.1. Descripción**

Cartagena de Indias es un distrito turístico y cultural; posee un sistema de aseo tercerizado en todos sus componentes, siendo prestados bajo el enfoque de libre competencia los servicios de barrido, recolección y transporte, mientras que el servicio complementario de disposición final fue concesionado por licitación pública a la empresa Caribe Verde S.A. E.S.P., por 20 años desde el 2005, la cual opera el Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma De Los Cocos ubicado en el municipio de Turbaná - Bolívar.

Acorde al desarrollo de la ciudad y a su crecimiento poblacional, se ha aumentado paulatinamente la generación de residuos sólidos ordinarios, evidenciado en la tasa de recepción de los residuos sólidos que llegan al relleno sanitario Parque Ambiental Loma de Los Cocos, la cual muestra un crecimiento anual promedio de 5,1% , superando lo proyectado (2%).

De igual forma, los criterios de diseño del relleno sanitario Parque Ambiental Loma De Los Cocos que permitieron determinar el área requerida y la vida útil del mismo, tuvo como variable la tasa de aprovechamiento, teniendo que en el año uno (1) de operación, se efectuaría el 5% del aprovechamiento de los residuos recibidos, hasta alcanzar a un 50% de aprovechamiento en el año doce (12) de operación.

Infortunadamente, el relleno sanitario no está realizando labores de aprovechamiento de residuos sólidos. Las toneladas promedio día recibidas y dispuestas, las cuales ascienden al 1.125 ton/m<sup>3</sup> en el 2014, representan un 41% más de lo esperado para el noveno año de operación, por lo anterior, es probable que la vida útil del relleno sanitario sea inferior a lo proyectado (20 años) y en el caso de que no se hagan adecuaciones adicionales o ajustes en la operación del mismo, por consiguiente, se demandaría terreno para la ampliación del relleno sanitario, afectando el ambiente y por ende los bienes y servicios que este ofrece, que generan bienestar social y sirven de sustento a los ecosistemas que en él se desarrollan.

### **3.2. Planteamiento de la Pregunta de Investigación**

¿Cuál es la viabilidad económica y ambiental del aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios en la ciudad de Cartagena de Indias D.T. y C., teniendo en cuenta el componente de disposición final del sistema del sistema de aseo?

### **3.3. Delimitación del Problema**

Se entiende como objeto de estudio el Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma De Los Cocos, localizado en el municipio de Turbana, en el kilómetro 23 sobre la vía Mamonal-Gambote. El predio donde se localiza el relleno sanitario cuenta con un área de 63.87 hectáreas, de las cuales 41,47 hectáreas estas destinadas según diseños para la recepción y disposición final de residuos sólidos domiciliarios, teniendo una vida útil estimada de 24 años y una licencia ambiental por 20 años otorgada por la Corporación Autónoma Regional Del Canal Del Dique – CARDIQUE-. (CARDIQUE, 2005)

La estimación de los beneficios económicos y ambientales de los escenarios de aprovechamiento diseñados, se realizaron considerando la totalidad del predio en donde opera el relleno sanitario, considerándose los cambios en los impactos ambientales relevantes.

### **3.4. Objetivos**

#### **3.4.1 Objetivo general.**

Realizar evaluación económica ambiental del aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios en el componente de disposición final del sistema de aseo de Cartagena de Indias D.T. y C.

#### **3.4.2 Objetivos específicos.**

- Determinar condiciones técnicas y ambientales actuales del Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma De Los Cocos.
- Diseñar escenarios hipotéticos para el aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios por tipo de residuo y/o técnica.
- Valorar los costos ambientales que generaría el componente de disposición final teniendo en cuenta el impacto de los escenarios de aprovechamiento de residuos propuestos sobre el sistema.

- Proponer tecnología o técnica de aprovechamiento en el componente de disposición final de residuos sólidos ordinarios teniendo en cuenta la valoración económica efectuada.

## **4. Marco Teórico**

El siguiente marco teórico permite guiar al conocimiento, conceptos y métodos que se requirieron, con el fin de dar respuesta a la pregunta de investigación y al desarrollo de los objetivos de esta investigación.

Inicialmente se describen las perspectivas frente al desarrollo sostenible y los enfoques de gestión de residuos sólidos, con el fin de comprender la importancia y potenciales aporte de la gestión integral de los residuos en el desarrollo sostenible de los territorios.

De igual forma, dado que este estudio se basa en la gestión sostenible de los residuos sólidos ordinarios, se identifican las técnicas o tecnologías de aprovechamiento mundial y nacionalmente más aceptadas para la gestión de los mismos indicando algunas consideraciones técnicas de los mismos.

A nivel normativo, se contextualiza las regulaciones nacionales y locales existentes, que promueven o regulan la gestión integral de los residuos sólidos ordinarios, esto con el fin de vislumbrar las obligaciones a nivel de gestión que los municipios deben llevar.

### **4.1 Marco Conceptual**

#### **4.1.1. Perspectivas sobre el desarrollo.**

La concepción del desarrollo ha ido cambiando por la evolución de las teorías científicas en el área de las ciencias naturales, físicas y por la transformación social, desde una postura de explotación y extracción para el aumento de las riquezas hasta una postura más ecológica y humanizada.

Entre los siglos XVIII y XIX, los preceptos económicos estaban establecidos bajo el paradigma de la teoría clásica, la cual a través de sus principales exponentes marcan distintas posturas de desarrollo, entre las que se encuentra el de la Escuela del Pensamiento Económico Fisiócrata la cual intentó integrar las leyes naturales, físicas y biológicas en la argumentación económica, identificando la relación tierra y trabajo en el comportamiento económico, y la dependencia a los límites de la tierra para la continuidad de la actividad económica (Bermejo, 1997).



Con Adam Smith (1723- 1790), uno de los pioneros del pensamiento económico clásico, se aparta de sus predecesores, contemplando al trabajo como la primera fuente de riqueza y a los recursos naturales como una fuente de abastecimiento ilimitado, no habiendo preocupación por los límites naturales de la tierra.

Frente a situaciones de escasez y el aumento en los precios de los recursos agrícolas, hubo un cambio de postura que fue organizada por David Ricardo (1772 - 1823) con la teoría del *Estado Estacionario*, en donde se reconoce que habría una reducción paulatina en el desarrollo asociada a la degradación de los recursos naturales (calidad de la tierra) y el aumento poblacional.

David Ricardo (1772 - 1823) junto a Thomas Malthus (1766 - 1834), reconocieron la existencia de límites ambientales, asociándola a la influencia en la calidad de la tierra con vocación agrícola y la pérdida de productividad de las mismas, que ocasionarían a la vez reducción en los salarios y estancamiento en el crecimiento. Es claro que en éste periodo de la historia, el crecimiento económico y aumento en la riqueza eran sinónimo de desarrollo.

Karl Marx (1818- 1883) frente al desarrollo plantea un paradigma influenciado por la importancia del componente social en el crecimiento y el desarrollo, a su vez, crítica la visión de la naturaleza como instrumento doblegada al servicio del desarrollo de la humanidad.

Si bien algunos pensadores anteriormente nombrados, tratan el tema ambiental en sus posturas, es notorio que la visión con la que abordan los recursos naturales, continúa siendo antropocentista, es decir, que los bienes y servicios ambientales son reconocidos como recursos para el desarrollo económico.

Por otra parte, a partir del reporte de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, *Our Common Future* [Nuestro Futuro Común] (1987), se empoderó el concepto de “desarrollo sostenible” el cual es definido como:

*“aquel desarrollo que satisface las necesidades de las presentes generaciones sin comprometer la habilidad de las futuras para satisfacer sus propias necesidades”.*  
*La intención fue elaborar una definición práctica que condujera a “cambios -en el*

*acceso a los recursos y en la distribución de costos y beneficios”* (UNWCED, 1987, p.43).

El impulso a otro tipo de desarrollo nace a partir del reconocimiento de las consecuencias del crecimiento económico tradicional sobre el ambiente, también, al advertir los límites existentes del ambiente, la preocupación sobre el aumento demográfico y la presión que éste genera sobre los recursos naturales. Es importante anotar que éste concepto es aceptado mundialmente a nivel político y es usado dentro de las discusiones de desarrollo.

El concepto de desarrollo sostenible planteado en Brundtland, dado la simplicidad del mismo, da lugar a distintas interpretaciones (Morán, 2000), y a la vez es cuestionado por el desafío que se ocasiona para alcanzar la operacionalidad y medición del mismo (visión de datos cuantificables), entre las interpretación y explicaciones que intentan darle mayor especificidad al concepto se encuentra a Jan Bojo, Karl-Goran Maler y Lena Unemo (1990) los cuales expresan el riesgo de que el desarrollo sostenible pueda ser entendido por la forma como fue planteada como “que todas las opciones fueran preservadas, lo que implicaría la preservación de todo género de recursos”.

Por lo tanto, en busca de la practicidad del concepto plantean la sostenibilidad a partir de la reserva de la totalidad de recursos disponibles en el tiempo, en donde, se disgregan los recursos en capital humano, físico reproductivo, ambientales y agotables, es decir, que puede haber una reducción en cualquiera de los recursos mientras pueda ser compensado los otros con inversiones que garanticen la misma disponibilidad de reservas para las generaciones futuras (Bojo, Maler, & Unemo, 1992).

Otra postura del desarrollo sostenible es la neomarxista, con una visión más social del desarrollo, la cual exhorta a la satisfacción de las necesidades de los pobres, criticando a los países en cuanto a la ejecución de políticas de sostenibilidad que no abarca fielmente el espíritu del reporte de Brundtland en cuanto a prestar atención a la satisfacción de las necesidades de los más pobres.

Entre los exponentes del neomarxismo se encuentra a M. R. Redclift (1987), el cual explica que para que el desarrollo sea sostenible es necesario que los pobres puedan satisfacer sus necesidades, no es suficiente abordar la sostenibilidad desde un enfoque estrictamente

ambiental, se requiere el desarrollo de lo social orientados por cambios profundos en el poder político.

La postura ante el desarrollo a partir de Brundtland, muestra una visión del desarrollo con un reconocimiento de la función social de los recursos. Continúa siendo una postura antropocentista, pero hay interés de que los recursos existentes perduren para el sostenimiento del desarrollo y la satisfacción de las necesidades humanas.

Por último, también se puede encontrar más recientemente, posiciones biocéntricas, en donde se plantea que es indispensable la conservación de los recursos naturales y la imposibilidad de un crecimiento ilimitado. En estas posturas se aborda la necesidad de pasar de una mentalidad consumista a una de reconocimiento de los límites de la naturaleza y la resiliencia de la misma.

Mientras que otros como Stanley Carpenter (1991), resalta el medio natural como el componente más significativo en el desarrollo sostenible y difiere con la conceptualización del informe de Brundtland, dada la imposibilidad según él, de un crecimiento permanente sin degradación de las condiciones ambientales, por otra parte, comenta sobre el riesgo que acarrea el crecimiento indefinido sobre la capacidad de autogeneración del medio (Autopoiesis), por lo anterior, el camino hacia la sostenibilidad según él, está dada por el cambio de la mentalidad consumista de la humanidad (Carpenter, 1991).

Otro autor que tiene esta misma corriente de pensamiento es Vandana Shiva, la cual plantea lo siguiente: *“La sostenibilidad en la naturaleza implica mantener la integridad de los procesos, ciclos y ritmos de la naturaleza”* (Shiva, 1992), por lo que apunta a que la sostenibilidad sea orientada a la conservación de la estabilidad de los recursos naturales reconociendo los límites establecidos por esta, en vez de ser basada en garantizar el crecimiento constante e indefinido por medio de la sustitución de recursos.

Y por último, posturas como la de Wolfgang Sachs, el cual es pesimista frente a que el desarrollo sostenible sea capaz de abordar los temas ambientales y los de justicia social; él lo ve como un intento de mantener la construcción de riquezas en un escenario irreal de desarrollo infinito e injusticias.

La crítica también las hace alrededor a qué tipo de necesidades deben ser las que se pretenden satisfacer diciendo:

*“...permanecen abiertas dos preguntas cruciales; ¿Cuáles necesidades? ¿Las necesidades de quién? Dejar estas preguntas pendientes en un mundo dividido significa hacer a un lado la crisis de la justicia. ¿"El desarrollo sostenible" supuestamente debe solucionar las necesidades de agua, tierra y seguridad económica, o las necesidades de viajes aéreos y depósitos de los bancos? ¿Se preocupa de las necesidades de supervivencia o las necesidades de lujo? ¿Son las necesidades en cuestión las de la clase de consumidores o aquellas de la enorme cantidad de desposeídos? El Informe Brundtland es indeciso en todo el texto, y en consecuencia evita enfrentar la crisis de la justicia.” (Sachs, 1996, p.23)*

Hay distintas visiones del desarrollo sostenible, todas basadas en distintas corrientes e interpretaciones de las necesidades globales, pero es claro que el desarrollo sostenible no puede ser abordado por una sola línea de pensamiento, esta debe ser capaz de tener en cuenta el componente social, económico y ambiental de forma inclusiva en el desarrollo territorial. En donde la gestión de los residuos se reconoce como un elemento importante para alcanzar la sostenibilidad.

#### **4.1.2. Gestión de Residuos Sólidos Ordinarios como estrategia de desarrollo.**

Son múltiples los compromisos ambientales que ha adquirido Colombia en el ámbito internacional que responden a intereses específicos de la Nación, unos de los compromisos adquiridos y que le apunta directamente al área de estudio de la investigación, es el de colocar al país acorde a los lineamientos de buenas prácticas establecidas por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos – OCDE- de la cual aspira hacer parte (ley 1479 del 2011).

La OCDE en el 2013 inicio formalmente el estudio de adhesión de Colombia, para esto realizó una evaluación del desempeño ambiental del país, dando como resultados un informe que resalta la incidencia del manejo de los residuos en la transición a una economía baja en carbono y eficiente en energía y recursos.

Producto del análisis ambiental de la OCDE, se realizaron las siguientes recomendaciones referentes a la gestión nacional de los residuos, haciendo hincapié en la necesidad de incentivar el aprovechamiento:

- *“Elaborar una estrategia nacional de largo plazo en materia de residuos para reorientar la política desde el control de la contaminación hacia un enfoque preventivo; articular una respuesta de política coherente para responder a retos fundamentales (como la insuficiente capacidad de los rellenos sanitarios, las bajas tasas de reciclaje y las necesidades de incorporación de los recolectores informales de residuos y de los planes comunitarios en los sistemas gestión de residuos municipales), así como proporcionar orientaciones para la definición de objetivos y planes de acción regionales y municipales.*
- *Promover un incremento de la inversión en infraestructura para aumentar la capacidad de tratamiento de los rellenos sanitarios en consonancia con la demanda prevista; hacer cumplir las normas ambientales referentes a los rellenos, y promover el manejo ambientalmente adecuado de los desechos.*
- *Aumentar los índices de reciclaje apoyando significativamente las actividades de educación y capacitación, extendiendo la recolección por separado, ampliando los programas de REP para que se incluya el tratamiento de los residuos de embalaje y reforzando los programas existentes.*
- *Reformar los instrumentos económicos con el fin de aumentar los incentivos para minimizar la generación de residuos y promover el reciclaje, e incrementar la recuperación de los costos de la infraestructura para el tratamiento de residuos, teniendo en cuenta las repercusiones de las alzas de los precios relacionados en los hogares pobres.” (OECD/ECLAC, 2014, p.157).*

Adicionalmente, uno de los principios fundamentales del estudio técnico de adhesión realizado por el Comité de Política Ambiental de la OCDE, menciona:

*“Asegurar que disminuya la generación de residuos, incluidos los peligrosos, que la exportación de residuos para su disposición definitiva se reduzca al mínimo y se ajuste a una gestión eficiente e inocua para el medio ambiente, y que se faciliten las instalaciones adecuadas para una gestión de residuos ambientalmente racional.” (OECD/ECLAC, 2014, p.55).*

Todo lo anterior muestra cómo organismos internacionales hacen un reconocimiento a la importancia de la gestión de los residuos sólidos de los países para el buen crecimiento económico, determinando de una u otra manera la influencia de estos aspectos en los componentes económico y social.

#### **4.1.3. Perspectiva en la gestión de residuos del distrito de Cartagena de indias.**

El Decreto 2981 de 2013, en su artículo 88 establece que:

*“Los municipios y distritos, deberán elaborar, implementar y mantener actualizado un plan municipal o distrital para la gestión integral de residuos o desechos sólidos en el ámbito local y/o regional según el caso, en el marco de la gestión integral de los residuos, el presente decreto y la metodología para la elaboración de los PGIRS”.*

Por lo que, la gestión de los residuos sólidos ordinarios de un territorio decae sobre el alcalde quien debe, diseñar y ejecutar lo que se trace como objetivo en el PGIRS.

El Distrito de Cartagena a partir de la expedición de la Resolución 1045 de 2003, donde se establece la metodología de formulación de los PGIRS (Derogada en el 2014), diseña su plan de gestión en el año 2007, el cual fue acogido mediante Resolución 981 de 26 de diciembre de 2007 y aprobado por CARDIQUE mediante Resolución 512 de 10 de junio de 2008.

El PGIRS del 2007 del Distrito de Cartagena de India se planteó como uno de sus objetivos el *“aumentar el aprovechamiento de los residuos”* (Alcaldía Distrital de Cartagena de Indias, 2007, pág. 15 Vol. III), y de acuerdo a un análisis económico y ambiental de alternativa determina que la *“Gestión integral y aprovechamiento de los residuos sólidos inorgánicos discriminados en la fuente, incluyendo Mecanismo de Desarrollo Limpio MDL”* era la alternativa más viable para el Distrito.

Al analizar los programas de ese objetivo de aprovechamiento, se pudo identificar que fueron orientados para fortalecer procesos formativos en la comunidad y algunos involucrados en la cadena de aprovechamiento, promover la separación en la fuente de la ciudadanía, y efectuar procesos de valorización de residuos de inorgánicos y orgánicos. Frente a los indicadores establecidos para medir el cumplimiento de las metas, por la forma en que fueron diseñados no reflejarían el avance de las estrategias planteadas.

En cuanto a la ejecución de los programas del PGIRS de 2007, la Contraloría Distrital de Cartagena (2013) manifestó que, los procesos de formación efectuados no suplen plenamente las necesidades de formación de la ciudadanía, no se evidencia procesos de creación y fortalecimiento de organizaciones que se dediquen a la actividad de aprovechamiento y en cuenta al objetivo de aprovechamiento planteo que *“No se evidencia en el Distrito, (...) estímulo a la adopción de procesos de aprovechamiento de residuos (...)”* .

Por lo anterior, es de inferir que a pesar que el PGIRS del 2007 cumplió con los requisitos de la Resolución 1045 de 2003, este no obtuvo los resultados esperados, dado que hubo escasa ejecución en los programas planteados como lo mostro el Informe Macro Ambiental 2013 del Distrito de Cartagena de Indias (Contraloría Distrital de Cartagena de Indias, 2013).

A partir de la expedición de la Resolución 0754 de 2014, “*Por la cual se adopta la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos*”, se plantea la necesidad de actualizar el PGIRS de Cartagena de Indias, siendo acogida por el Decreto 1736 de 28 de diciembre de 2015.

De la revisión efectuada al PGIRS 2015, se puede concluir que no hay un cumplimiento estricto del desarrollo metodológico establecido en la Resolución 0754 de 2014, por lo que, actividades fundamentales como la elaboración de caracterización físico química de los residuos sólidos en la fuente no se evidencia. En el documento solo se aporta, caracterización de residuos en el punto de disposición final, y no se aclara la fuente o método utilizado para calcular un aprovechamiento del 4,3% en el Distrito.

Al igual que la metodología de elaboración de PGIRS anterior, ésta establece el diseño de un programa de aprovechamiento. Al efectuar revisión del mismo se encuentra que, aun cuando el objetivo general de los mismos es: “*Generación de un esquema eficiente de recolección y aprovechamiento de los residuos sólidos en el Distrito*” (Alcaldía de Cartagena de Indias, 2015, pág. 295), y la Resolución 0754 establece realizar un estudio de viabilidad de alternativas de aprovechamiento, no hay estudios o soporte técnico que respalde las actividades nombradas en el “*Proyecto 2.2: Infraestructura para el aprovechamiento de los residuos recolectados*”, en donde se selecciona como opción tecnológica para el aprovechamiento una estación de clasificación y aprovechamiento de residuos (ECAS) (Alcaldía de Cartagena de Indias, 2015, pág. 296).

Por otra parte, como se muestra en la tabla 1, se entendería que el Distrito gozará de una infraestructura para el aprovechamiento de los residuos sólidos en el 2019, que le permitirá dar cumplimiento a la meta del 40% de aprovechamiento de los residuos generados.

Tabla 1 objetivos y metas del programa de aprovechamiento – PGIRS Cartagena 2015

Objetivos específicos	Metas intersectorial	Unidad de medida	Resultado línea base	META			Responsables
				Corto plazo	Medio plazo	Largo plazo	
Aumentar los índices de separación de residuos sólidos del Distrito de Cartagena	70% de los usuarios separando adecuadamente	0	0	En 2019 el 20% del Distrito realiza separación de los residuos adecuada.	En 2023 el 50% del Distrito realiza separación de los residuos adecuada.	En 2027 el 70% del Distrito realiza separación de los residuos adecuada.	Operador del relleno sanitario y alcaldía de Cartagena.
Implementar recolección y aprovechamiento diferenciado por corriente de residuos.	80% de los residuos aprovechados	0	0	En el 2019 el Distrito aprovecha el 40% de los residuos generados.	En el 2023 el Distrito aprovecha el 20% de los residuos generados.	En el 2027 el Distrito aprovecha el 20% de los residuos generados.	Operador del relleno sanitario y alcaldía de Cartagena.

Fuente: Alcaldía de Cartagena, 2015, Pag. 26

En conclusión, los PGIRS son una herramienta valiosa de planeación con la que cuentan los territorios para desarrollar sus potencialidades y prever inconvenientes en la gestión de los residuos sólidos. Este debe partir de un diagnóstico, el cual debe evidenciar la gestión existente de los entes territoriales y a partir de esto elaborar objetivos, metas, programas, proyectos, actividades y asignar recursos.

Cartagena en su PGIRS de 2015 evidencia una involución con respecto al del 2007, ya que no se muestra un diagnóstico con estudios técnicos que respalde las metas y propuesta de aprovechamiento planteada. Encontrándose a su vez, falta de estudios de viabilidad financiera que permitan la validación de la opción tecnológica seleccionada para efectuar el aprovechamiento en el Distrito.

#### 4.1.4. Técnicas de tratamiento y disposición final de residuos ordinarios.

Debido al cambio de paradigma en la forma de abordar los residuos, en donde se visionan los mismos como materiales susceptibles a ser introducidos en la economía como materia prima o energía, ha habido un desarrollo tecnológico que busca transformar los residuos sólidos de



forma técnica y económicamente viable, pero a la vez con una baja emisión de contaminantes al aire, suelo y agua. Esta viabilidad está influenciada de igual manera por los avances en la conciencia ambiental de los ciudadanos y de las políticas ambientales de los territorios.

La Unión Europea, con sus avances en protección ambiental, cada vez más restrictivos, ha desarrollado el concepto de Mejores Técnicas Disponibles –MTD<sup>1</sup> - (BAT, siglas en inglés), en donde identifican para los países europeos las técnicas o tecnologías comprobadas que poseen una baja emisión de contaminantes al aire, suelo, agua. En el sector de residuos, ha producido el documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles (BREF, siglas en inglés) titulado “*Sector del tratamiento de residuos*” y el de “*Incineración de Residuos*” elaborado por la Directiva de Prevención y Control Integrado de la Contaminación –IPPC-. Por otra parte, la Agencia de Protección Medio Ambiental Escocesa (SEPA, siglas en inglés), identificó las MTD para el compostaje de los residuos.

### ***Tratamiento Térmico de Residuos – Incineración***

La BREF desarrollada bajo la directiva de la IPPC y la directiva sobre emisiones industriales (IED, reconoce la incineración como la tecnología de tratamiento térmico más comúnmente usada, e identifica como objetivo de la misma:

*“el objetivo de la incineración de residuos, común a la mayoría de tratamientos de residuos, es tratar los residuos con el fin de reducir su volumen y peligrosidad, capturando (y por lo tanto concentrando) o destruyendo las sustancias potencialmente nocivas. Los procesos de incineración también pueden ofrecer un medio que permita la recuperación del contenido energético, mineral o químico de los residuos”.* (IPPC, 2006, p. i).

La BREF identifica dentro del sector de residuos subsectores de Incineración de residuos urbanos mixtos, en la cual se tratan residuos mezclados de origen domésticos y comercial y también a la incineración de residuos urbanos u otros residuos pretratados, siendo estas las

---

<sup>1</sup> Mejores Técnicas Disponibles, según la IPPC son aquellas tecnologías utilizadas en una instalación junto con la forma en que la instalación esté diseñada, construida, mantenida, explotada y paralizada, y siempre que sean las más eficaces para alcanzar un alto nivel de protección del medio ambiente en su conjunto y que puedan ser aplicadas en condiciones económica y técnicamente viables

instalación que tratan residuos productos de una recolección selectiva, pretratados o de la fracción de residuos no reciclables.

De igual forma, se efectúa dentro de la BREF de incineración de residuos una descripción detallada de los procesos y técnicas que se aplican en el sector de incineración de residuos, encontrándose las siguientes actividades:

- Recepción de residuos entrantes;
- Almacenamiento de residuos y materias primas;
- Pretratamiento de residuos (principalmente tratamientos in situ y operaciones de mezcla);
- Carga de residuos en el horno;
- Técnicas aplicadas en la etapa de tratamiento térmico (diseño del horno, etc.);
- Etapa de recuperación de energía (ej. caldera y opciones de suministro de energía);
- Técnicas de limpieza de gases de combustión (agrupadas por sustancias);
- Gestión de residuos de limpieza de gases de combustión;
- Monitorización y control de emisiones;
- Control y tratamiento de aguas residuales (ej. del sistema de drenaje de la instalación, tratamiento de gases de combustión, almacenamiento);
- Gestión y tratamiento de cenizas/cenizas de fondo (de la etapa de combustión).

### ***Tratamientos Biológicos de Residuos - Compostaje***

De acuerdo a la MTD para Compostaje (2015) de la SEPA, este es:

*“un proceso natural en el que los microorganismos descomponen la materia orgánica en presencia de aire para formar un producto parecido al humus. Este producto es el compost, que puede ser adecuado para su uso como un acondicionador del suelo. Compost de buena calidad es un suplemento orgánico demostrado que puede mejorar el rendimiento de los suelos de mala calidad mediante el suministro de nutrientes y humus. El humus es un complejo, estable, no celular, de larga duración que ocurre naturalmente encontrado material orgánico dentro de los suelos. Es beneficiosos en el suelo debido a sus propiedades de humedad y retención de nutrientes.” (p.3)*

Consecuente, las instalaciones de compostaje tratan residuos verdes y biorresiduos productos de una recolección selectiva o un que son separados previamente, evitando así la presencia de metales pesados u otros componentes inhibidores de los microorganismos involucrados en el proceso.

Dentro de MTD, se disgregan los procesos típicos de un proceso de compostaje, ya sea cerrado o abierto, estableciéndose recomendaciones y condiciones de calidad entre los procesos, los cuales son típicamente:

- Pre-aceptación y admisión de residuos
- Pre-procesamiento
- Higienización
- Estabilización
- Curado / maduración
- Postprocesamiento

### **Tratamiento Mecánico Biológico (TMB)**

Este término es utilizado para representar a las instalaciones de gestión de residuos que integran varios procesos, es decir, que demandan varias tecnologías de gestión de residuos, tales como instalaciones de recuperación de materiales (MRF, siglas en ingles), clasificación y compostaje o planta de digestión anaerobia, integrando puntualmente tecnologías de separación y de tratamiento biológico de residuos.

Debido a esto, las Plantas MBT pueden incorporar un número de diferentes procesos en una variedad de combinaciones o son diseñadas para responder a un propósito específico, con las dedicadas para la obtención de combustibles derivados de residuos (RDC).

La BREF de tratamiento de residuos de la IPPC, identifica las siguientes ventajas de estos sistemas:

- Reducción en los volúmenes de residuos.
- Reducción en el contenido de materia orgánica del residuo, que se envía para su eliminación final (vertedero o incineración).

- La segregación de los materiales para otros procesamientos (por ejemplo, la preparación de combustibles residuales sólidos).

## **4.2 Marco Normativo**

### **4.2.1. Política Colombiana de Aprovechamiento de Residuos Sólidos Ordinarios.**

La política nacional colombiana y la normatividad alrededor de los residuos es amplia y tendiente a regular la prestación del servicio público de Aseo (Ley 142 de 1994) y a establecer criterios técnicos constructivos para la gestión de residuos (Resolución 330 de 2017) e incluso dicta criterios generales de gestión relacionados con residuos no incluidos en la prestación del servicio público de Aseo, como es el caso de los residuos de construcción y demolición – RCD- (Resolución 541 de 1994), residuos peligrosos (Decreto 4741 de 2005, subsumido en el Decreto Único 1076 de 2015), residuos voluminosos (Resolución 1457 de 2010), entre otros.

Si bien se muestra una evolución en el marco regulatorio nacional, el cual ha buscado recientemente incluir aspectos que promuevan el aprovechamiento, aún no hay grandes incentivos que fomenten el aprovechamiento energético de los residuos con técnicas o tecnologías distintas a rellenos sanitario.

El Estado consolida su interés por fortalecer el sistema de aseo, a través de La ley 142 de 1994, en donde busca fomentar la participación privada, la financiación de soluciones de disposición final regional y la prestación del servicio en los municipios menores. Haciendo mayor esfuerzo en los servicios de transporte y recolección y en el fomento de rellenos sanitarios (Correal, 2014), sin mayor protagonismo en la generación de estrategias tendientes a la minimización y aprovechamiento.

Si se puntualiza en el decreto 2981 de 2013 (subsumido en el Decreto Único 1076 de 2015) que aplica al servicio público de aseo y a las personas prestadoras de residuos aprovechables y no aprovechables, es notorio que, a pesar de que el ciclo de los residuos es amplio e incluye la distribución, generación, importaciones y exportaciones, la legislación nacional solo contempla como parte del sistema público de aseo, la recolección, transporte, estaciones de transferencia, tratamiento, aprovechamiento y disposición final, en donde, la actividad de aprovechamiento, es definida como una:

*“actividad complementaria del servicio público de aseo que comprende la recolección de residuos aprovechables separados en la fuente por los usuarios, el transporte selectivo hasta la estación de clasificación y aprovechamiento o hasta la planta de aprovechamiento, así como su clasificación y pesaje.”* (Decreto 2981, 2013, Art. 2).

Es decir, que solo es regulada la recepción, la operación de la planta de aprovechamiento y disposición final, excluyéndose, la comercialización y distribución, por lo que estas se rigen por las exigencias del mercado.

Frente a la recomendación dada por la OCDE para la aceptación de Colombia como miembro de la organización, se trae a alusión lo siguiente:

*“Reformar los instrumentos económicos con el fin de aumentar los incentivos para minimizar la generación de residuos y promover el reciclaje, e incrementar la recuperación de los costos de la infraestructura para el tratamiento de residuos, teniendo en cuenta las repercusiones de las alzas de los precios relacionados en los hogares pobres.”* (OECD/ECLAC, 2014, pág. 157)

Se identifican esfuerzos que buscan la creación de incentivos, para el aprovechamiento de los residuos y la construcción de infraestructura, no obstante, se deben realizar ajustes al marco regulatoria, que permitan dar viabilidad a la introducción de tecnología distintas a rellenos sanitarios, para aumentar la viabilidad económica de las nuevas infraestructura, las cuales son más altas que la construcción de un relleno sanitario.

Por otra parte, la resolución CRA 720 de 2015, la cual establece el régimen de regulación tarifaria al que deben someterse las personas prestadoras del servicio público de aseo que atiendan en municipios de más de 5.000 suscriptores en áreas urbanas, determina en su artículo 31:

*“Podrán emplearse alternativas a la disposición final en relleno sanitario siempre y cuando éstas cuenten con los permisos y autorizaciones ambientales requeridas y el costo a trasladar a los usuarios en la tarifa no exceda el valor resultante de la suma del Costo de Disposición Final definido en el ARTICULO 28 y el Costo de Tratamiento de Lixiviados por escenario definido en el ARTICULO 32 por tonelada a pesos de*

*diciembre de 2014. Dichos costos corresponden a la disposición final y tratamiento de lixiviados del municipio y/o distrito donde se pretenda emplear la alternativa”.*

Es decir, que no se podrán generar costos adicionales en la tarifa por el mayor costo de tratamiento o disposición final que genere el uso de tecnologías distintas a rellenos sanitarios, por lo que no se tiene en cuenta el costo social y ambiental de los proyectos.

Por otra parte, la Ley 1753 de 2015 que expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 “Todos por un nuevo país”, tiene como objetivo promover el desarrollo del país en el marco del desarrollo sostenible, bajo el eslogan de "crecimiento verde", incluyéndose el aprovechamiento de los residuos sólidos ordinarios como estrategia de desarrollo. En donde, en su artículo 88 promueve la creación de incentivos:

*“...Créase un incentivo al aprovechamiento de residuos sólidos en aquellas entidades territoriales en cuyo Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) se hayan definido proyectos de aprovechamiento viables... los recursos provenientes del incentivo serán destinados a la actividad de aprovechamiento del servicio público de aseo para el desarrollo de infraestructura, separación en la fuente, recolección, transporte, recepción, pesaje, clasificación y otras formas de aprovechamiento... dichos recursos también se emplearán en la elaboración de estudios de prefactibilidad y factibilidad que permitan la implementación de formas alternativas de aprovechamiento de residuos, tales como el compostaje, el aprovechamiento energético y las plantas de tratamiento integral de residuos sólidos, entre otros.” (Ley 1753, 2015)*

Por lo planteado en el artículo 88, se evidencia el interés de impulsar el aprovechamiento de residuos sólidos en toda la cadena, permitiendo direccionar recursos económicos para estudios e infraestructura de plantas de aprovechamiento.

En cuanto a la Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos dada en el Conpes 3874 de 2016, se muestra un avance del país en la visión de los residuos, mirándose a los mismos como subproductos y no como desechos, visión que se materializa en su objetivo fundamental:

*“Implementar la gestión integral de residuos sólidos como política nacional de interés social, económico, ambiental y sanitario, para contribuir al fomento de la economía circular, desarrollo sostenible, adaptación y mitigación al cambio climático” (p. 46)*

Al analizar la política, es de notar que está no solo busca generar beneficios sociales y ambientales, sino que busca generar espacios en el que los residuos puedan ser parte del sistema productivo, buscando con esto cerrar el ciclo y encontrar también beneficios económicos.

Dentro de los ejes estratégicos de la política de gestión se encuentra *“la minimización de aquellos que van a sitios de disposición final”* y *“la promoción de la reutilización, aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos”* (Departamento Nacional de Planeación, 2016, pág. 3). El diagnóstico evidencia la necesidad de promover sistemas de tratamientos alternativos al relleno sanitario, por medio de la reglamentación de incentivos económicos:

*“El Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio reglamentará en el 2017 el incentivo al aprovechamiento creado en el PND 2014-2018, con el fin de reducir la proporción de residuos que van a los sitios de disposición final.”(p. 47)*

Y establece como meta en un periodo de 7 años:

*“que 30% de los residuos generados sean efectivamente aprovechados por personas prestadoras de la actividad de aprovechamiento (25% por organizaciones de recicladores formalizadas)”(p. 48)*

## 5. Metodología

### 5.1. Caracterización del Área de Estudio

#### 5.1.1. Caracterización del Distrito de Cartagena.

Cartagena de Indias, capital del Departamento de Bolívar fue fundada en el año 1533. Se encuentra localizada al norte de Colombia sobre el Mar Caribe en la costa Caribe colombiana, tu territorio está compuesto por un área insular y continental conformada a su vez por una serie de islas, penínsulas y cuerpos interiores de agua.

El año 1998 quedó constituida como Distrito, resultado del referendo celebrado el 27 de noviembre de dicho año, en donde el Distrito de Cartagena es el núcleo, con una superficie total de 709 km<sup>2</sup> y los municipios soporte de San Estanislao, Santa Catalina, Clemencia, Santa Rosa y Villanueva.

##### *5.1.1.1. Descripción demográfica.*

Según las proyección para el 2015 del Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE- Cartagena de Indias posee una población, estimada en 1.001.680, siendo la quinta ciudad más poblada de Colombia, en donde solo el 4%, de los habitantes se encuentran en el área rural, mientras que 96%, en el área urbana; situación que puede estar asociada a las pocas oportunidades creadas en el campo a pesar de que está constituido como Distrito.

Según las cifras presentadas por el DANE del censo 2005, la composición etnográfica de la ciudad está conformada por 48% Mestizos, 24,7% Blancos, 27% Afrodescendientes, 0,2% Indígenas y 0,1% Rom o Gitanos. En donde el 42,39% de la población urbana hace parte de estratos bajos, el 44,98% a estratos medios y el 12,63 % a estratos altos.

##### *5.1.1.2. División política administrativa.*

El territorio del Distrito de acuerdo a su división político administrativa, se encuentra dividido en tres localidades denominadas: Histórica y del Caribe Norte, la Virgen y Turística, y la Industrial de la Bahía, organizadas así según sus características comunes y de homogeneidad relativa. De igual forma, las localidades a su vez están conformadas por 15 unidades comuneras de gobierno y por corregimientos.



### ***5.1.1.3.Descripción económica.***

Actualmente el distrito de Cartagena tiene varios puntos de desarrollo económico, siendo, la industrial, el portuario (logístico) y turístico los focos principales:

- La zona industrial: Se localizan desde la Bahía de Cartagena hasta la zona de Mamonal, en donde la industria liviana se encuentra al este de la Bahía; la industria mediana se ubica bordeando hacia el sur las lomas de Albornoz; y la industria pesada, desde el extremo sur de estas lomas hasta el límite sur del perímetro urbano.
- Lo Portuario: Entre la Isla de Manga atravesando el sector del Bosque hasta el extremo sur de Mamonal.
- EL Turismo: El turismo colonial y de valoración del patrimonio histórico y arquitectónico se da en el Centro histórico, el barrio la Matuna y Getsemaní principalmente, mientras que, los lugares naturales más reconocidos para el turismo son los dotados de playas: Bocagrande, Tierra Bomba y Barú.

Por otra parte, la estructura empresarial por tamaño de la ciudad se caracteriza por estar conformada por 25.856 microempresas, 1.665 empresas pequeñas, 458 medianas y 154 grandes, las cuales se encuentran distribuidas en las siguientes actividades:

- Industrias manufactureras.
- Construcción.
- Comercio al por mayor y por menor.
- Reparación de vehículos automotores y motocicletas.
- Alojamientos y servicios de comida.
- Actividades artísticas, entretenimiento y recreación.

### ***5.1.1.4.Descripción ambiental.***

Cartagena de Indias se caracteriza por tener distintos cuerpos de aguas naturales dentro de su jurisdicción, que define la morfología general de su territorio, conformando un sistema hídrico intradistrital, en donde se encuentra, la Bahía de Cartagena, La Ciénaga de la Virgen, Ciénaga de Juan Polo y un sistema de caños y lagos internos, los cuales influencia de una u otra forma la dinámica del territorio.

Entre los ecosistemas, áreas de reserva, áreas de control y áreas de manejo especial de relevancia con el que cuenta el Distrito se encuentra:

- El sistema de manglar, las cuales corresponde a zonas de preservación o recuperación (Resolución 0694 de 2000).
- Un área de protección correspondiente al Parque Nacional Natural Los Corales del Rosario y de San Bernardo, en donde, están prohibidas actividades diferentes a la de conservación, investigación, recreación, cultura, recuperación y control, en especial la adjudicación de baldíos, además, está prohibida cualquier tipo de construcción sobre toda la extensión del parque.
- El Cerro de la Popa y las Lomas de Marion, lugares que por su topografía, ubicación y extensión constituyen factores determinantes de protección ambiental.
- Las lomas de Albornoz y Cospique, consideradas como zonas de aislamiento natural y necesario entre la ciudad y la zona industrial.
- La Ciénaga de Tesca (o de la Virgen), la Bahía de Cartagena, la Bahía de Barbacoas, los caños y lagos que circundan la ciudad y, en general, las zonas inundables que favorecen el desarrollo de la vegetación marina.
- Franja de Utilidad Pública al Este de la Ciénaga de La Virgen, en una longitud de 7 km y ancho de 2 km. zona destinada a obras relacionadas con la disposición de residuos, de acuerdo con el sistema de lagunas de oxidación propuesto y que nunca fue implementada.

Con respecto al componente abiótico, la geomorfología del Distrito, está representada por colinas, lomas, depósitos de vertiente de origen marino y fluvial en el litoral actual, encontrándose en la franja más baja de la costa topográfica.

Por otra parte, el territorio esta categorizado como “tierras sin bosques dedicadas a la agricultura y ganadería” según el IGAC, aunque se identifican parches de bosque secundario adyacente a cuerpos de agua, cuya vegetación predominante corresponde a distintas especies de manglar y la vegetación de zona aluviales a Campano, Matarratón, Roble, Ceiba, Hobo, Guayacán, Cañaguata, Barbasco, Cañafístula, Almacigo, Totumo, Manzanillo y Caracolí. En las zonas insulares, se encuentra vegetación más conservada con presencia de Manglar, Uvita de playa, el Clemón y la Verdolaga.

## **5.1.2. Caracterización de la Gestión de los Residuos Sólidos Ordinarios.**

### ***5.1.2.1. Barrido, recolección y transporte.***

A partir de Julio de 2006 hasta Junio de 2014 en Cartagena se asignó a dos compañía, por medio de licitación pública, los servicios de recolección y transporte de residuos sólidos ordinarios, esto bajo la figura de Área De Servicio Exclusivo (ASE), apoyándose en el artículo 40 de la Ley 142 de 1994 que establece que:

*“por motivos de interés social y con el propósito de que la cobertura de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado, saneamiento ambiental, (...) (...) la entidad o entidades territoriales componentes, podrán establecer mediante invitación pública, áreas de servicio exclusivas, en las cuales podrá acordarse que ninguna otra empresa de servicios públicos pueda ofrecer los mismos servicios en la misma área durante un tiempo determinado.”*

Se determinaron 3 ASEs, la cuales fueron asignadas dos a la empresa Promoambiental del Caribe S.A. E.S.P. (PACARIBE) y una a Aseo Urbano de la Costa S.A. E.S.P., donde solamente las empresas concesionarias podían prestar sus servicios, incluyendo los clientes industriales y comerciales.

A partir del mes de Julio de 2014, se cambia el esquema de prestación de servicio de ASE a uno de libre competencia en donde el Distrito ya no es el titular que presta los servicios, sino las empresas de servicios públicos son las prestadoras, diputándose entre sí los usuarios, esto en aras de que se preste un mejor servicio y tarifas. De igual forma, también se traslada el seguimiento y vigilancia de la prestación del servicio a la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

Según datos del Sistema Único de Información de Servicios públicos (SUI) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) reportados en el 2015 Aseo

Urbano de la Costa S.A. E.S.P. recolectó y dispuso 204.178,22 toneladas de residuos sólidos mezclados<sup>2</sup>, y PACARIBE S.A. E.S.P. 200.939,8 toneladas<sup>3</sup>.

La frecuencia de recolección mínima establecida por el distrito de Cartagena es de tres (3) veces por semana, habiendo recolección diaria en las zonas de interés turística.

#### ***5.1.2.2. Aprovechamiento y disposición final.***

Al efectuar una revisión de la línea base del programa de aprovechamiento del PGIRS del Distrito de Cartagena del año 2015, no hay claridad sobre las cifras de aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios, dado que se referencia 2 datos en diferentes partes del estudio, siendo 4,7% (Alcaldía Distrital de Cartagena de Indias, 2015, pág. 300) y 5,28% (Alcaldía Distrital de Cartagena de Indias, 2015, pág. 302). Lo cierto es que esta cifra se encuentra por debajo de promedio nacional de 15% (DNP, 2014, pág. 300).

De igual forma, hay una variación significativa entre los datos de composición física de los residuos del PGIRS 2007 y del 2015. Identificándose en el 2007 un 77,6% de residuos orgánicos fermentables y un 22,4 de residuos orgánicos no fermentables, muy alejado del 24,6% y el 75,4% obtenidos en el 2015 (Ver Tabla 2). Cabe anotar que la caracterización física efectuada en el año 2007 fue efectuada con muestras obtenidas directamente del generador, mientras que en el 2015, se referencia una caracterización suministrada por el actual operador del relleno sanitario, Caribe Verde S.A. E.S.P.

Al ser caracterizado los residuos en el punto de disposición final, se supondría una reducción en el porcentaje real de generación de los materiales aprovechables con mercado, como el plástico, vidrio, papel y cartón, por haber extracción de estos materiales. Al no haber en la ciudad un aprovechamiento de la fracción orgánica fermentable (residuos orgánicos), no se identifica justificación para una reducción en la producción del orgánicos entre el año 2007 y 2015.

---

<sup>2</sup> Entiéndase por residuos mezclados aquellos residuos ordinarios de origen domiciliario, comercial, institucional o industrial que no han sufrido un proceso de separación en la fuente.

<sup>3</sup> Este dato fue extraído del Reporte de Disposición final del SUI, dado que el reporte de Promoambiental del Caribe S.A. E.S.P. se encuentra relacionado desde el enero hasta julio de 2015.

Tabla 2 Composición física de los residuos sólidos ordinarios del Distrito de Cartagena de Indias

Material		Caracterización 2007 <sup>a</sup> (%)	Caracterización 2015 <sup>b</sup> (%)
<b>Orgánicos</b>		77,6	24,60
<b>Papel</b>		3,1	11,19
<b>Cartón</b>		2,6	12,77
<b>Plástico</b>	<b>Alta densidad</b>	7,7	9,53
	<b>Baja densidad</b>		11,61
<b>Caucho y cuero</b>		0,9	0,12
<b>Textiles</b>		1,6	4,72
<b>Madera</b>		1	4,31
<b>Metales</b>	<b>Cobre</b>	1	0,10
	<b>Hierro</b>		2,18
	<b>Aluminio</b>		3,97
	<b>Bronce</b>		0
	<b>Níquel</b>		0
	<b>Plomo</b>		0
	<b>Mercurio</b>		0
	<b>Cadmio</b>		0
<b>Vidrio</b>		4,2	6,87
<b>Productos cerámicos, ceniza, rocas y escombros</b>		-	6,21
<b>Huesos</b>		0	0
<b>Otros</b>		0,3	1,72
<b>TOTAL</b>		100	100

<sup>a</sup> Los resultados corresponden a muestras de residuos sólidos tomadas en la fuente (generadores). Tomado de PGIRS de Cartagena de Indias 2007,

<sup>b</sup> Los resultados corresponden a caracterización física de residuos efectuada por Caribe Verde S.A. E.S.P. en el punto de disposición final. En el PGIRS de Cartagena de Indias 2015 no se aclara fecha de elaboración.

**Fuente:** Alcaldía Distrital de Cartagena de Indias. (2007); Alcaldía Distrital de Cartagena de Indias. (2015)

En cuanto a la infraestructura que soporta la actividad de aprovechamiento se encuentra que, la ciudad tiene una total de 154 establecimientos entre bodegas y centro de acopios, en donde se desarrollan estas actividades; no se cuenta con planta de aprovechamiento de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), no hay rutas selectivas, por lo que la actividad de selección, recolección y transporte de los aprovechables se viene dando de forma manual por una población de recicladores de oficio<sup>4</sup> de 1.931 (Alcaldía Distrital de Cartagena de Indias, 2015, pág. 300).

<sup>4</sup> Según el Decreto 2981 de 2013, un Reciclador de oficio es la persona natural o jurídica que se ha organizado de acuerdo con lo definido en el artículo 15 de la Ley 142 de 1994 y en este Decreto para prestar la actividad de aprovechamiento de residuos sólidos.

Referente a la disposición final, el Distrito de Cartagena cuenta con un relleno sanitario que actualmente es regional, éste fue dado en concesión a la empresa Caribe Verde S.A. E.S.P. por un periodo de 20 años a partir del año 2005, asignando un lote para la construcción del mismo en el Municipio de Turbana Bolívar. El relleno sanitario cuenta con licencia ambiental otorgada por la Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (CARDIQUE) mediante resolución N° 0484 del 08 de julio de 2005 y la N° 229 de 18 de marzo de 2005.

Según las consideraciones de diseño del este relleno sanitario, éste posee una vida útil de 20 años bajo el supuesto de una compactación promedio de los residuos de  $800 \text{ Kg/m}^3$  y el cumplimiento de unas metas de aprovechamiento (que obedecían a la PGIRS del 2007), es decir, se diseñó considerándose un incremento paulatino del porcentaje de aprovechamiento de los residuos hasta alcanzar una reducción en recepción del 50% a partir del año 12 de operación (Caribe Verde S.A. E.S.P., 2005, pág. 54), dando según proyecciones una vida útil de 20 años.

Por lo anterior, es posible suponer que si no hay cambios en los diseños de los módulos de disposición y aumentos en la compactación de los residuos es probable que no se alcance la vida útil deseada.

Por otra parte, según los datos históricos de residuos dispuestos de la empresa Caribe Verde S.A. E.S.P., el incremento anual de los residuos dispuestos en el relleno sanitario es superior a lo proyectado (2%), siendo en promedio del 5%, pasando de recibir en promedio 736,26 Toneladas al día en el 2006 a 1.183 toneladas al día en el 2015 (SSPD, 2016).

Cabe anotar que en el relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos, se han efectuado mejoras en la operación, que permitirían presumir un aumento en la capacidad del mismo, aun así, al no efectuarse el desvío de residuos proyectado o realizarse un rediseño del relleno sanitario, habría un riesgo de que la vida útil se reduzca, a 14 años según la “*Memoria Técnica con los Cálculos del Diseño, Construcción y Operación*” presentada por el Operador en la licitación pública de concesión del relleno sanitario.

### **5.1.3. Descripción del Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos.**

Según el Reglamento Técnico Operativo del Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma de Los Cocos (2013), se dispondrán los residuos sólidos ordinarios en un área de 41,47 hectáreas, en donde según cálculos iniciales de diseño se dará la disposición final de aproximadamente 9.556.020 m<sup>3</sup> de residuos en un periodo de 20 años<sup>5</sup>.

Como se había mencionado en el anterior numeral, el relleno sanitario ha sufrido mejoras operativas, que se deben considerar a la hora de definir la vida útil real o volumen de residuos ordinarios que sería capaz de recibir, entre las mejoras se encuentra el sistema de extracción activa de biogás y una obtención de densidades de compactación superior a las de diseño.

En cuanto al sistema de extracción de biogás, este se realizó bajo el esquema de un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), Caribe Verde S.A. E.S.P. en conjunto con la empresa Carbon BW Colombia, implementó un sistema de captura y quema de biogás en el relleno sanitario.

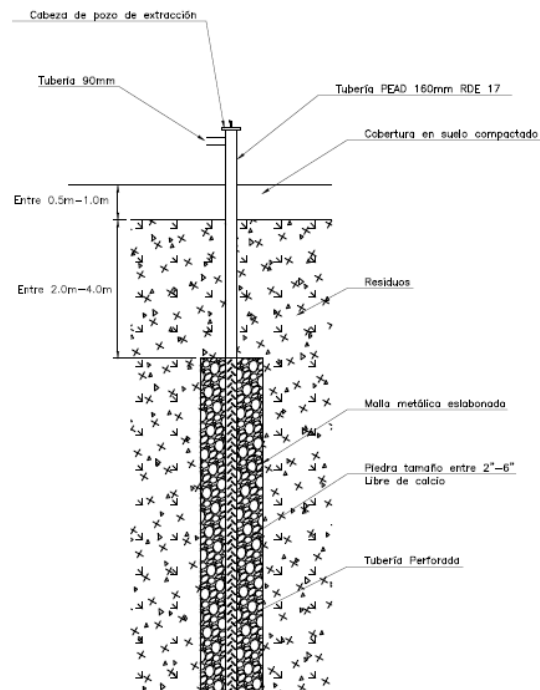
El sistema de captura o extracción se basa en la interconexión entre pozos verticales perforados en la masa de residuos y chimeneas de venteo de biogás, las cuales fueron rediseñadas, cambiando materiales constructivos (tubería y canto rodado) y distancia entre las mismas.

La red de tuberías se encuentra conectada a una tubería principal de mayor tamaño, que por medio de un soplante o blower, extrae de manera activa o desgasifica el relleno sanitario (Carbon BW Colombia S.A.S., 2011).

---

<sup>5</sup> Este dato fue calculado con una compactación de 800 kg/m<sup>3</sup> y se alcanza el periodo de 20 años, siempre que se cumplan con los porcentajes de aprovechamiento establecidos.

**Figura 1** Esquema de pozo de extracción de biogás



**Fuente:** Carbon BW Colombia S.A.S., 2011

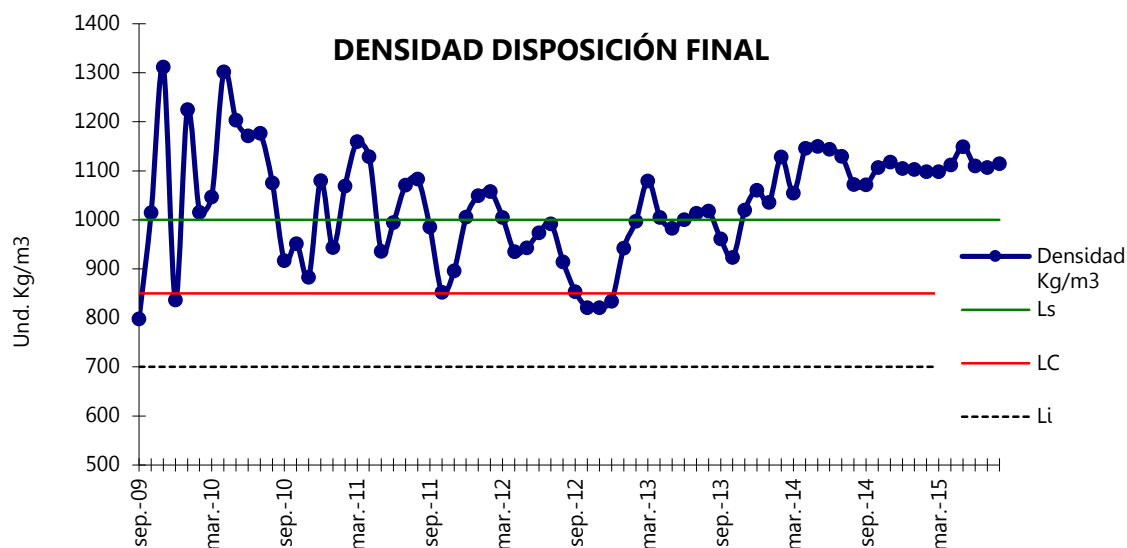
Entre los beneficios que trajo consigo el proyecto al relleno sanitario se resalta que al desgasificar el relleno sanitario se aumentó la estabilidad de la masa de residuos y los asentamientos, ayudando así a incrementar la compactación de la masa de residuos, esto sin mencionar los beneficios ambientales asociados a la reducción en emisión de metano.

Con referente a las densidades obtenidas, según muestra en la figura 2, la operación del relleno ha permitido obtener densidades en promedio de  $1037 \text{ Kg/m}^3$ <sup>6</sup> (Caribe Verde S.A. E.S.P., 2015), estando por encima de los  $800 \text{ Kg/m}^3$  de diseño. Esto se podría asociar al uso permanente de equipo pesado (Buldócer y Compactador de residuos) en la conformación de la celda, y a la vez muestra una buena operación del Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma De Los Cocos.

<sup>6</sup> Este dato corresponde al promedio de densidades entre septiembre de 2009 y diciembre de 2015.



Figura 2 Grafica de histórico de densidades del relleno sanitario Parque Ambiental Loma De Los Cocos



Nota: Ls y Li, corresponde a límite superior e inferior respectivamente, establecido en el reglamento técnico operativo del relleno sanitario, como límites admisibles.

Fuente: Caribe Verde S.A. E.S.P., 2015

Caribe Verde S.A. E.S.P., cuenta con dos sedes de trabajo, una correspondiente al área operativa, ubicada en el Relleno Sanitario y la otra correspondiente al área administrativa, ubicada en Cartagena de Indias.

La compañía, para la operación del relleno sanitario, cuenta con un total de 53 empleados, de los cuales seis (6) se encuentra en la sede administrativa y el resto en el relleno sanitario.

#### 5.1.3.1. Detalles constructivos y operativos del Relleno Sanitario.

El área de disposición final de residuos ordinarios se encuentra diseñada por módulos de disposición, en los cuales se les realiza las siguientes actividades iniciales, correspondientes a actividades u obras de adecuación:

- a. Adecuación del terreno: Definición de planimetría y altimetría según diseño y colocación de capa de arcilla compactada (primera capa impermeabilizante).
- b. Instalación de geomembrana: segunda capa impermeabilizante.
- c. Construcción de filtros colectores de lixiviado.

- d. Extendido de arena; para protección de geomembrana.
- e. Construcción de canales perimetrales.
- f. Construcción de chimeneas para venteo y/o extracción de biogás.

En cuanto a la operación en sí de los módulos de disposición, ésta inicia en la báscula en donde se identifican y registran los vehículos que ingresan con residuos ordinarios al relleno sanitario, los desechos son descargados y extendidos en las celdas, las cuales tienen un ancho o frente de trabajo entre 15 y 36 m y una longitud variable, según la cantidad de residuos que ingresen al relleno.

Posteriormente, los residuos son disgregados y compactados en capas delgadas entre 40 y 50 cm, hasta alcanzar una altura aproximada de 3.85 m, al tener la altura es colocada una capa de material de cobertura de 0,15 m como mínimo, para facilitar la operación se cubre con material sintético los residuos sólidos en las celdas o áreas donde no se haya cumplido con el 100% del llenado. Al momento de continuar con la operación dicho material sintético es retirado.

El método que se utiliza para la construcción del relleno sanitario es la combinación de los métodos de “áreas” y “rampa”, por lo que, las celdas son construidas una sobre otra creando una especie de colina y a la vez se acuestan sobre ladera.

Las celdas de disposición al alcanzar la altura de 3.85 metros son cubiertas, con material arcilloso, extraído de áreas de préstamos del propio predios, esta área normalmente corresponden a áreas de adecuación para el siguiente módulo de disposición.

El sistema empleado para la captación de lixiviados es el de espina de pescado que consiste en inclinar la base del relleno sanitario con pendientes entre el 2% y 3%, con el propósito de que el lixiviado fluya hacia los drenes de colección (red secundaria), que a su vez lo conducen hacia los canales de colección (red principal) que llevan al lixiviado con pendientes mayores del 2% hacia una tubería ciega para transportarlo al Pondaje (piscinas de almacenamiento de lixiviado) para ser posteriormente recirculado hacia la masa de residuos dispuestos, en donde, por medio de la radiación es evaporado una parte del lixiviado y otra parte se infiltra nuevamente a la masa, no realizándose vertimientos.

Para evacuar los gases que se generan por la descomposición de la fracción orgánica de los residuos dispuestos, se utilizan chimeneas de venteo pasivo y un sistema de extracción activa de biogás. Las chimeneas son construidas en su base con listones de madera, malla eslabonada, tubería de polietileno de alta densidad (PEAD) de 6" o 8" y canto rodado. El avance del mismo aumenta de acuerdo a la altura de los residuos dispuestos, esto hasta alcanzar la cota final del relleno.

Para el control del agua de escorrentía, se constituyen canales temporales sobre terreno natural en el perímetro de la masa de residuos dispuesta.

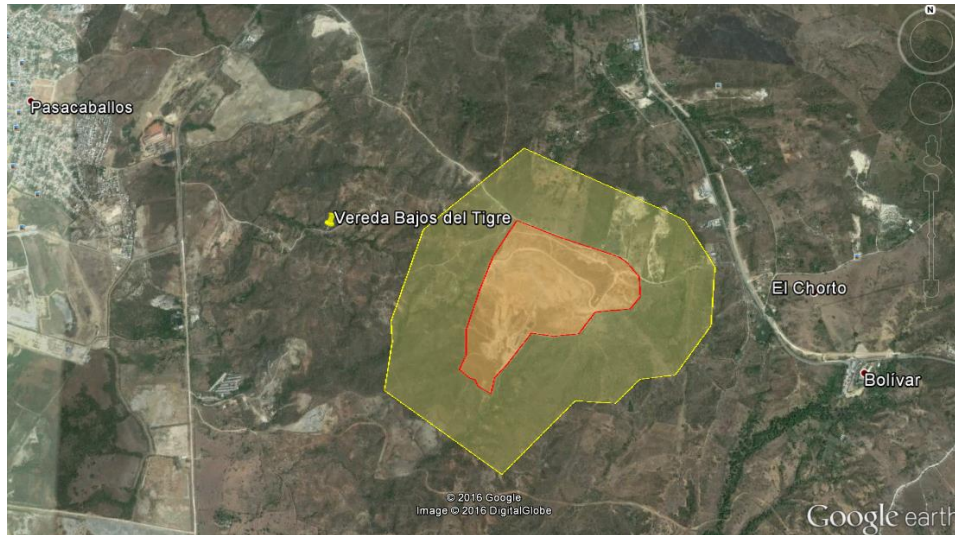
Los equipos y maquinaria utilizada para la operación del relleno sanitario habituales son:

- Tres (3) buldócer y un Compactador de Residuos.
- Tres (3) volquetas con 12 m<sup>3</sup> de capacidad.
- Dos (2) Retroexcavadora.
- Herramientas menores: Carretillas, palas, rastrillos, picos, etc.
- Motobombas.
- Guadañadora.
- Motoniveladora.
- Vibrocompactador.
- Carro-tanque.
- Equipo de termofusión.

En cuanto a los controles ambientales, el relleno sanitario se encuentra instrumentado con tres (3) piezómetros en la masa de residuos, 2 pozos de agua subterránea y equipo topográfico para controlar asentamientos y desplazamientos de la masa dispuesta de residuos. Por otra parte, efectúa monitoreos ambientales correspondientes a calidad de lixiviado, calidad de aire (partículas suspendidas totales), caracterización de biogás (concentración de dióxido de carbono, metano, oxígeno, ácido sulfhídrico y explosividad), caracterización de agua subterránea y de cuerpos de agua superficial (CARDIQUE, 2005).

### 5.1.3.2. Descripción social del Área de Influencia.

El relleno sanitario se encuentra ubicado en el municipio de Turbana Bolívar, de acuerdo a la Resolución 0229 de 2005, por la cual se otorga licencia ambiental para el proyecto de relleno sanitario, el área de influencia directa del proyecto identificada corresponde a un polígono de 500 metros circundante al predio, no habiendo población asentada en esta zona (Ver Figura 3).



**Figura 3 Área de influencia directa del Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma De Los Cocos**

A pesar de no ser identificada población en el polígono del área de influencia del proyecto, hay tres veredas cercanas a aproximadamente 1,5 kilómetros de distancia, respectivamente, y 3 fincas circunvecinas con sus cuidadores.

Según la caracterización socio-económica de las veredas efectuada por Caribe Verde S.A. E.S.P. en el 2015, estas poseen las siguientes características:

- La vereda Bajos del Tigre, de jurisdicción del corregimiento de Pasacaballos (corregimiento de Cartagena de Indias), la cual corresponde a un asentamiento constituido por un grupo de parceleros provenientes de diferentes zonas de la Costa Caribe. Los pobladores se caracterizan por habitar en viviendas construidas en su mayoría en madera, cuentan con agua cruda y energía eléctrica suministrada

respectivamente por Aguas de Cartagena S.A. E.S.P., y Electricaribe S.A. E.S.P., careciendo de los servicios públicos de alcantarillado, gas domiciliario y telefonía fija. Se reporta en esta vereda una población de 124 habitantes entre niños y adultos. Esta población muestra un nivel de escolaridad bajo, en donde tan solo el 11% de los habitantes, tiene un nivel educativo superior a la media.

- La vereda La Legua, se localiza bajo la jurisdicción del municipio de Turbana – Bolívar. En esta vereda el 52% de los pobladores habitan en casas, seguido del 36% en viviendas tipo parcela y un 6% en fincas. Esta población no cuenta con suministro de agua potable, alcantarillado, ni gas natural domiciliario, solo contando con el servicio de energía eléctrica suministrado por la empresa Electricaribe S.A. E.S.P.

Se registra en la caracterización efectuada por la empresa operadora una población de 138 habitantes entre niños y adultos, mostrando un nivel de escolaridad bajo, en donde tan solo el 23% de los habitantes, tiene un nivel educativo superior a la media.

- La vereda el Chorro, localizada en jurisdicción de Turbana – Bolívar, al igual que la vereda La Legua. En esta vereda la población habita un 43% en parcelas, el 29% casas y el 25% en fincas. El 57% de las viviendas en esta vereda se encuentra sin terminar, y el 54% de los habitantes encuestados por Caribe Verde S.A. E.SP. (2015) considera que su vivienda se encuentra en condiciones regulares de habitabilidad, ya que sus materiales de construcción no son los adecuados para una vivienda digna.

En cuanto a servicios públicos, este asentamiento carece de servicios públicos, salvo el servicio de energía eléctrica que es suministrado por la empresa Electricaribe S.A. E.S.P. Se reporta en esta vereda una población de 98 habitantes entre niños y adultos, los cuales poseen un nivel de escolaridad baja, solo el 30% de la población supera la formación media.

## **5.2.Periodo de Ejecución**

El período de evaluación de este estudio se ejecuta desde el año 2005 hasta 2025, periodo comprendido entre el inicio de la operación el relleno sanitario parque Ambiental loma de los Cocos y año en el que se da por terminada la licencia ambiental dada CARDIQUE en la Resolución 0229 de 2005.

Las proyecciones de producción percapita de residuos, corresponde al análisis de tendencia de los residuos dispuestos entre los años 2005 y 2015, haciéndose una proyección hasta el 2025.

Estimaciones como proyecciones de producción de lixiviado y biogás se extendió el periodo hasta el 2035, teniendo en cuenta un tiempo de eversuria de 15 años.

La cuantificación de costos y beneficios se realizó para el periodo de 2016 y 2025, suponiendo una entrada de operación de los posibles sistemas (escenarios) en el año 2016.

### **5.3.Procedimiento de Análisis**

Para alcanzar el objetivo trazado se tomó como guía *La Metodología General Para La Presentación De Estudios Ambientales* desarrollada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (hoy llamado Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS-), puntualmente las directrices para la elaboración de una evaluación económica de impactos ambientales por medio del métodos Análisis costo beneficio, esto con el fin de determinar los costos ambientales por la introducción de sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios en el Distrito de Cartagena de Indias.

Todo el análisis técnico ambiental realizado, se empleó para la determinación y establecimiento de costos del flujo de beneficios ambientales de los escenarios diseñados.

Los pasos a seguidos para la obtención de los objetivos fueron:

#### **5.3.1. Identificación de las condiciones técnicas y ambientales actuales del Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma De Los Cocos.**

La verificación de las condiciones técnicas se realizó mediante una revisión de cumplimiento de condiciones operativas y ambientales del relleno sanitario Parque ambiental Loma de los Cocos, para esto:

- I. Se diseñó y aplicó una lista de chequeo basada en los lineamientos de construcción, operación y mantenimiento dados en el título F numeral 6 del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS- versión 2000. (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2012).

- II. Se realizó una identificación de los impactos ambientales relevantes de la operación del relleno sanitario, para esto, se analizaron los indicadores ambientales, analizándose calidad de lixiviado, calidad de aire, biogás, agua superficial y agua subterránea. Por último, se procedió a analizar la variación en el tiempo de los mismos y los posibles impactos ambientales de la operación.
- III. Se proyectó el crecimiento del relleno sanitario para el año 2025 (año en que se culmina su vida útil) de forma matemática, identificando la demanda en terreno, estableciéndose la vida útil real del mismo. Para esto se utilizó la tasa de crecimiento poblacional, los planos de llenado, los diseños de los módulos de disposición final, las densidades históricas obtenidas en las celdas de disposición y la relación de los residuos dispuestos en el relleno sanitario, con estos datos se efectuó la estimación de la capacidad volumétrica remanente del relleno sanitario y el año estimado de cierre. (Tchobanoglous, 1994)

### **5.3.2. Diseño de escenarios de aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios.**

Se diseñaron tres (3) escenarios de alternativas de tratamiento de residuos sólidos ordinarios, para esto se realizó una revisión bibliografía, empleándose información secundarias para el establecimiento de índices.

La selección de los escenario se sustentó en el “*Estudio de técnicas alternativas de tratamiento, disposición final y/o aprovechamiento de residuos sólidos - propuesta de ajuste decreto 838 de 2005*” realizado por MAG CONSULTORIA & DNV.GL (2016) para el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), en donde se determina los tratamientos de residuos sólidos potencialmente viables en Colombia, tales como, tratamientos térmicos, biológicos y biomecánicos.

Los escenarios correspondieron a un sistema tratamiento térmico por medio de incineración (escenario I), un sistema de tratamiento biológico por medio de compostaje (escenario II), y un sistema de tratamiento mecánico y biológico correspondiente a una planta de separación mecanizada complementada con la técnica de compostaje (escenario III).

A cada tecnología elegida se le realizó una descripción general de su funcionamiento, se detalló área de terreno que demanda cada tecnología, tipo de material a aprovechar, demandas de recursos y desechos, es decir, entradas, procesamiento y salidas del sistema.

Para el análisis ambiental de las tecnologías se consideraran tres variables:

- I. Extensión de vida útil del relleno sanitario, este se proyectó teniendo en cuenta el porcentaje de residuos no procesados y el rechazo de los sistemas de tratamiento analizados, estimándose la extensión de la vida útil del relleno sanitario en capacidad volumétrica y en años.
- II. Emisiones de gases de efecto invernadero, determinación de las toneladas de dióxido de carbono equivalente ( $CO_{2eq}$ ) para cada escenario y el relleno sanitario sin aprovechamiento, por medio del uso del Modelo Colombiano de Biogás Versión 1.0 desarrollado por el US EPA.
- III. Calculo de la generación de lixiviado, se simuló la generación de lixiviado a partir del año 2005 hasta la fecha de cierre según licencia ambiental (2025). Para esto se empleó el modelo CORENOSTÓS (Echeverry & Collazos, 2017), el cual para los cálculos tienen en cuenta la biodegradación de los residuos dispuestos en el tiempo, consumo de agua en la generación de gases, composición de los residuos dispuestos, precipitaciones, material de cobertura del relleno sanitario, entre otras variables.

### **5.3.3. Análisis costo beneficio.**

Se empleó la herramienta de evaluación económica Análisis Costo Beneficio (ACB), Para la determinación de la viabilidad económica ambiental de las alternativas de aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios. Para esto:

- I. Se realizó un análisis de costos, con estimaciones a nivel de pre-factibilidad empleando datos de información secundaria obtenidos del estudio: “Estudio de técnicas alternativas de tratamiento, disposición final y/o aprovechamiento de residuos sólidos - propuesta de ajuste decreto 838 de 2005” realizado por MAG CONSULTORIA – DNV.GL. (2016).



Por lo anterior se realizó un flujo de fondos financiero para cada tecnología, estableciéndose una serie de consideraciones y relacionándose ingresos por comercialización de subproductos y tarifa.

- II. En la evaluación económica y ambiental de cada escenario de tratamiento, se consideró el flujo de costos y beneficios ambientales, para esto se tuvo como referente la “*Estructura de beneficios y costos en el ABC*” de la Metodología general para la presentación de estudios ambientales (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010, pág. 26) y las proyecciones realizadas de las variables ambientales de los escenarios.
- III. Relación Beneficio / costos, se realiza una comparación del Valor Presente Neto (VPN) de beneficios y costos de cada escenario, determinando la alternativa que da mayores beneficios a la población influenciada por la gestión de los residuos en el relleno sanitario Parque Ambiental loma de los cocos.

Para la obtención del resultado se emplea la metodología planteada en el manual “Metodología general para la presentación de estudios ambientales” (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

De forma inicial, se realizó un análisis de costos, con estimaciones a nivel de pre-factibilidad empleando datos de información secundaria obtenidos del estudio: “Estudio de técnicas alternativas de tratamiento, disposición final y/o aprovechamiento de residuos sólidos - propuesta de ajuste decreto 838 de 2005” realizado por MAG CONSULTORIA – DNV.GL. (2016).

De igual forma, se realiza una estimación económica de los beneficios ambientales, siendo estimados con valores directos de mercados existentes y de acuerdo a la generación o reducción de impactos en cada uno en los escenarios de aprovechamiento.

Por último, se procedió a realizar el Análisis de los costos y beneficios ambientales directos de las alternativas de aprovechamiento y/o tratamiento por incineración, compostaje o planta de separación mecanizada con aprovechamiento de orgánicos, considerándose los impactos ambientales positivos sobre el relleno sanitario Parque Ambiental Loma De Los Cocos.



## **6. Resultados y Discusión**

En el presente numeral, se relacionan los resultados obtenidos de todo el análisis ambiental y económico realizado, para determinar el escenario de aprovechamiento que podría ser más conveniente para una ciudad como Cartagena de Indias teniendo en cuenta los beneficios ambientales intrínsecos a cada opción tecnológica y los impactos ambientales que se evitarían.

### **6.1. Condiciones Técnicas y Ambientales Actuales del Relleno Sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos**

#### **6.1.1. Cumplimiento de requisitos técnicos y operativos del Relleno Sanitario**

Colombia con el objeto de normalizar la prestación del servicio de aseo, estableció un Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), este se encuentra conformado por dos partes, una correspondiente a la Resolución 1096 de 2000, en la que se consignan criterios de carácter obligatorio extraídos de la versión del año 2000 del RAS; y la otra parte, corresponde a manuales (llamados Títulos) de buenas prácticas de ingeniería.

A pesar de que la versión más reciente del RAS corresponde al año 2012, se efectúa el análisis técnico del Relleno Sanitario Parque ambiental Loma de los Cocos, teniendo en cuenta la versión del año 2000, dado que a fecha de elaboración de la presente investigación, no ha sido reglamentado el RAS 2012.

El Título F corresponde al manual que contiene los criterios básicos y requisitos mínimos que se deben seguir en el diseño, construcción, supervisión técnica, puesta en marcha, operación y mantenimiento de los sistemas de aseo urbano, del cual hace parte el servicio de disposición final de residuos ordinarios. De este Título fueron evaluados los aspectos correspondientes a los numerales F.6.4 de parámetros de diseño, el F.6.5. de control ambiental y el F6.6. de operación de relleno sanitario.

Para el análisis de los aspectos mencionados se diseñó y aplicó una lista de chequeo (Ver Anexo 1), la cual fue diligenciada a partir de la revisión del Reglamento Técnico Operativo del relleno sanitario, las memorias de diseños presentada en la Propuesta Técnica por Caribe Verde S.A. E.S.P. en la licitación pública, licencia ambiental, plan de manejo ambiental, plan

de monitoreo ambiental y plan de clausura. Para la verificación de los criterios operacionales y del relleno, se efectuó entrevista al Director Técnico Operativo del relleno sanitario.

Los resultados generales de cumplimiento del relleno sanitario al Título F numeral 6, a lo que respecta al cumplimiento de requisitos para sistemas de disposición final de alta complejidad<sup>7</sup>, es de un 82% con respecto a un total de 125 aspectos evaluados, permitiendo determinar que el relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos, tiene un alto cumplimiento de los requisitos del RAS 2000 y por ende de la Resolución 1096 de 2000.

Cabe anotar que a pesar de un aparente alto cumplimiento, hay aspectos o procedimientos no efectuados actualmente por el operador del relleno sanitario que pueden representar riesgos en la estabilidad a largo plazo del mismo, como lo es, el cambio en el llenado, habiendo una omisión de las recomendaciones técnicas establecidas por el propio operador de manera inicial, en cuanto a la construcción de bermas y construcción de red de canales sobre la masa de residuos (Caribe Verde S.A. E.S.P., 2005, pág. 19).

#### ***6.1.1.1. Cumplimiento de los parámetros de diseño***

Los aspectos de diseño verificados correspondieron a 79 requisitos que se identifican como obligaciones del numeral F.6.4. De acuerdo a la lista de verificación aplicada se obtuvo que hay un cumplimiento del 78,5% por parte del relleno sanitario, destacándose que:

- El método seleccionado de construcción es acorde a la topografía del terreno, efectuándose un aprovechamiento de los materiales producto de los cortes en nivelación del módulo (llenado de áreas a cota de diseño) y en la realización de la cobertura de los residuos.

Se resalta que de acuerdo a los estudios de suelo, hay predominancia de arcilla en el predio, con presencia de betas de arena. Situación que representa una reducción de costos de adecuación y operación.

---

<sup>7</sup> El artículo 11 de la Resolución 1096 de 2000, establece niveles de complejidad: Bajo, Medio, Medio Alto y Alto, relacionando la determinación de la complejidad del sistema al número de habitantes en la zona urbana del municipio y su capacidad económica. los niveles poseen un grado de exigencia técnica diferenciado.

- Hay una trama vial (externa) adecuada para la circulación de vehículos, no obstante, las vías internas no se encuentran pavimentadas, ocasionando el levantamiento de material particulado en época de verano y generando a la vez condiciones de inseguridad en época de invierno.
- En cuanto a la capa de impermeabilización de fondo, no hay cumplimiento en la colocación de la arcilla, la cual corresponde a la primera capa impermeabilizante y de protección del suelo y acuíferos. Según el Reglamento Técnico Operativo de la compañía, esta capa tiene un espesor de 0,40 m, siendo establecido en el RAS 2000 una capa no menor de 1 m. Sumado a esto, no se efectuó estudios de la arcilla empleada, por lo que no se verifica el coeficiente de permeabilidad y de humedad de la misma, no habiendo certeza de que el aislamiento sea el adecuado.

Este se considera un incumplimiento de relevancia, dado el riesgo de contaminación de acuíferos y de suelo al que se incurre al no cumplir con una capa impermeabilizante mayor o igual a lo recomendado, no hay evidencia de campo que permita asegurar que la capa colocada actualmente impermeabiliza de la forma deseada.

- Se evidenció en diseño y en visita de campo realizada, la existencia de una red de canales perimetrales, que permiten la recolección y transporte de las aguas de escorrentía.
- Referente a la red de recolección de lixiviado, según el plano de diseño de los Módulos de disposición del relleno sanitario, ésta cumple con todos los requisitos establecidos en el RAS 2000. Es de resaltar mejoras implementadas por el relleno, en el uso de Polietileno de alta densidad en la construcción de la red, material que permite deformidades de los trayectos sin poner en riesgo la continuidad de los mismos.
- De acuerdo al reglamento técnico operativos del relleno, hay un sistema de venteo de biogás que cumple con las distancias establecidas en el RAS 2000.
- Hay un diseño de celda adecuado, que tiene en cuenta las toneladas promedio día de residuos, no obstante, la altura de la celda recomendada en el RAS es duplicada, no habiendo un soporte técnico que respalde el cambio de la altura.

Por otra parte, la capa de cobertura intermedia es mucho inferior a lo recomendado, sin embargo, al corresponder la parte superior de la celda a frente de trabajo de la próxima celda, se alcanzan grosores en la práctica superiores a la documentada para poder asegurar la circulación de los vehículos compactadores. Situación distinta

ocurre en los taludes, los cuales al quedar con una capa delgada son socavado por la lluvia generando fugas de lixiviado y exposición de los residuos dispuestos.

- Referente al Suelo soporte, se resalta que la organización, efectúa desmonte y descapote acorde al avance de la obra, situación que impide que haya intervenciones prematuras en el predio.
- Se carece de las pruebas de laboratorio de peso unitario del residuo, valores del ángulo de resistencia al corte de los residuos y de cohesión de los residuos, que son insumo para el cálculo de estabilidad de la masa.
- En cuanto a las obras complementarias recomendadas en el RAS, a pesar de haber algunas que no cumplen con los requerimientos establecidos, estos incumplimientos no representan un riesgo a la buena disposición final de los residuos ni a la prevención de generación de episodios de contaminación.

Dentro de las obras complementarias, que contempla el RAS, se resalta la necesidad del establecimiento de un área de emergencia para la recepción de residuos, la cual debe estar impermeabilizada, canalizada y tener la capacidad de operar de manera continua por 3 meses, a pesar de que el RAS no establece criterios de impermeabilización de estas zonas (necesidad de geomembrana); se considera que al efectuar la impermeabilización con solo arcilla como actualmente está la zona de emergencia del relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos, hay un riesgo de contaminación de suelo y fugas de lixiviado.

Debido a que de acuerdo al Reglamento Técnico Operativo del relleno sanitario, esta zona se activa en un escenario de lluvias torrenciales, en donde las condiciones operativas demandan remoción permanente de capa superficial de suelo de la zona de descargue, es posible que haya pérdida de la capa impermeabilizante, por lo que es un aspecto que merece control.

- Referente a los diseños de la capa final de la masa, se efectuó verificación del plan de clausura encontrando que este cumple con los criterios establecidos en el RAS. Aún el relleno Sanitario no cuenta con áreas clausuradas por lo que no se pudo efectuar revisión en campo.

### ***6.1.1.2.Cumplimiento de los Requisitos de Control Ambiental.***

Los aspectos referentes con los controles ambientales correspondieron a 30 requisitos que se identifican como obligaciones del numeral F.6.5. De acuerdo a la lista de verificación aplicada se obtuvo un cumplimiento del 80% por parte del relleno sanitario.

Como aspecto relevante se detectó que el Plan de Monitoreo Ambiental, en donde se establecen los indicadores ambientales y el cronograma de monitoreos, se encuentran discrepancias entre la frecuencia propuesta en el RAS y la de la compañía, teniendo menor frecuencia que la recomendada.

Por otra parte, el Plan de Monitoreo Ambiental no tiene cobertura a las áreas aledañas al predio, no permitiendo verificar la calidad ambiental en la zona.

### ***6.1.1.3.Cumplimiento En Requisitos De Operación.***

Los requisitos operacionales evaluados en este ítem correspondieron a 30 requisitos que se identifican como obligaciones del numeral F.6.6. De acuerdo a la lista de verificación aplicada se obtuvo que hay un cumplimiento del 88% por parte del relleno sanitario.

Los aspectos relevantes encontrados fueron:

- Los requerimientos establecidos referentes al acceso, frente de trabajo y los controles de restricción e identificación de residuos, son efectuados acorde a las recomendaciones del RAS 2000.
- también fue evaluado el aspecto de compactación de residuos en los parámetros de diseños, no detectándose cumplimiento en el número de pasadas mínima a los residuos requerido por la maquinaria pesada, sin embargo, a nivel operativo, el Director Técnico Operativo reporta que si se supera el mínimo requerido de 3 a 4 pasadas.
- A pesar de que el Director Técnico Operativo del relleno sanitario asegura la existencia de un sistema de control de agua de escorrentía sobre la masa de residuos, en visita de campo no se evidenció la presencia del mismo; por otra parte, las Memorias de Diseño del relleno sanitario, señalan que hay que establecer bermas cada 10 metros, no se observó en la visita de campo la existencia de la misma en la masa de residuos.

La omisión del establecimiento de las bermas representa un riesgo para la estabilidad del relleno, dado que de acuerdo al Análisis de Estabilidad de Subsuelo, para que haya condiciones de seguridad suficiente en la configuración de la masa era necesario el establecimiento de una berma cada 10 m, con un ancho de plataforma de 6 m.

### 6.1.2. Análisis ambiental del Relleno Sanitario.

De acuerdo al Plan de Manejo Ambiental (PMA) del relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos, la empresa debe hacer seguimiento a la calidad del lixiviado, agua superficial, agua subterránea, y agua en canales. Con respecto a parámetros de calidad de aire, debe hacer seguimiento a las características del biogás, partículas suspendidas totales (PST) y partículas respirables (PM<sub>10</sub>). La frecuencia de monitoreo de los indicadores se relacionan en la tabla 3:

Tabla 3 Cronograma de monitoreo del relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos 2014

CRONOGRAMA DE MONITOREO 2014												
PARQUE AMBIENTAL LOMA DE LOS COCOS												
AGUA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Lixiviado												
Superficiales												
Subterráneas												
Entrada y salida de los canales												
AIRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Biogás: Metano												
Dióxido de carbono												
Oxígeno												
Explosividad												
Partículas suspendidas totales (PST)												
Partículas respirables (PM <sub>10</sub> )												

Fuente: Caribe Verde, 2015

#### 6.1.2.1. Lixiviado.

El lixiviado es el resultante de la percolación de agua a través de los residuos en descomposición, correspondiendo este líquido a una solución de materiales biológicos y constituyentes químicos. Las características del mismo, pueden variar dependiendo de las



condiciones ambientales de la zona y de la composición de los residuos, por lo que, se identifica como un líquido de altas cargas de contaminantes difícil de tratar.

Para el caso del relleno sanitario de Cartagena, a pesar de no efectuar vertimiento de lixiviado, la compañía tiene la obligación de efectuar monitoreo del mismo, esto de acuerdo al Decreto 838 de 2005 y a la licencia ambiental otorgada. Las muestras de lixiviado tomadas corresponden a muestras compuestas de 8 horas, tomadas directamente de los puntos de descarga de lixiviado.

De acuerdo a los resultados de la caracterización de lixiviados del el año 2014, se puede inferir que el efluente corresponde a lixiviado maduro de poca biodegradabilidad, esto teniendo en cuenta su relación  $DBO_5/DQO$ , la cual se ubica principalmente entre 0,05 a 0,2 (Ver Tabla 4), esto relacionándose a la presencia de ácidos húmicos y fúlvicos (Tchobanoglous, 1994, pág. 471).

**Tabla 4 Relación  $DBO_5/DQO$  año 2014**

RELACIÓN $DBO_5/DQO$		
MES	PONDAJE I	PONDAJE IV
Enero-14	0,03	0,56
Abril-14	0,05	0,18
Julio-14	0,10	0,13
Octubre-14	0,40	0,13

**Fuente:** Caribe Verde SA ESP, 2015, pág. 26

#### 6.1.2.1.1. Producción de lixiviado.

En la actualidad el relleno sanitario entre sus controles operacionales, realiza seguimiento a la generación de lixiviado de forma diaria, este seguimiento se realiza con medición volumétrica directa en los puntos de descarga.

Para efectos de la presente investigación, se procedió a simular la generación de lixiviado a partir del año 2005 hasta la fecha de cierre según licencia ambiental (2025). Para esto se empleó el modelo CORENOSTÓS (Echeverry & Collazos, 2017), el cual para los cálculos tienen en cuenta la biodegradación de los residuos dispuestos en el tiempo, consumo de agua en la generación de gases, composición de los residuos dispuestos, precipitaciones, material de cobertura del relleno sanitario, entre otras variables.

La simulación se realizó bajo los siguientes supuestos:

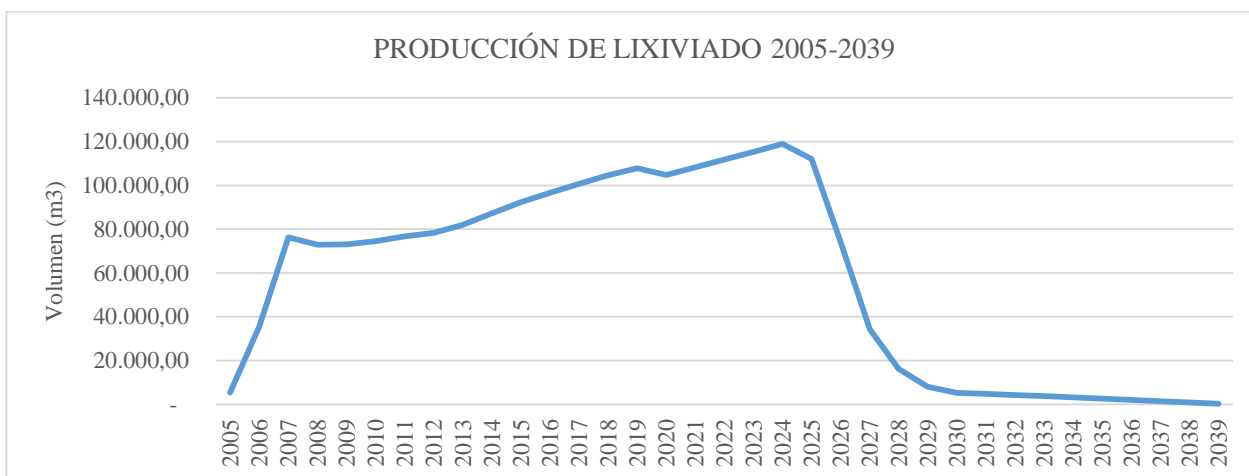
- El promedio multianual de precipitaciones y evaporación del relleno sanitario, son iguales a los del distrito de Cartagena de indias.
- Se asumió inicio de operación 1 de enero de 2005 y finalización de operación el 31 de diciembre de 2024.
- El pesaje del año 2005 fue igual al del 2006, dado que Caribe Verde S.A. E.S.P. no suministro pesaje real del año 2005.
- El dato de área intervenida mensual fue calculada a partir de los datos anuales (2006-2015) de residuos dispuestos suministrados por Caribe Verde S.A. E.S.P. Los correspondientes a los años 2016 a 2024, corresponde a una proyección basada en la tendencia (Ver Anexo 3 y 4), es decir, son datos teóricos. Por lo anterior, la información empleada podría variar de los datos de campo.
- Se realiza cobertura diaria con arcilla, guardando una pendiente del 3%.
- Densidad de compactación de  $1034 \text{ ton/m}^3$ , de acuerdo al histórico.
- Se tomó el tiempo teórico de eversuria<sup>8</sup> de 15 años, tiempo en que se considera que los residuos dispuestos ya no representarían un problema ambiental según lo recomendado en el modelo CORENOSTÓS (Echeverry & Collazos, 2017). Por lo anterior, la simulación establece una producción de lixiviado por 35 años (proyección 2005-2039).

Al correr el modelo, este arroja un caudal estimado de  $0,245503 \text{ m}^3$  por tonelada de residuos a descomponer, teniendo en cuenta una expectativa de descomposición del 50% de los residuos dispuestos.

Como se muestra en la figura 4, el pico de producción de lixiviado se encuentra en el año de clausura (2024) alcanzado una cifra de  $112.051,03 \text{ m}^3/\text{año}$ , cifra que desciende rápidamente dado que no habría más entrada de residuos a partir de este año al relleno sanitario, hasta llegar a una producción de  $291,94 \text{ m}^3$  en el año 2039.

---

<sup>8</sup> Se define como el lapso de tiempo en el que se da descomposición de los residuos.



**Figura 4 Producción de lixiviado sin aprovechamiento 2005-2039**

De acuerdo a la tabla 5, la producción de lixiviado entre el año de apertura (2005) y el año de cierre de acuerdo a la licencia ambiental (2024), en un escenario sin aprovechamiento de residuos sería de 1.835.082,45 m<sup>3</sup>, correspondiendo al 92% de la producción total de lixiviado al 2039.

**Tabla 5 Producción de lixiviado sin aprovechamiento 2005-2039**

AÑO	RESIDUOS DISPUESTOS (Ton/año)	LIXIVIADO (m <sup>3</sup> /año)
2005	268.734	5.360,59
2006	268.734	35.482,33
2007	280.882	76.265,88
2008	290.943	72.896,84
2009	303.536	73.039,68
2010	322.485	74.544,98
2011	316.526	76.686,39
2012	318.296	78.342,31
2013	348.372	81.953,53
2014	374.149	87.257,01
2015	391.445	92.365,81
2016	402.288	96.645,99
2017	416.306	100.624,20
2018	430.392	104.600,54
2019	444.490	107.899,94
2020	458.568	104.760,39
2021	473.561	108.205,19
2022	488.457	111.741,59
2023	503.564	115.350,28
2024	518.884	119.007,74
2025	0	112.051,23
2026	0	74.121,03

AÑO	RESIDUOS DISPUESTOS (Ton/año)	LIXIVIADO (m <sup>3</sup> /año)
2027	0	34.301,15
2028	0	16.205,59
2029	0	7.986,23
2030	0	5.297,98
2031	0	4.810,26
2032	0	4.307,11
2033	0	3.786,71
2034	0	3.249,01
2035	0	2.694,02
2036	0	2.121,14
2037	0	1.529,92
2038	0	920,27
2039	0	291,94
<b>Generación total</b>		<b>1.996.704,79</b>

Fuente: Elaboración del Autor

### 6.1.2.2. Agua superficial.

El predio Los Cocos en la actualidad cuenta con un solo cuerpo de agua, el cual se encuentra en la parte superior del relleno. Para el año 2014 se contaba, con un cuerpo de agua en la parte baja del predio, debido al avance de la obra y de la reducción en las precipitaciones del año 2014 y 2015, éste se secó.

De acuerdo al informe de cumplimiento ambiental del año 2014 de Caribe Verde S.A. E.S.P., la caracterización del cuerpo de agua de la parte baja del predio muestra presencia de metales pesados (Mercurio y Plomo) en la alícuota tomada. Para el caso del plomo la concentración supera la concentración recomendada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para agua potable de 0,01 mg/l; de igual forma en el Mercurio cuya concentración de referencia es de 0,001 mg/l (OMS, 2004, p. 100) (Ver Tabla 6).

Por la ubicación del cuerpo de agua, no se relaciona contaminación del mismo con lixiviado, no obstante, este cuerpo de agua es tomadero de los góleros asentados en el relleno sanitario, por lo que este puede estar siendo contaminado por las patas de estos animales.

**Tabla 6 Resultados de caracterización de agua superficial 2014**

RESULTADOS DE CARACTERIZACION DE AGUA SUPERFICIAL 2014					
PARÁMETRO	ENERO DE 2014	ABRIL DE 2014	JULIO DE 2014	OCTUBRE DE 2014	LIMITE DE DETECCIÓN
Aceites y Grasa mg/l	6,00	<LD	1086,50	<LD	5,15
Cadmio mg/l	<LD	<LD	<LD	0,007	0,005

RESULTADOS DE CARACTERIZACION DE AGUA SUPERFICIAL 2014					
PARÁMETRO	ENERO DE 2014	ABRIL DE 2014	JULIO DE 2014	OCTUBRE DE 2014	LIMITE DE DETECCIÓN
Conductividad mS/cm	141,70	723,00	1492,00	0,24	NA
DBO <sub>5</sub> mg/l	6,90	0,035	0,068	<LD	0,46
DQOmg/l	198,84	18,40	40,85	6,75	14,68
Mercurio mg/l	<LD	466,10	510,00	80,00	2,50
Oxígeno Disuelto	2,20	<LD	8,44	1,23	NA
pH	7,29	7,46	<LD	7,01	NA
Plomo mg/l	<LD	0,0740	135,00	0,0770	0,0023
SST mg/l	17,00	68,00	152,00	15,00	4,21
Temperatura °C	27,40	76,30	-	28,80	NA
Turbiedad NTU	11,50	-	-	45,50	0,07

Fuente: Caribe Verde S.A. E.S.P., 2015, pág. 28.

### 6.1.2.3. Aguas subterráneas.

En el relleno sanitario se encuentran construidos dos piezómetros, uno ubicado en la parte superior del relleno y otro en la parte inferior. Esta ubicación permite verificar las condiciones del agua subterránea que entra y las condiciones de calidad en la que sale del predio (Ver Figura 5).



Figura 5 Ubicación de Piezómetro en el relleno sanitario

Al mirar la ubicación del piezómetro aguas abajo y la caracterización de enero y julio de 2014 (Ver tabla 7), se podría concluir que hay contaminación del agua subterránea, por la cercanía con las piscinas de almacenamiento de lixiviados, habiendo sospecha de posibles fugas o infiltraciones, esto dada la presencia de metales pesados como cromo, cadmio, cobre, y de sólidos suspendidos volátiles, los cuales normalmente no se encuentran en aguas subterráneas. No obstante, es de notar que la calidad del agua que entra al predio presenta alguno de estos contaminantes.

**Tabla 7 Resultados de caracterización de agua subterránea 2014**

PARÁMETRO	RESULTADOS DE CARACTERIZACION DE AGUA SUBTERRANEA 2014				
	ENE-14		JUL-14		LIMITE DE DETECCIÓN
	AGUAS ABAJO	AGUAS ARRIBA	AGUAS ABAJO		
Aceites y Grasa mg/l	<LD	<LD	<LD	5,15	
Amonio mg/l	<LD	<LD	0,760	0,58	
Aluminio mg/l	<LD	<LD	<LD	2,50	
Cadmio mg/l	<LD	0,041	0,020	0,005	
Cloruros mg/l	445,49	937,44	480,83	10,07	
Cobre mg/l	1,65	<LD	<LD	0,02	
Conductividad µS/cm	274,00	4,11	5,85	NA	
Cromo mg/l	<LD	0,081	0,095	0,025	
DBO5 mg/l	0,74	1,58	12,26	0,46	
DQO mg/l	174,8	60,00	510,00	14,68	
Dureza Total mg/l	2406,00	882,00	2347,00	0,05	
Fenol mg/l	0,10	0,052	0,055	0,08	
Fosfato mg/l	0,030	0,070	0,130	0,026	
Hierro mg/l	0,108	<LD	0,191	0,025	
Mercurio mg/l	<LD	-	-	2,50	
Níquel mg/l	<LD	0,1130	<LD	0,0250	
Nitratos mg/l	0,4296	0,0164	0,0194	0,0104	
Nitritos	<LD	0,0110	<LD	0,0022	
pH	7,78	6,93	7,62	NA	
Plomo msg/l	<LD	0,2640	0,3000	0,0023	
SD mg/l	5287,5	2661,2	5228,7	76,3	
SST mg/l	6,25	105,00	12,50	4,21	
SSV mg/l	13,00	17,50	2,50	ND	
Sulfatos mg/l	22,30	149,60	199,10	2,05	
Sulfuros mg/l	-	<LD	<LD	0,1	
Temperatura °C	29,50	-	-	NA	
Tensoactivo mg/l	2,80	46,00	5,38	0,08	
Zinc mg/l	0,023	<LD	0,014	0,010	
Coliformes Totales NMP/100 ml	13*10 <sup>2</sup>	<1.8	<1.8	NA	
Coliformes Fecales NMP/100 ml	27*10	<1.8	<1.8	NA	

**Fuente:** (Caribe Verde S.A. E.S.P., 2015, pág. 29)

#### **6.1.2.4. Biogás.**

El biogás corresponde a una de las salidas principales de la descomposición de los residuos del relleno sanitario. El biogás de relleno sanitario urbano está compuesto principalmente por

Amoniaco ( $\text{NH}_3$ ), Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), Hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ ), Metano ( $\text{CH}_4$ ), Oxígeno ( $\text{O}_2$ ), Nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y Ácido Sulhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (Tchobanoglous, 1994, pág. 430).

Los resultados del seguimiento del año 2014 a las chimeneas de control M11-33, M11-43 y M11-45), muestran concentraciones de Metano alrededor del 70% y de un 20% de dióxido de carbono (Caribe Verde S.A. E.S.P., 2015, pág. 28), correspondiendo a la composición de un biogás maduro, de igual forma se asocia la alta concentración de metano encontrado a que las chimeneas monitoreadas se encontraban conectadas al sistema de extracción de biogás, permitiendo aumentar las condiciones anóxicas de la zona.

El límite inferior de explosividad (LIE o LEL) reportado en el 2014 muestra un mínimo de 2,80% y un máximo de 4,20% de metano en el aire (Ver Figura 6), no estando muy alejado de la mezcla combustible de 5% del metano y 95% de aire que da inicio a una explosión, por lo que se puede concluir que no hay riesgo por acumulación de biogás, aun así, al haber una variación permanente en la calidad del biogás y al no ser efectuados los monitoreos con la frecuencia recomendada en el RAS 2000 y en la Resolución 838 de 2000, no se debe colocar llamas o chispas dentro de las chimeneas.

El venteo natural y permanente de la zona reduce la posibilidad de que haya condiciones explosivas en la corona.

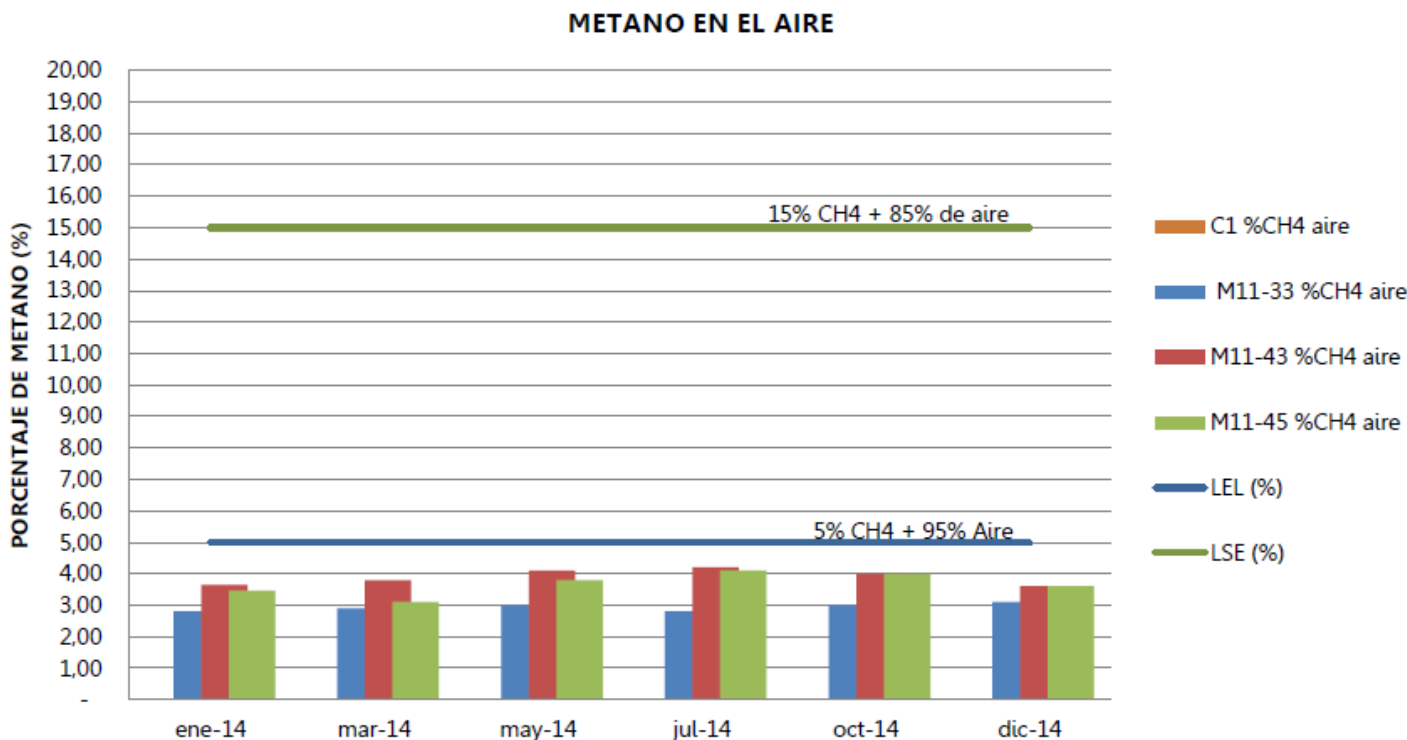


Figura 6 Concentración de metano en el Aire – Calculo de explosividad. Tomada de (Caribe Verde S.A. E.S.P., 2015, pág. 31)

De igual forma es importante anotar que debido a la cantidad de residuos manejados en el relleno sanitario, hay una producción elevada de biogás que como se había mencionado anteriormente está compuesto principalmente por Metano. Dado que el metano, es catalogado como un gas de efecto invernadero, es posible establecer las toneladas de Dióxido de Carbono equivalentes ( $tCO_2e$ )<sup>9</sup> de acuerdo a su potencial de calentamiento global (Ver Tabla 8).

<sup>9</sup> Toneladas equivalentes de  $CO_2$ , de acuerdo al Reglamento (UE) No 517/2014 del Parlamento Europeo, es la “cantidad de gases de efecto invernadero, expresada como el resultado del producto del peso de los gases de efecto invernadero en toneladas métricas por su potencial de calentamiento atmosférico”.



**Tabla 8 Generación de Metano en el relleno Sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos sin aprovechamiento de residuos**

Año	Generación de metano (tCO <sub>2e</sub> /año)
2013	238.090
2014	251.061
2015	262.541
2016	272.963
2017	282.623
2018	291.729
2019	303.831
2020	314.497
2021	325.163
2022	335.829
2023	346.495
2024	357.160
2025	367.826

**Nota:** los datos del 2020 al 2025, corresponden a una proyección.

**Fuente:** Adaptado de Carbon BW Colombia S.A.S. , 2012, pág. 59

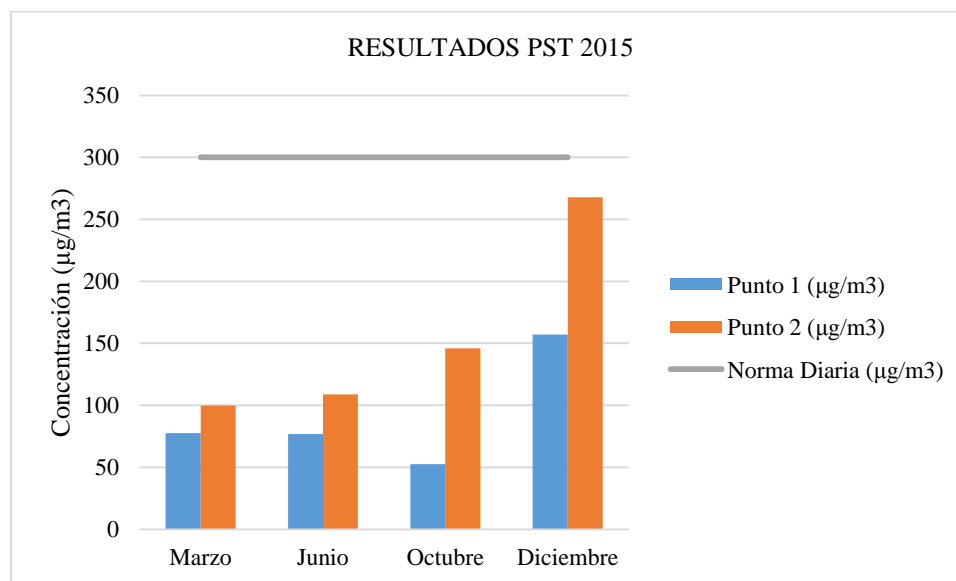
#### **6.1.2.5. Calidad de aire.**

El relleno sanitario Parque ambiental Loma de los Cocos efectuó en el 2015 monitoreos de calidad de aire en 2 puntos (Ver Figura 7), uno viento arriba, el cual se localiza en un punto externo al predio Los Cocos y otro viento abajo, localizado en la corona o punto alto de la masa de residuos, correspondiendo el seguimiento a Partículas suspendidas totales (PST) y partículas respirables (PM<sub>10</sub>), se considera que los puntos de monitoreo son insuficientes teniendo en cuenta la extensión del área.



**Figura 7 Puntos de muestreo de calidad de Aire. Tomado de (Caribe Verde S.A. E.S.P., 2015, pág. 33)**

Los resultados del seguimiento a las partículas con diámetro aerodinámico inferior a  $100 \mu\text{m}$  o PST muestran una variación en la concentración entre  $52,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $156,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el Punto 1 y de  $99,66$  y  $267,93$  en el Punto 2 en el año 2015, manteniendo los resultados por debajo del nivel máximo permisible de  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Ver Figura 9).

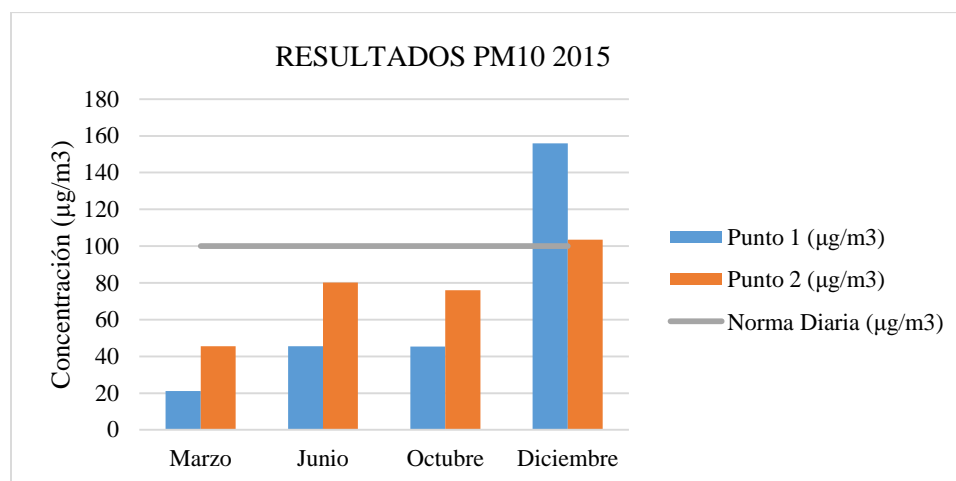


**Figura 8 Monitoreo Partículas suspendidas totales 2015**

Los resultados reportados de  $\text{PM}_{10}$  o partículas con diámetros aerodinámicos menores de  $10 \mu\text{m}$  y mayor a  $2,5 \mu\text{m}$ , muestran que la concentración de este contaminante varió entre  $21,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $156 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el año 2015, sobrepasando el nivel máximo permisible en los dos puntos de seguimiento en el mes de diciembre, en un  $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación 1 (externo) y en  $3,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación 2 (interno).

Hubo predominancia de mayor concentración en el punto interno, se relaciona esto a la circulación permanente de vehículos recolectores en las vías internas del relleno, la vía desprovista de pavimentación y la poca humectación de la vía.

Dado que las  $\text{PM}_{10}$  son catalogadas como partículas gruesas inhalables, está claro que tienen el potencial de llegar a los pulmones y corazón (EPA, 2016), por lo que medidas como la irrigación permanente de las vías internas del relleno sanitario y su pavimentación se hace prioritaria para la protección de la salud del personal que labora para la compañía, la población circunvecina y la vegetación.



**Figura 9 Monitoreo Partículas respirables PM<sub>10</sub> 2015**

Para valorar la composición de las partículas por tamaño y su presencia en la atmósfera, se verificó la relación PM<sub>10</sub>/PST, la cual muestra una fluctuación entre 0,27 y 0,99 en la estación 1 y de 0,39 y 0,74 en la estación 2, mostrando una alta variabilidad de los datos colectados en las estaciones (Ver Tabla 9). Es de anotar que, las condiciones de calidad de aire en el mes de octubre y diciembre son inferiores a las encontradas dentro del relleno sanitario, evidenciando predominancia de PM<sub>10</sub> en el aire, lo que representa un riesgo para la población que se encuentra expuesta.

Por otro lado, el relleno sanitario tiene como medida para el manejo del lixiviado la recirculación del mismo a las zonas más altas de la masa de residuos (corona), esta actividad lleva el riesgo inherente de inhalación de partículas contaminadas con lixiviado – recirculación, ya que la radiación permite la evaporación del agua y de algunas sustancias, mientras otras quedan adheridas al suelo.

**Tabla 9 Composición de las partículas por tamaño y su presencia 2015**

RELACIÓN PM10/PST 2015		
MESES	Punto 1 (µg/m³)	Punto 2 (µg/m³)
Marzo	0,27	0,46
Junio	0,59	0,74
Octubre	0,86	0,52
Diciembre	0,99	0,39

Fuente: Elaboración del autor

### **6.1.3. Proyección del crecimiento del Relleno Sanitario.**

Con el objeto de determinar la demanda en área requerida para la recepción de los residuos generados en el Distrito de Cartagena de Indias en el periodo restante (2016 – 2025) del contrato de Caribe Verde S.A. E.S.P. se efectuó el análisis y ajuste a las condiciones reales operativas sobre el cálculo del área requerida para la disposición final de los residuos sólidos contenida en la propuesta técnica presentada al Distrito de Cartagena de Indias por Caribe Verde S.A. E.S.P. (Caribe Verde S.A. E.S.P., 2005, pág. 54).

Esta proyección se toma como datos estimados de un escenario sin aprovechamiento, es decir, la demanda de terreno si no se realiza desvíos de residuos por aprovechamiento.

Los datos que se consideraron para la proyección fueron, el crecimiento demográfico, el cual se extrajo de la proyección del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) 2005 – 2020, para la cabecera municipal; el historial de recepción de residuos del relleno sanitario (2006 – 2015), discriminándose los residuos procedentes de Cartagena; y por último, los históricos de densidades de compactación del relleno sanitario (2009 – 2015).

En cuanto a la producción per cápita (PPC) de residuos sólidos, para su cálculo se utilizó la información histórica de recepción de residuos del relleno sanitario (2006 – 2015), efectuándose una proyección lineal por medio del método de los mínimos cuadrados.

Como se muestra en el Anexo 2, al ajustar la población, la PPC y eliminar los porcentajes de aprovechamiento que se habían considerado de forma inicial, se estima que el volumen de residuos sólidos que requeriría disposición final en el periodo que falta para la culminación del contrato de Caribe Verde S.A. E.S.P. sería de 6.597.682 m<sup>3</sup> si se aplica una densidad de compactación de 800 kg/m<sup>3</sup>, o de 5.104.590 m<sup>3</sup> si se calcula con la densidad promedio histórica del relleno sanitario de 1034 kg/m<sup>3</sup>.

Teniendo en cuenta que el relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos, fue diseñado para una recepción de 5.992.991 m<sup>3</sup> de residuos sólidos ordinarios en una área de 30,7 Ha, y que a diciembre de 2015 se ha ocupado 3.121.716 m<sup>3</sup> de dicha capacidad con residuos ordinarios compactados, se infiere que la capacidad remanente del relleno sanitario

es de 2.479.098 m<sup>3</sup>, equivalente a recibir 2.563.387,85 toneladas de residuos<sup>10</sup>, que según la proyección efectuada (Ver Anexo 3 y 4) equivaldría a recibir residuos hasta el año 2021, si se mantiene una densidad de compactación promedio de 1.034 kg/m<sup>3</sup>. Si se efectúa el cálculo con una densidad conservadora de 800 kg/m<sup>3</sup>, se obtiene que el relleno sanitario sería capaz de recibir 1.983.278,80 toneladas residuos ordinarios, correspondiente a operar hasta finales del 2020 (Ver tabla 10).

**Tabla 10 Cálculo de vida útil del relleno Sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos**

CÁLCULO DE VIDA ÚTIL DE ACUERDO A LA DENSIDAD DE COMPACTACIÓN		
TOTAL DE RESIDUOS DISPUESTOS* (Ton)	318.296,11	
DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )	800	1034
VOLUMEN ACUMULADO PARA 2025 (m <sup>3</sup> )	6.597.682,43	5.104.589,89
CAPACIDAD REMANENTE (Ton)	1.983.278,80	2.563.387,85
VIDA ÚTIL (meses)	55	70
VIDA ÚTIL (año)	4,6	5,9
AÑO ESTIMADO DE CIERRE	2020	2021

**Nota:** la fecha de cohorte de toneladas de residuos dispuestos corresponde a diciembre de 2015

**Fuente:** Elaboración del autor

Dado que el contrato de disposición final de Caribe Verde S.A. E.S.P. se extiende hasta el 2025, es claro que se requiere el diseño de módulos adicionales que permita la recepción de residuos ordinarios hasta el periodo determinado inicialmente, teniendo en cuenta la disponibilidad de área en el predio Los Cocos.

Por lo anterior, se efectuó la estimación del área adicional requerida para dar disposición final a los residuos ordinarios en el predio Los cocos hasta el 2025, para esto se tuvo en cuenta las proyecciones realizadas de generación de residuos (ver Anexo 3 y 4) para escenarios con densidad promedio de 800 kg/m<sup>3</sup> y 1.034 kg/m<sup>3</sup>, la capacidad de diseño de los módulos de disposición y la capacidad volumétrica remanente de los mismos.

<sup>10</sup> Cálculo efectuado con una densidad de compactación de 1.034 kg/m<sup>3</sup>

Como se muestra en la tabla 11, si se continua con una densidad de compactación como la histórica y la altura máxima de disposición de 35 m, se requeriría un área aproximada de 7,5 Ha para la disposición de los residuos del 2021 a 2025. Mientras que si se proyecta con una densidad conservadora de 800 kg/m<sup>3</sup>, se estima que se requeriría adecuar un área aproximada de 11,77 Ha para la disposición final del 2020 a 2025.

**Tabla 11 Estimación de área requerida adicional para disposición final hasta el 2025**

ESTIMACIÓN DE ÁREA REQUERIDA ADICIONAL PARA DISPOSICIÓN FINAL HASTA EL 2025		
DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )	800	1.034
VOLUMEN ACUMULADO 2016-2025 (m3)	6.597.682,43	5.104.589,89
CAPACIDAD REMANENTE DE MODULOS (m3)	2.479.098,50	2.479.098,50
CAPACIDAD ADICIONAL REQUERIDA (m3)	4.118.583,93	2.625.491,39
ÁREA ESTIMADA A DEMANDAR (m2)	117.673,83	75.014,04
ÁREA ESTIMADA A DEMANDAR (Ha)	11,77	7,50

**Fuente:** Elaboración del autor

## 6.2. Diseño de Escenarios de Aprovechamiento

Teniendo en cuenta que Cartagena de Indias posee una amplia cobertura y calidad en la prestación del servicio de aseo, en las actividades de recolección, transporte y disposición final, se considera que es una ciudad madura para abordar la implementación de sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios a gran escala.

Teniendo en cuenta la caracterización de los residuos sólidos del PGIRS del 2007<sup>11</sup>, la generación de residuos sólidos, la disponibilidad de área y las condiciones ambientales, se consideraron tres tipos de tecnologías de valorización de residuos ordinarios que podrían ser implementadas de forma complementaria al relleno sanitario actualmente existente.

La selección de las tecnologías se sustentó en MAG CONSULTORIA & DNV.GL (2016), estudio desarrollado para el BID, en donde se determina los tratamientos de residuos sólidos

---

<sup>11</sup> No se tomó en consideración la caracterización de los residuos ordinarios del PGIRS 2015, por incongruencia en la información planteada, los detalles se exponen ampliamente en el numeral 2.2.2.

potencialmente viables en Colombia, tales como, tratamientos térmicos, biológicos y biomecánicos.

En el presente estudio se consideró la incineración, como tecnología de tratamiento térmico; el compostaje, como tratamiento biológico; y Tratamiento mecánico para la recuperación de materiales – MRF.

### **6.2.1. Tratamiento térmico por incineración.**

La incineración es una tecnología ampliamente probada, cuyo principal objetivo es la reducción en volumen y la inertización de los desechos. Al ser un tratamiento térmico, hay exposición de los residuos a altas temperaturas con exceso de oxígeno, generándose subproductos como gases de combustión, cenizas, entre otros. Esta tecnología es susceptible de ser complementada con procesos de producción de energía y para el caso de las cenizas, hay potencial de aprovechamiento, mientras estas sean inertes.

Este tipo de tratamiento térmico (escenario I) se encuentra recomendado para ciudades con una producción de residuos sólidos ordinarios mayor de 100.000 ton/año, con un poder calorífico mayor o igual a 7 MJ/kg (MAG CONSULTORIA – DNV.GL, 2016, pág. 36), haciéndola una alternativa posible de desarrollar en Cartagena de Indias.

#### ***6.2.1.1. Estimación de desvío de residuos.***

El escenario I plantea el procesamiento de los residuos sólidos urbanos, con separación previa de los residuos no procesables, es decir, segregación de los vidrios y la chatarra, que entre los dos representan el 5,5% de los residuos generados, por lo que el restante 94,55% serían incinerados (Alcaldía Distrital de Cartagena de Indias, 2007).

Como todo sistema de tratamiento, éste genera residuos o rechazo, el cual debería ser inerte, dado que no se proyecta el procesamiento de residuos peligrosos y se supone una buena separación en la fuente, por tanto, los rechazos del sistema podrían ser dispuestos en el relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos.

Para efectos de realizar la proyección con mayor detalle, se selecciona una tecnología de incinerador tipo parrilla, estimándose que aparte de los no procesables, se requería disposición final de otros desechos del sistema. A continuación se relaciona el factor de producción por tonelada tratada, siendo la de las cenizas de fondo, 220 kg; cenizas volátiles, generándose de 15 a 30 kg (para efectos de la proyección se toma el promedio); metales ferrosos, con un producción de 20 kg; metales no ferrosos, con una relación de 2 kg; y por último, bajo el supuesto de un tratamiento de gases de combustión en seco, habría una generación de 40 kg de desecho por tonelada de residuos procesados (EPEM S.A., 2015).

Por lo anterior, al efectuar el tratamiento a los residuos ordinarios por medio de la tecnología de incineración tipo parrilla a partir del año 2016 (Ver Anexo 5 y 6), habría una reducción de un 66% en el volumen de los residuos que requerirían disposición final en relleno sanitario con respecto al generado en un escenario sin aprovechamiento, por lo que para este caso, habría una extensión de la vida útil de diseño del relleno, de 3,8 meses o 16,2 meses dependiendo la densidad de compactación que se efectuó (Ver Tabla 12).

Si se tiene en cuenta que en un escenario sin aprovechamiento, el relleno sanitario actualmente tendría capacidad real de operar hasta el 2020 o 2021 como se mostró en el capítulo III, se entendería que la vida útil se extendería entre 5 y 7 años.

**Tabla 12 Proyección de extensión de vida útil del relleno sanitario con tratamiento por incineración**

Variables	Incineración	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	800	1.034
Volumen acumulado sin aprov. 2016-2025 (m3)	6.597.682	5.104.590
Volumen acumulado con inc. 2016-2025 (m3)	2.261.372	1.749.611
Capacidad remanente de módulos (m3)	2.479.098	2.479.098
Porcentaje de reducción	66%	66%
Capacidad disponible a 2025 (m3)	217.726	729.488
Capacidad disponible a 2025 (ton)	174.181	754.290
Extensión a vida útil (mes)	3,80	16,22
Extensión a vida útil (años)	0,32	1,35
Año de cierre	2026	2027

**Fuente:** Elaboración del Autor



### ***6.2.1.2. Estimación de la producción de GEI.***

Dado que las caracterizaciones efectuadas a los residuos ordinarios de Cartagena de Indias no aportan el contenido de carbono de los mismos, se utilizaron los factores de emisión de esta actividad con el objeto de tener un acercamiento a la producción de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), de la combustión en un sistema de incineración tipo parrilla.

Los GEI analizados correspondieron a Óxido Nitroso ( $N_2O$ ), Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) y Metano ( $CH_4$ ), no se consideraron otros gases dado que no se encontró referencia bibliográfica suficiente que aportara los factores de emisión, como el caso de los compuestos orgánicos fluorados ( $CF_4$ ,  $C_2F_6$ ,  $C_3F_8$  y  $SF_6$ ).

De igual forma, para el análisis se omitieron otras emisiones atmosféricas, como el Monóxido de carbono (CO), Carbono orgánico total (TOC), Cloruro de hidrógeno (HCl), Fluoruro de hidrógeno (HF), Óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), entre otros, dado que no se encuentra establecido su Potencial de Calentamiento Global (GWP, siglas en inglés)<sup>12</sup> equivalente de  $CO_2$  por parte del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, siglas en inglés).

A pesar de que los factores de emisión se calculan con base a la composición tipológica de los residuos, se utilizaron los factores de emisión establecidos en la Guía Técnica para la Medición, Estimación y Cálculo de las Emisiones al Aire del gobierno Vasco (2007), en donde se estima una emisión de 324 Kg de  $CO_2$ , de 0,0002 kg de  $CH_4$  y de 0,03 kg de  $N_2O$  por tonelada de RSU. La metodología empleada para estos cálculos, correspondieron a los lineamientos establecidos por la IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006).

De acuerdo a las estimaciones efectuadas, se encontró que habría una reducción de aproximadamente el 27% en emisiones de GEI con respecto a las que se generarían en un

---

<sup>12</sup> Índice que compara el efecto sobre el clima que produciría a lo largo de un horizonte determinado de tiempo una determinada emisión de un gas en comparación con la de otro de referencia. Se ha adoptado el Dióxido de Carbono, como gas de referencia dada su importancia a los efectos del cambio climático. La unidad de medida corresponde a toneladas de  $CO_2$  equivalente ( $tCO_{2e}$ ).

escenario sin aprovechamiento, siendo un total de 1.050.265,99 tCO<sub>2e</sub> que no serían emitidas (Ver tabla 13).

**Tabla 13 Emisiones reducidas escenario incineración**

EMISIONES REDUCIDAS ESCENARIO I 2016-2025 (tCO <sub>2e</sub> )	
E. de la planta de incineración	1.469.627,46
E. de Relleno sanitario con Incineración	1.394.489,56
Emisiones totales	2.864.117,01
E. de Relleno sanitario sin Aprovechamiento	3.914.383,00
Emisiones reducidas	1.050.265,99
Porcentaje de reducción	26,8%

**Fuente:** Elaboración del Autor

Es importante anotar que en los sistemas de tratamiento térmico de RSU a diferencia de otros métodos, las emisiones de CH<sub>4</sub> son considerablemente menores, debido a las condiciones de combustión en los incineradores, que permiten la conversión del CH<sub>4</sub> a CO<sub>2</sub>.

Por otra parte, se estimó que los residuos a disponer en el relleno posterior a la entrada en operación de la planta no generarían GEI, dado que son residuos inertes, por lo que, las emisiones de Relleno sanitario con Incineración relacionadas en la tabla 2 corresponden a los GEI que seguiría emitiendo el relleno sanitario de residuos dispuestos en años anteriores.

### ***6.2.1.3. Proyección de generación de lixiviado.***

Al igual que en el escenario sin aprovechamiento (Ver Numeral 6.1.2.1.1.) se procedió a simular la generación de lixiviado por medio del modelo CORENOSTÓS (Echeverry & Collazos, 2017), la simulación se efectuó a partir de la entrada en operación de un sistema de aprovechamiento mediante la tecnología de Incineración en el año 2016 hasta la fecha de cierre según licencia ambiental (2025).

Al haber un cambio en la composición física de los residuos a disponer (rechazo del sistema de aprovechamiento) y al estar activo el relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos desde el año 2005 sin aprovechamiento de residuos ordinarios, se efectúa doble corrida del modelo, una correspondiente a al periodo 2005- 2015 y otra a partir del año 2016, se tuvieron en cuenta las mismas consideraciones expuestas en la *proyección de crecimiento del relleno sanitario* (Ver Numeral 6.1.3.).

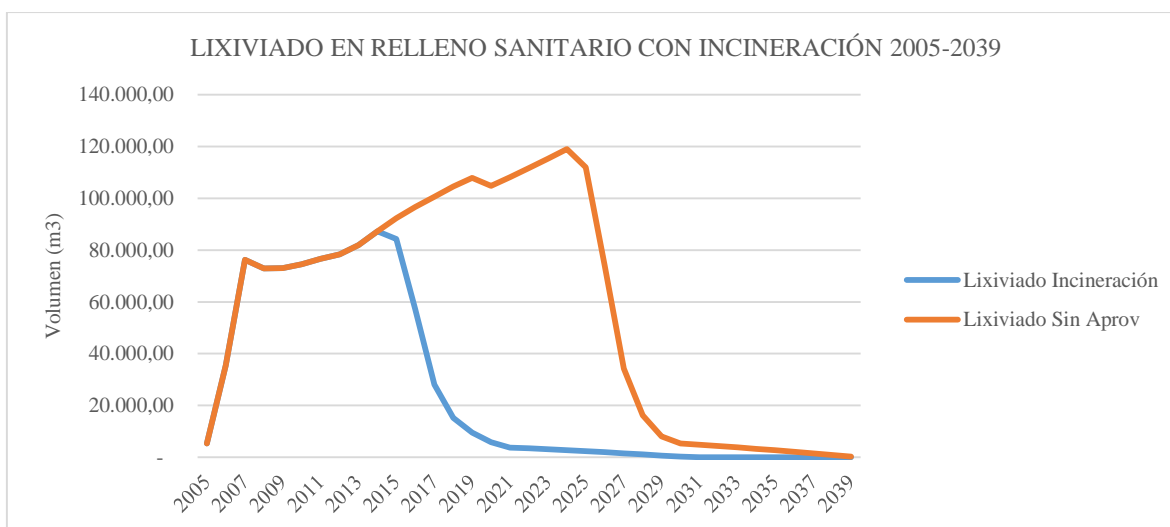
La simulación en el modelo CORENOSTÓS se realizó bajo los siguientes supuestos generales:

- Los residuos a disponer corresponden a los rechazos del sistema de tratamiento, por lo que hay un cambio en la composición física de los residuos a disponer. Se realiza corrección de la composición física teniendo en cuenta el rechazo del sistema de compostaje (Ver Anexo 11).
- El promedio multianual de precipitaciones y evaporación del relleno sanitario, son iguales a los del distrito de Cartagena de indias.
- Se asumió inicio de operación con sistema de compostaje el 1 de enero de 2016 y finalización de operación el 31 de diciembre de 2024.
- El pesaje del año 2005 fue igual al del 2006, dado que Caribe Verde S.A. E.S.P. no suministro pesaje real del año 2005.
- El dato de área intervenida mensual fue calculada a partir de los datos anuales (2006-2015) de residuos dispuestos suministrados por Caribe Verde S.A. E.S.P. Los correspondientes a los años 2016 a 2024, fueron calculados a partir de la proyección de volúmenes realizada (Ver Anexo 4), es decir, son datos teóricos.
- Se realiza cobertura diaria con arcilla, guardando una pendiente del 3%.
- Densidad de compactación de  $1034 \text{ ton/m}^3$ , de acuerdo al histórico.
- Se tomó el tiempo teórico de eversuria de 15 años, tiempo en que se considera que los residuos dispuestos ya no representarían un problema ambiental según lo recomendado en el modelo CORENOSTÓS (Echeverry & Collazos, 2017). Por lo anterior, la simulación establece una producción de lixiviado por 35 años (proyección 2005-2039).

Dado que la tecnología de incineración permite el procesamiento de los residuos aportante de humedad (0% putrescible, 0% papel, 0% textiles y 0% jardinería), y de que el aporte por precipitación no es mayor que el de la evapotranspiración, el modelo no arroja caudal promedio de salida de lixiviado para el periodo 2016-2024.

No obstante, al año de cierre del relleno sanitario, se estima una producción de 0,2455 m<sup>3</sup> de lixiviado por tonelada de residuo descompuesto antes de la entrada en operación del sistema de tratamiento térmico (2005-2015).

Como se muestra en la figura 10, hay un descenso considerable en la producción del lixiviado a partir de la entrada de operación del sistema de tratamiento, debido a que el rechazo a disponer carece teóricamente de humedad, es decir, que el aporte de lixiviado a partir del año 2016 es nulo.



**Figura 10 Producción de lixiviado sin aprovechamiento vs aprovechamiento con incineración 2005-2039**

De acuerdo a la tabla 14, la producción de lixiviado sería de 877.420,92 m<sup>3</sup> entre el año de apertura del relleno sanitario (2005) y el año de cierre de acuerdo a la licencia ambiental (2024), considerando la entrada en operación de una sistema de incineración en el año 2016. Si se compara con la proyección de generación del escenario sin aprovechamiento (Ver Figura 10), se estima una reducción en el periodo 2005-2039 del 56% en la producción de lixiviado, es decir, se dejaría de generar 1.119.283,87 m<sup>3</sup>.

**Tabla 14 Producción de lixiviado en el relleno sanitario con incineración 2005-2039**

Año	Residuos dispuestos (ton/año)	Lixiviado (m <sup>3</sup> /año)
2005	268.734	5.360,59
2006	268.734	35.482,33

Año	Residuos dispuestos (ton/año)	Lixiviado (m <sup>3</sup> /año)
2007	280.882	76.265,88
2008	290.943	72.896,84
2009	303.536	73.039,68
2010	322.485	74.544,98
2011	316.526	76.686,39
2012	318.296	78.342,31
2013	348.372	81.953,53
2014	374.149	87.257,01
2015	391.445	84.341,15
2016	214.983	57.193,19
2017	222.474	28.103,28
2018	230.002	15.168,76
2019	237.535	9.525,67
2020	245.059	5.771,05
2021	253.071	3.768,32
2022	261.031	3.430,36
2023	269.105	3.078,87
2024	277.292	2.713,35
2025	0	2.328,15
2026	0	1.936,25
2027	0	1.546,52
2028	0	1.135,80
2029	0	691,02
2030	0	220,24
2031	0	0
2032	0	0
2033	0	0
2034	0	0
2035	0	0
2036	0	0
2037	0	0
2038	0	0
2039	0	0
<b>Generación total</b>		<b>877.420,92</b>

Fuente: Elaboración del Autor

### 6.2.2. Tratamiento biológico por compostaje.

El Compostaje es un proceso en donde hay una descomposición de los residuos orgánicos por la acción de microorganismos en presencia de oxígeno. Durante este proceso se genera vapor de agua, calor, dióxido de carbono y agua, que se liberan a la atmósfera (Tchobanoglous, 1994, pág. 770).

Debido a las condiciones meteorológicas y de disponibilidad del área del predio Los Cocos, el diseño de uno de los escenarios de aprovechamiento de residuos urbanos para el Distrito de Cartagena de Indias, se tomó en consideración la tecnología de compostaje a cielo abierto

en hilera (Escenario II), la cual se basa en el depósito o construcción de filas de residuos orgánicos de 3 metros de alto hasta 6 metros de largo, con un tiempo de producción de compost variable entre 8 y 20 semanas (EPEM S.A., 2015).

Por otro lado, la modelación se efectúa bajo el supuesto de que hay separación en la fuente adecuada de los residuos orgánicos y de que no hay pérdidas de residuos por contaminación con inhibidores microbianos o residuos peligrosos, por lo que, la totalidad de los residuos orgánicos fermentables generados en el Distrito de Cartagena serán tratados mediante esta tecnología.

Es importante resaltar que bajo este escenario no hay aprovechamiento de los residuos no fermentables, por lo que, a estos se les da disposición final en el relleno sanitario Parque Ambiental los Cocos.

#### ***6.2.2.1. Estimación de desvío de residuos.***

Dado que es un tratamiento de tipo biológico, la materia prima corresponde a la fracción orgánica fermentable de los residuos ordinarios (restos de alimentos), que de acuerdo a la caracterización de residuos sólidos efectuado en el PGIRS del 2007, son 77,6% de los residuos generados, siendo el no aprovechable del 22,4%.

Con una producción de residuos no compostable de 0,4 toneladas por tonelada de residuos procesados (EPEM S.A., 2015), se obtiene que, si entrará en operación una planta de compostaje a partir del año 2016, se reduciría la producción de residuos un 47% permitiendo la disposición final del rechazo hasta el 2025 si se proyecta con una densidad de compactación del rechazo de 1.034 kg/m<sup>3</sup> y solo hasta el 2023 si es de 800 kg/m<sup>3</sup> (Ver Tabla 15).

Al comparar la proyección de la Tabla 15 con el escenario sin aprovechamiento analizado en el capítulo anterior, en donde se plantea una posible operatividad hasta el 2020 o 2021, realmente habría una extensión de vida útil equivalente a 3 o 4 años.

**Tabla 15 Proyección de extensión de vida útil del relleno sanitario con tratamiento por compostaje**

Variables	Compostaje	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	800	1.034
Volumen acumulado sin aprov. 2016-2025 (m3)	6.597.682	5.104.590
Volumen acumulado con inc. 2016-2025 (m3)	3.525.801,49	2.727.892,84
Capacidad remanente de módulos (m3)	3.071.880,94	2.376.697,05
Porcentaje de reducción	47%	47%
Capacidad disponible a 2025 (m3)	-1.046.702,99	-248.794,34
Capacidad disponible a 2025 (ton)	-837.362,39	-257.253,34
Extensión a vida útil (mes)	0	0
Extensión a vida útil (años)	0	0
Año de cierre	2023	2025

Fuente: Elaboración del Autor

### 6.2.2.2. Estimación de la producción de GEI.

Para la estimación de la producción de GEI con la implementación de una tecnología de compostaje, se consideraron los factores de emisión procedentes de tratamientos biológicos de desechos dados por la IPCC para la preparación de abonos orgánicos (compost).

Los factores de emisión empleados son sobre la base de peso húmedo de los residuos, correspondiendo a 4 gramos de CH<sub>4</sub> y 0,3 gramos de N<sub>2</sub>O por kilogramo de residuos tratados (IPCC, 2006, pág. 4.7).

De acuerdo a las estimaciones efectuadas, se evidencia que habría una reducción de aproximadamente el 17,77% en emisiones de GEI con respecto a las que se generarían en un escenario sin aprovechamiento, siendo un total de 695.403,08 tCO<sub>2e</sub> que no serían emitidas (Ver tabla 16).

**Tabla 16 Emisiones reducidas escenario compostaje**

EMISIONES REDUCIDAS ESCENARIO II 2016-2025 (tCO <sub>2e</sub> )	
E. de la planta de compostaje	686.506,49
E. de Relleno sanitario con Compostaje	2.532.473,44
Emisiones totales	3.218.979,93
E. de Relleno sanitario sin Aprovechamiento	3.914.383,00
Emisiones reducidas	695.403,08
Porcentaje de reducción	17,77%

Fuente: Elaboración del Autor

Como se muestra en la tabla 16, para los cálculos de reducción se consideran los GEI que genera la planta de compostaje en operación y generación del relleno sanitario, el cual se mantendría activo, dada la necesidad de disposición final de los rechazos y/o residuos no fermentables del sistema de compostaje.

### ***6.2.2.3. Proyección de generación de lixiviado.***

Se procedió a simular la generación de lixiviado por medio del modelo CORENOSTÓS (Echeverry & Collazos, 2017), la simulación se efectuó a partir de la entrada en operación de un sistema de aprovechamiento mediante la técnica de compostaje en el año 2016 hasta la fecha de cierre según licencia ambiental (2025).

Al haber un cambio en la composición física de los residuos a disponer (rechazo del sistema de aprovechamiento) y al estar activo el relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos desde el año 2005 sin aprovechamiento de residuos ordinarios, se efectúa doble corrida del modelo, una correspondiente a al periodo 2005- 2015 y otra a partir del año 2016.

La simulación en el modelo CORENOSTÓS se realizó bajo los siguientes supuestos generales:

- Los residuos a disponer corresponden a los rechazos del sistema de tratamiento, por lo que hay un cambio en la composición física de los residuos a disponer, por tanto, se realiza corrección de la composición física teniendo en cuenta el rechazo del sistema de compostaje (Ver Anexo 7 y 8).
- El promedio multianual de precipitaciones y evaporación del relleno sanitario, son iguales a los del distrito de Cartagena de indias.
- Se asumió inicio de operación con sistema de compostaje el 1 de enero de 2016 y finalización de operación el 31 de diciembre de 2024.
- El pesaje del año 2005 fue igual al del 2006, dado que Caribe Verde S.A. E.S.P. no suministro pesaje real del año 2005.
- El dato de área intervenida mensual fue calculada a partir de los datos anuales (2006-2015) de residuos dispuestos suministrados por Caribe Verde S.A. E.S.P. Los



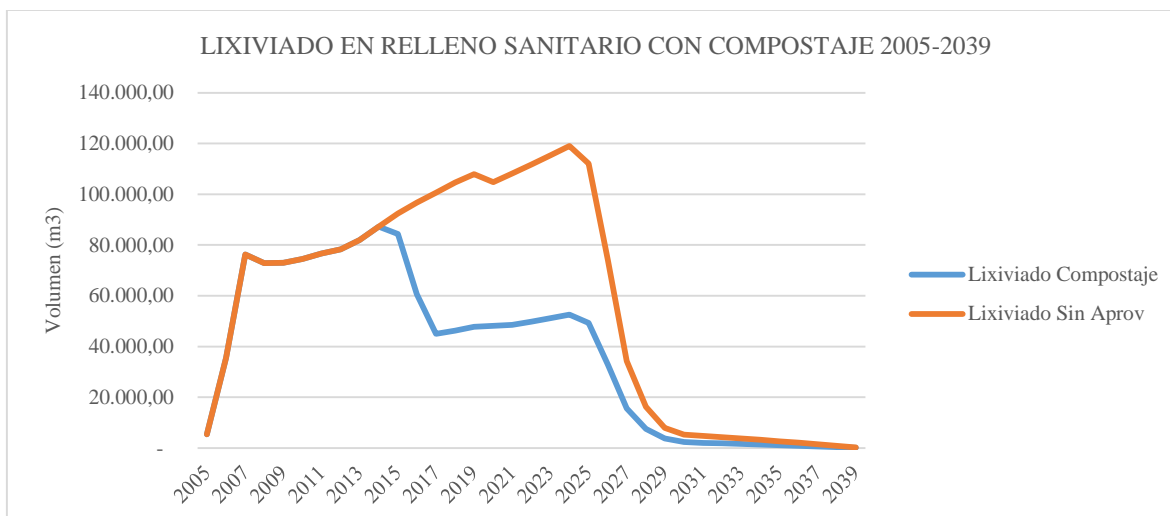
correspondientes a los años 2016 a 2024, fueron calculados a partir de la proyección de volúmenes realizada (Ver Anexo 4), es decir, son datos teóricos.

- Se realiza cobertura diaria con arcilla, guardando una pendiente del 3%.
- Densidad de compactación de 1034 ton/m<sup>3</sup>, de acuerdo al histórico.
- Se tomó el tiempo teórico de eversuria de 15 años, tiempo en que se considera que los residuos dispuestos ya no representarían un problema ambiental según lo recomendado en el modelo CORENOSTÓS (Echeverry & Collazos, 2017). Por lo anterior, la simulación establece una producción de lixiviado por 35 años (proyección 2005-2039).

Al correr el modelo, este arroja un caudal estimado de 0,15428 m<sup>3</sup> por tonelada de residuos a descomponer en el periodo 2016-2024, correspondiendo este volumen a la generación de lixiviado del relleno sanitario existente a partir de la entrada en operación del sistema de aprovechamiento en el año 2016.

El caudal estimado se basó en una expectativa de descomposición del 50% de los residuos dispuestos y una de composición de los residuos aproximada a 58% putrescible, 11% papel, 3% textiles, 2% jardinería y 26% otro tipo de residuos.

Como se muestra en la figura 11, hay un descenso considerable en la producción del lixiviado a partir de la entrada en operación del sistema de Compostaje, estabilizándose la generación a partir del año 2017 hasta el 2025, haciendo evidente que, el cambio en la cantidad y sobretodo en la composición física de los residuos a disponer genera una disminución en la generación de lixiviado a tratar.



**Figura 11 Producción de lixiviado sin aprovechamiento vs aprovechamiento con compostaje 2005-2039**

De acuerdo a la tabla 17, la producción de lixiviado entre el año de apertura del relleno sanitario (2005), la entrada en operación de una sistema de compostaje en el año 2016 y el año de cierre de acuerdo a la licencia ambiental (2024), habría una producción de 1.196.072,93 m<sup>3</sup>, correspondiendo al 91% de la producción total de lixiviado al 2039. Es importante resaltar que en el total se consideró la producción de lixiviado generada por los residuos dispuestos antes del 2016.

Si se compara con la proyección de generación del escenario sin aprovechamiento (Ver Figura 11) la producción de lixiviado en este escenario equivaldría al 34% de la producción en un escenario sin aprovechamiento, habiendo una reducción en el periodo 2005-2039 de 691.491,12 m<sup>3</sup>.

**Tabla 17 Producción de lixiviado en el relleno sanitario con compostaje 2005-2039**

AÑO	RESIDUOS DISPUESTOS (Ton/año)	LIXIVIADO (m <sup>3</sup> /año)
2005	268.734	5.360,59
2006	268.734	35.482,33
2007	280.882	76.265,88
2008	290.943	72.896,84
2009	303.536	73.039,68
2010	322.485	74.544,98
2011	316.526	76.686,39
2012	318.296	78.342,31
2013	348.372	81.953,53
2014	374.149	87.257,01
2015	391.445	84.341,15

AÑO	RESIDUOS DISPUESTOS (Ton/año)	LIXIVIADO (m <sup>3</sup> /año)
2016	214.983	59.888,20
2017	222.474	41.353,14
2018	230.002	39.524,23
2019	237.535	39.560,50
2020	245.059	39.015,69
2021	253.071	38.842,46
2022	261.031	39.805,67
2023	269.105	40.784,17
2024	277.292	41.769,73
2025	0	39.177,62
2026	0	26.178,83
2027	0	12.546,86
2028	0	6.196,85
2029	0	3.141,05
2030	0	1.925,55
2031	0	1.615,48
2032	0	1.446,50
2033	0	1.271,73
2034	0	1.091,15
2035	0	904,76
2036	0	712,36
2037	0	513,81
2038	0	309,06
2039	0	98,04
<b>Generación total</b>		<b>1.218.483,55</b>

Fuente: Elaboración del Autor

### 6.2.3. Tratamiento mecánico para la recuperación de materiales y compostaje.

Las instalaciones de recuperación de materiales (MRF, siglas en inglés) se basan en la separación mecánica a gran escala de los residuos por tipo de material. En donde, la separación o clasificación de los materiales a procesar se efectúa basándose en el uso final de los subproductos.

Dado que estos sistemas no son capaces de dar aprovechamiento a la totalidad de los residuos domésticos generados (solo la fracción inorgánica, la cual es un porcentaje pequeño), se tiene la tendencia de ser complementados con tratamientos biológicos para la fracción orgánica o sistemas de acondicionamiento que permitan una recuperación energética de los materiales.

El análisis efectuado en la presente investigación complementa el aprovechamiento con separación mecánica con un sistema de compostaje, lo cual aumenta el porcentaje de recuperación y reduce a la vez la cantidad de rechazo a disponer.

Al igual que los demás sistemas de aprovechamiento planteados, el rechazo del sistema sería dispuesto en el relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos sin un tratamiento adicional.

Debido a que la MRF proyectada (escenario III) tendría la misión de procesar la totalidad de residuos que genere el Distrito de Cartagena de Indias, el análisis se desarrolla con el supuesto de una planta con mediano nivel de automatización, que le permita una alta tasa de recuperación de materiales y pureza de los mismos.

Al tener un mediano nivel de automatización, el sistema de tratamiento debería contar por lo menos con (EPEM S.A., 2015):

- Sistema de rompe bolsas con alimentación automatizada.
- Bandas transportadoras que lleva los materiales a la línea de disgregación manual.
- Prensas automatizadas, conectadas a los asilos de disgregación.
- Un imán para recuperación de metales ferrosos.
- Separador de corriente de Foucault para recuperación de aluminio.
- Sensores ópticos para separar los plásticos en diferentes tipos: PVC, PE, PET.

En cuanto al sistema de tratamiento de la fracción orgánica, se toman las mismas consideraciones técnicas del escenario II, de una planta de compostaje a cielo abierto.

#### ***6.2.3.1. Estimación de desvío de residuos.***

El escenario III creado para Cartagena de Indias pretende realizar el aprovechamiento de la fracción no fermentable y fermentables de los residuos sólidos urbanos, correspondientes a residuos de alimentos (orgánicos), papel, cartón, plásticos, vidrio, metales ferrosos y no ferrosos, estos representan aproximadamente el 96,2% de los residuos generados por la ciudad (Alcaldía Distrital de Cartagena de Indias, 2007, pág. 134).

Si se tiene en cuenta un rechazo del 40% de los materiales procesados y la disposición final en el relleno sanitario de la fracción orgánica fermentable, se obtiene que la diferencia en generación de residuos con respecto al escenario sin aprovechamiento solo representa un 58%, lo cual le permitiría mantener su operación hasta el 2024, aunque si mantiene una

compactación de 1,034 ton/m<sup>3</sup> habría una extensión de su vida útil de aproximadamente 7 meses (Ver Tabla 18).

**Tabla 18 Proyección de extensión de vida útil del relleno sanitario con tratamiento por MRF+Compostaje**

Variables	MRF	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	800,00	1.034,00
Volumen acumulado sin aprov. 2016-2025 (m3)	6.597.682,43	5.104.589,89
Volumen acumulado con inc. 2016-2025 (m3)	2.789.500,13	2.158.220,61
Capacidad remanente de módulos (m3)	2.479.098,50	2.479.098,50
Porcentaje de reducción	58%	58%
Capacidad disponible a 2025 (m3)	-310.401,63	320.877,89
Capacidad disponible a 2025 (ton)	-248.321,31	331.787,74
Extensión a vida útil (mes)	-	7,24
Extensión a vida útil (años)	-	0,6
Año de cierre	2024	2026

**Fuente:** Elaboración del Autor

### **6.2.3.2. Estimación de la producción de GEI.**

Para la estimación de los GEI por consumo de energía eléctrica en el escenario III, se empleó el Factor de Emisión del Sistema Interconectado Nacional –SIN- para cálculo de huella de carbono<sup>13</sup>, siendo de 0,20 tCO<sub>2</sub> por cada Mwh empleado (UPME, 2013, pág. 22), es importante anotar, que a parte del Dioxido de Carbono no se registra otros GEI en esta tecnología, correspondiendo este consumo a la demanda energetica del sistema de separacion mecanica (MRF).

Una planta de separación emplea entre 15 y 20 kWh en energía eléctrica por toneladas de residuo procesado, dependiendo su mayor o menor consumo al grado de mecanización (EPEM S.A., 2015). El Escenario de MRF diseñado para Cartagena se entiende que es de alta intensidad mecánica para tener una alta recuperación de los residuos, por lo que, se tomó para la estimación el límite superior de 20 kWh/ton.

<sup>13</sup> De acuerdo a la UPME (2013) “los Factores de Emisión para proyectos MDL y para Huella de Carbono son diferentes y su cálculo tiene aplicaciones diversas y específicas para cada caso”.

Entre las consideraciones para el cálculo de los GEI, no se tomó en cuenta las emisiones por la descomposición de los residuos sólidos que se procesen en el sistema, ni las emisiones de los vehículos o maquinaria que opere con combustibles líquidos.

Con referencia a la generación de GEI de la segunda corriente de tratamiento, se tomaron los datos de emisiones calculados en el escenario II de tratamiento biológico por compostaje.

Al efectuar el cálculo del sistema MRF complementado con compostaje se encuentra que habría una reducción en emisiones de GEI de un 37% con respecto a las que se generarían en un escenario sin aprovechamiento, no emitiéndose en total 1.458.560,33 tCO<sub>2</sub> (Ver tabla 19).

Es de resaltar que el aporte de GEI de la planta MRF y del sistema de compostaje son pequeñas, siendo la mayor parte de GEI generados en la disposición final.

**Tabla 19 Emisiones reducidas escenario**

<b>EMISIONES REDUCIDAS ESCENARIO III 2016-2025 (tCO<sub>2</sub>e)</b>	
E. de la planta de MRF	695,03
E. de Relleno sanitario con MRF	2.455.127,63
Emisiones totales	2.455.822,67
E. de Relleno sanitario sin Aprovechamiento	3.914.383,00
Emisiones reducidas	1.458.560,33
Porcentaje de reducción	37%

**Fuente:** Elaboración del Autor

### ***6.2.3.3. Proyección de generación de lixiviado.***

De igual forma a las otras tecnologías valoradas, se simula la generación de lixiviado por medio del el modelo CORENOSTÓS (Echeverry & Collazos, 2017), la simulación se realizó a partir de la entrada en operación de un sistema MRF en el año 2016 hasta la fecha de cierre según licencia ambiental (2025).

Como en los otros sistemas, al haber un desvío de residuos para aprovechamiento, la composición final de los residuos a disponer sufre un cambio en su composición física, por tanto, y se efectúa doble corrida del modelo, una correspondiente a al periodo 2005- 2015 y otra a partir del año 2016.

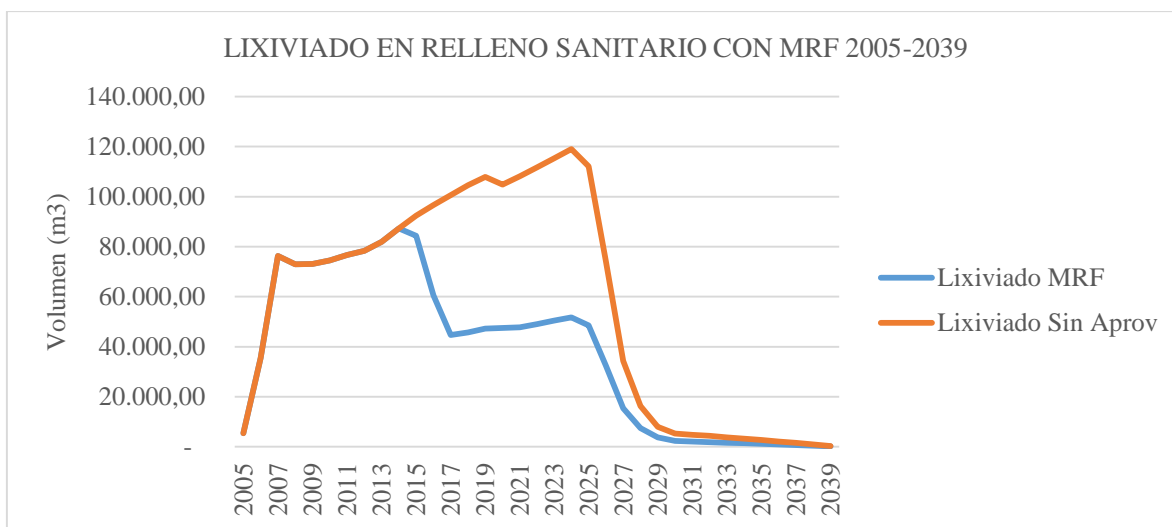
La simulación en el modelo CORENOSTÓS se realizó bajo los siguientes supuestos generales:

- Los residuos a disponer corresponden a los rechazos del sistema de tratamiento, por lo que hay un cambio en la composición física de los residuos a disponer, por tanto, se realiza corrección de la composición física teniendo en cuenta el rechazo del sistema de MRF y compostaje (Ver Anexo 9 y 10).
- El promedio multianual de precipitaciones y evaporación del relleno sanitario, son iguales a los del distrito de Cartagena de indias.
- Se asumió inicio de operación con sistema MRF con sistema de compostaje el 1 de enero de 2016 y finalización de operación el 31 de diciembre de 2024.
- El pesaje del año 2005 fue igual al del 2006, dado que Caribe Verde S.A. E.S.P. no suministro pesaje real del año 2005.
- El dato de área intervenida mensual fue calculada a partir de los datos anuales (2006-2015) de residuos dispuestos suministrados por Caribe Verde S.A. E.S.P. Los correspondientes a los años 2016 a 2024, fueron calculados a partir de la proyección de volúmenes realizada (Ver Anexo 4), es decir, son datos teóricos.
- Se realiza cobertura diaria con arcilla, guardando una pendiente del 3%.
- Densidad de compactación de  $1034 \text{ ton/m}^3$ , de acuerdo al histórico.
- Se tomó el tiempo teórico de eversuria de 15 años, tiempo en que se considera que los residuos dispuestos ya no representarían un problema ambiental según lo recomendado en el modelo CORENOSTÓS (Echeverry & Collazos, 2017). Por lo anterior, la simulación establece una producción de lixiviado por 35 años (proyección 2005-2039).

Al correr el modelo, este arroja un caudal estimado de  $0,2446 \text{ m}^3$  por tonelada de residuos a descomponer en el periodo 2016-2024, correspondiendo este volumen a la generación de lixiviado del relleno sanitario existente a partir de la entrada en operación del sistema de aprovechamiento en el año 2016.

El caudal estimado se basó en una expectativa de descomposición del 50% de los residuos dispuesto y una de composición de los residuos aproximada a 77% putrescible, 6% papel, 2% textiles, 1% jardinería y 14% otro tipo de residuos.

Como se muestra en la figura 12, hay una considerable variación en la producción de lixiviado, en un escenario sin y con MRF con compostaje, evidenciándose una conducta similar al del escenario II.



**Figura 12 Producción de lixiviado sin aprovechamiento vs aprovechamiento con MRF con Compostaje 2005-2039**

De acuerdo a la tabla 20, la producción de lixiviado entre el año de apertura del relleno sanitario (2005), el año de cierre de acuerdo a la licencia ambiental (2024) y la entrada en operación de una sistema de compostaje en el año 2016, sería de 1.621.990,09 m<sup>3</sup>, correspondiendo al 86% de la producción total de lixiviado al 2039. Es importante resaltar que en el total se consideró la producción de lixiviado generada por los residuos dispuestos antes del 2016.

Si se compara con la proyección de generación del escenario sin aprovechamiento (Ver Figura 12) la producción de lixiviado en este escenario equivaldría al 95% de la producción



en un escenario sin MRF, habiendo una reducción en el periodo 2005-2039 de 107.347,24 m<sup>3</sup> (5%).

**Tabla 20 Producción de lixiviado en el relleno sanitario con MRF 2005-2039**

<b>Año</b>	<b>Residuos dispuestos (Ton/año)</b>	<b>Lixiviado (m<sup>3</sup>/año)</b>
2005	268.734	5.360,59
2006	268.734	35.482,33
2007	280.882	76.265,88
2008	290.943	72.896,84
2009	303.536	73.039,68
2010	322.485	74.544,98
2011	316.526	76.686,39
2012	318.296	78.342,31
2013	348.372	81.953,53
2014	374.149	87.257,01
2015	391.445	84.341,15
2016	170.087	60.573,52
2017	176.014	44.722,49
2018	181.970	45.717,68
2019	187.930	47.198,17
2020	193.883	47.469,60
2021	200.222	47.761,60
2022	206.519	49.055,69
2023	212.907	50.372,40
2024	219.384	51.701,53
2025	0	48.548,21
2026	0	32.343,57
2027	0	15.344,17
2028	0	7.483,84
2029	0	3.764,08
2030	0	2.359,20
2031	0	2.026,29
2032	0	1.814,34
2033	0	1.595,12
2034	0	1.368,62
2035	0	1.134,84
2036	0	893,51
2037	0	644,47
2038	0	387,66
2039	0	122,98
<b>Generación total</b>		<b>1.305.213,67</b>

**Fuente:** Elaboración del Autor

### **6.3. Valoración Económica Ambiental**

Para la determinación de la viabilidad económica ambiental de las alternativas de aprovechamiento de residuos sólidos ordinarios analizadas, se emplea la herramienta de evaluación económica Análisis Costo Beneficio (ACB), en la cual, se realiza una comparación del Valor Presente Neto (VPN) de beneficios y costos de cada escenario, esto con el fin de determinar la alternativa que da mayores beneficios a la sociedad.

Para la obtención del resultado se emplea la metodología planteada en el manual “*Metodología general para la presentación de estudios ambientales*”, desarrollada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (El actual Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS-).

De forma inicial, se realizó un análisis de costos, con estimaciones a nivel de pre-factibilidad empleando datos de información secundaria obtenidos del estudio: “*Estudio de técnicas alternativas de tratamiento, disposición final y/o aprovechamiento de residuos sólidos - propuesta de ajuste decreto 838 de 2005*” realizado por MAG CONSULTORIA – DNV.GL. (2016).

De igual forma, se realiza una estimación económica de los beneficios ambientales, siendo estimados con valores directos de mercados existentes y de acuerdo a la generación o reducción de impactos en cada uno en los escenarios de aprovechamiento.

Por último, se procedió a realizar el Análisis de los costos y beneficios ambientales directos de las alternativas de aprovechamiento y/o tratamiento por incineración, compostaje o planta de separación mecanizada con aprovechamiento de orgánicos, considerándose los impactos ambientales positivos sobre el relleno sanitario Parque Ambiental Loma De Los Cocos.

#### **6.3.1. Análisis de costos de implementación de las alternativas de aprovechamiento.**

A continuación se presentan los resultados de la estimación de costos a nivel de pre-factibilidad de cada uno de los escenarios de aprovechamiento. Se resalta que todos los datos empleados corresponden a información secundaria con fecha de 2015, dado que en Colombia aún no se ha desarrollado ninguna de las técnicas analizadas a gran escala. Efectuándose ajustes en la proyección de generación de residuos de acuerdo a producción per cápita del Distrito de Cartagena de Indias y el crecimiento poblacional (Ver Anexo 3).

En el Anexo 12, 13 y 14 se muestran la base de cálculo de costos construido para cada escenario, con el flujo de fondos financiero de las alternativas.

Entre los principales costos que se consideraron en el análisis financiero de cada tecnología se encuentran:

- Costos de pre-inversión, dentro del cual se incluye tramite y permisos que representan respectivamente el 0,50% y el 0,25% de la inversión;
- Costos inversión, se relaciona la infraestructura requerida y la maquinaria a emplear por tecnología;
- Costos de operación, en estos se relacionan los costos asociados al sistemas de control emisiones y los costos del tratamiento de los residuos que resultan del uso del tipo de tratamiento;
- Costos de mantenimiento, se incluye costos de reparación o mantenimiento de las instalaciones;
- Costos de personal durante el periodo de análisis.

Por otra parte, se relaciona la estimación de los ingresos potenciales por comercialización de subproductos o residuos valorados, contemplándose la generación de electricidad, combustibles derivados de residuos (CDR), reciclables, compost, entre otros. Así mismo, dentro de los ingresos se consideró el ingreso por tarifa del servicio público de aseo.

En el aspecto de ingresos por tarifa, es importante anotar que se encuentra regulado por la Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) mediante la Resolución CRA 720 de 2015, estableciéndose en su artículo 31, que el costo a trasladar al usuario por concepto de tarifa del servicio tratamiento de residuos con una alternativa de aprovechamiento distinta a relleno sanitario no puede exceder la tarifa de disposición final de este último, es decir, se puede cobrar por medio de tarifa los costos de tratamiento con tecnología alternas pero a precio de relleno sanitario, haciendo caso omiso al hecho de que posiblemente los costos financieros de las tecnologías sean mayores a los de un relleno sanitario (MAG CONSULTORIA – DNV.GL, 2016, pág. 48).”

#### ***6.3.1.1. Supuestos considerados.***

Los costos e ingresos de cada escenario se estimaron a partir de los siguientes supuestos generales:

- a. El tamaño de la planta se determinó teniendo en cuenta el promedio de 10 años de la producción de los residuos ordinarios del Distrito entre el 2016 y el 2025.
- b. En el cálculo de flujo de efectivo se contempla un incremento año a año de los costos operacionales, dado por el promedio de la variación del Índice de Precios del Productor -IPP- entre los años 2000 y 2014, correspondiendo a 3,5% (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2017).
- c. Se empleó la estructura general del flujo de efectivo planteado en proyecto “*Estudio de técnicas alternativas de tratamiento, disposición final y/o aprovechamiento de residuos sólidos - propuesta de ajuste decreto 838 de 2005*” realizado por MAG CONSULTORIA – DNV.GL. en el 2016, ajustándose tamaño de la planta, composición física de los residuos.
- d. El costo de la pre-inversión corresponde a un porcentaje sobre el costo de la infraestructura y maquinaria.
- e. Se considera el crecimiento poblacional y el aumento de la producción per-cápita en la cantidad de residuos procesados.
- f. Se toma horizonte de 10 años para análisis financiero.
- g. Para el caso de la tecnología de Incineración se mantienen los supuestos empleados sobre la disposición final de cenizas (volátiles, de fondo y del sistema de tratamiento de gases), en el que se asume que carecen de características peligrosas, por lo que pueden ser dispuesto en el relleno sanitario.
- h. Se establece como ingreso la tarifa techo de disposición final, entendiendo que esta no refleja los costos reales de los escenarios de aprovechamiento sino los costos de disposición final en relleno sanitario.
- i. En el cálculo tarifario se asume que la regulación del régimen tarifario se mantiene en el tiempo y por fines prácticos de calcula sobre el promedio de residuos que se procesaran pro tecnología en un periodo de 10 años.
- j. En el caso del escenario de tratamiento biológico por Compostaje, no se considera en el análisis financiero, ingresos por comercialización de subproductos (compost), dado que en la actualidad el mismo carece de mercado bien definido y esto podría generar una falsa expectativa en los ingresos. No obstante, el mismo puede ser aprovechado en actividades de estabilización de suelos, abonado de zonas verdes o cobertura del relleno sanitario.
- k. En el escenario de tratamiento por MRF y Compostaje, los costos corresponden a la sumatoria de todos los costos de MRF más los Costos establecidos para el escenario de

compostaje. Entre los ingresos de esta tecnología se relacionan los posibles ingresos por venta de CDR y venta de reciclables.

- I. En el cálculo de del VPN se emplea para su estimación la Tasa Social de Descuento recomendada por el Departamento Nacional de Planeación, la cual se establece en un 12%.

### **6.3.1.2. Análisis financiero de alternativas de tratamiento.**

Para el análisis financiero en los flujos de fondos se consideran ingresos por comercialización de subproductos, los cuales varían de acuerdo al tipo de tecnología y la cantidad de residuos a procesar en el tiempo (Ver tabla 21).

**Tabla 21 Recursos valorizados por cada tecnología**

Tecnología	Subproducto	Valor Unitario	Unidad	Tamaño 1
<b>Escenario I Incineración</b>	Energía (generación)	\$138.086/MWh	MWh/ton	0,56
	Reciclables (Ferrosos y No Ferrosos)	\$450.000/Ton	ton/ton	0,0002
	Reciclables (Ferrosos y no Ferrosos)	\$450.000/Ton	ton/ton	0,0002
<b>Escenario II Compostaje al Aire Libre</b>	Compost / Enmienda Orgánica	-	ton/ton	-
<b>Escenario III Tratamiento Mecánico</b>	Vidrio	\$65.753/Ton	ton/ton	0,02
	RDF (Combustible derivado de residuos)	\$4,3/MBTU	MBTU/ton	2.338,52
	Metales	\$450.000/Ton	ton/ton	0,01

Nota: Datos tomados de Tabla 23. Recursos Valorizados por Cada Técnica. Informe *Estudio de técnicas alternativas de tratamiento, disposición final y/o aprovechamiento de residuos sólidos - propuesta de ajuste Decreto 838 de 2005* realizado por MAG CONSULTORIA – DNV.GL.

**Fuente:** (MAG CONSULTORIA – DNV.GL, 2016)

De igual forma se consideran los ingresos por tarifa de disposición final, la cual fue estimada de acuerdo a los artículos 28, 31 y 32 de la Resolución CRA 720 de 2015 (Ver tabla 22), sobre el promedio de los residuos a procesar por la tecnología en el periodo de 10 años, estimándose en \$27.101 en el escenario I; \$28.612 en el escenario II y en 26.968 en el escenario III.

En cuanto a los costos (Ver Anexo 12, 13 y 14), se asume una única inversión de capital en el tiempo y costos permanentes operacionales (operación, mantenimiento y personal).

En la tabla 22 se relaciona el flujo de fondos de cada escenario diseñado, con los cálculos de VPN, el cual se estima sobre una tasa social de descuento del 12% y el cálculo de la TIR.

**Tabla 22 Flujo de fondos de escenarios de aprovechamiento**

AÑO	Escenario I Incineración	Escenario II Compostaje	Escenario III MRF+Compostaje
0	-613.476.676.255	-7.085.855.756	-68.175.289.841
1	17.259.457.566	5.892.214.107	4.996.566.141
2	17.856.931.148	6.097.072.973	5.169.801.464
3	18.429.966.484	6.299.708.385	5.337.813.131
4	18.971.435.564	6.498.743.235	5.498.857.139
5	19.476.946.127	6.693.370.560	5.651.871.424
6	20.045.378.508	6.904.178.320	5.821.498.019
7	20.566.950.898	7.108.537.058	5.980.447.191
8	21.073.643.326	7.313.184.951	6.136.712.779
9	21.564.138.837	7.517.967.206	6.290.002.706
10	22.037.074.382	7.722.723.615	6.440.014.672
<b>VPN</b>	-504.762.550.828,70	30.312.324.128,14	-36.616.870.860,24
<b>TIR</b>	Negativo	86%	-2,92%

Nota: Se emplea para el cálculo del VPN una TSD de 12%.

**Fuente:** Elaboración del Autor

La variable VPN muestra que para el escenario I de tratamiento térmico por incineración, se generan mayores costos que beneficios por lo que a nivel financiero no es un proyecto que genera rentabilidad, esta alternativa para alcanzar viabilidad demandaría apoyo del Estado por medio de subsidios o ajustes al régimen tarifario que permita recuperar por tarifa los altos costos de inversión y operacionales.

A diferencia del escenario I, el tratamiento de los residuos ordinarios por medio del compostaje (escenario II) muestra que es un proyecto que generaría unos beneficios económicos en el periodo analizado de \$30.312.324.128, por lo que, se identifica como un proyecto viable para invertir, por otro lado la TIR muestra un rendimiento del proyecto del 86% muy por encima de la TSD dada por el DNP, concluyendo que una inversión en un Sistema de compostaje a Cielo abierto en Cartagena de Indias podría superar la rentabilidad mínima establecida por el DNP, para proyectos de inversión social.

Por último para el Escenario III, se estima un rendimiento negativo del -2,92% (TIR) para el periodo analizado concluyendo que para un periodo de 10 años no habría recuperación de la inversión ni se encontraría rentabilidad.

### **6.3.2. Determinación monetaria de costos y beneficio ambiental de los escenarios.**

En la evaluación económica y ambiental de cada escenario de tratamiento, se considera el flujo de costos y beneficios ambientales, para esto se tuvo como referente la “*Estructura de beneficios y costos en el ABC*” de la Metodología general para la presentación de estudios ambientales (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010, pág. 26).

En la estructura de costos se considera la pre-inversión (estudios, licencias y demás permisos ambientales), inversión inicial, los costos de operación (se incluyen costo de monitoreo ambiental) y mantenimiento. A diferencia del análisis financiero, se realiza exclusión de los costos asociados a personal, siendo estos incluidos como beneficio social del proyecto (generación de empleo).

Dentro del flujo de beneficios se relacionan: ingresos por tarifa, aun cuando estos no cubren los costos medios de la operación; venta de subproductos, o residuos valorizados; generación de empleo, correspondiente a los costos del personal; ingresos por venta de CER, correspondiente a la emisiones evitadas por la entrada en operación de la opción tecnológica; costos evitados por tratamiento de lixiviado; y por último, extensión de vida útil del relleno sanitario, teniendo en cuenta el área que se dejaría de impactar.

Para la determinación del costo de los beneficios ambientales por gestión de lixiviado, reducción de emisión de gases de efecto invernadero –GEI- y vida útil del relleno, se tuvo en cuenta valores de uso de mercado y la modelación realizada en el numeral 6.2.

Se resalta que las tres últimas variables corresponden a los impactos ambientales significativos generados por la operación del relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos.

### **6.3.2.1. Costos por gestión de lixiviado.**

Para la determinación de los *costos por gestión de lixiviado*, se emplearon los costos en los que se deben incurrir en tratar una unidad volumétrica de lixiviado por una opción tecnológica que dé cumplimiento estricto a la Resolución 631 de 2015, en el que “*se establecen los parámetros y sus límites máximos permisibles de vertimiento puntuales a cuerpos de agua superficiales*”.

Las consideraciones para los cálculos de los costos por tratamiento correspondieron a:

- Uso de una planta de osmosis inversa como unidad de tratamiento de lixiviado, con la que se daría cumplimiento a los parámetros de vertimientos establecidos para relleno sanitario en la norma de vertimiento (Resolución 631 de 2015).
- El costo de tratamiento corresponde a \$24.000 por metro cubico de lixiviado tratado (Mazo, 2017), correspondiendo al costos global de operación de un sistema de tratamiento por osmosis inversa para un relleno sanitario como el de Cartagena de Indias. Este precio omite los costos de tratamiento del rechazo del sistema de osmosis inversa.
- No se consideran dentro de los cálculos, costos de mantenimiento de piscinas de almacenamiento, costos de extracción activa de lixiviado de la masa de residuos, ni gastos de control de fugas en la masa.
- Se asume que no hay perdidas de lixiviado por fugas de la masa, por ende, la totalidad del lixiviado llegaría a las piscinas de almacenamiento.
- En los cálculos se toma como beneficio los costos por tratamiento de lixiviado en los que dejaría de incurrir el relleno sanitario.
- Se omiten los costos de tratamiento en los que se deben dar en la etapa de post clausura del relleno.

### **6.3.2.2. Costos de las emisiones atmosféricas**

Para la determinación de *costos de las emisiones atmosféricas* en el mercado, se emplea el mercado de emisiones o sistema *cap-and-trade*, creado como mecanismo para cumplir las metas de emisiones atmosféricas dentro del protocolo de Kioto.



- En los cálculos se toma como beneficio los ingresos por venta de CER`s.
- Para el cálculo se emplea el valor promedio de los certificados de reducción de emisiones (CERs) del año 2015 en un mercado primario<sup>14</sup>. Con precio de venta de €0,39 (Sistema Europeo de Negociación de CO2, 2017).
- Se asume la firma de un “Acuerdo de Compra Venta de Reducción de Emisiones” con un comprador.
- El análisis se realiza con los emisiones atmosféricas de gases de efecto invernadero – GEI- en el periodo 2016-2025 por cada tecnología calculados en el Capítulo IV. Para efectos de cálculo, no se consideraron las emisiones de GEI, que se darán en el periodo de posclausura del relleno, ni los costos de inversión y operación que amerita una extracción activa de biogás.

### **6.3.2.3. Costos por área demandada.**

Para la estimación de los *costos por área demandada* por cada escenario, incluido el escenario sin aprovechamiento, se emplean los datos de los numerales de *Estimación de desvío de residuos* del numeral 6.2.

- La demanda de terreno se realiza a partir del área requerida para la disposición final de los residuos sólidos en el periodo 2016-2025, que corresponden a los años del inicio en operación de los sistemas de tratamiento y el año de cierre del relleno sanitario de acuerdo a la licencia ambiental.
- No se considera la capacidad volumétrica remanente real del relleno sanitario, sino la demanda volumétrica (capacidad de disposición final) para disponer hasta el 2025.
- Para la determinación del valor del área donde se encuentra el Relleno Sanitario, se empleó el avalúo catastral del predio Los Cocos, emitido por la Alcaldía de Turbana-Bolívar en el año 2016. En este se ubica al predio en el uso agropecuario, con un área de 65 Ha, dándole un avalúo de mil cuarenta y dos millones novecientos ochenta y cuatro mil pesos colombianos (\$1.042.984.000).

---

<sup>14</sup> El mercado primario de CERs, corresponde a venta de CERs que se emitirían en un futuro, es decir, se celebran contratos a futuro de CERs que no han sido emitidos.

### 6.3.3. Relación beneficio costos de escenarios.

En la tabla 23 se incluyen los resultados de las estimaciones de los indicadores VPN Beneficios, VPN Costos y la Relación Beneficio/Costo. Dichas estimaciones se realizaron bajo distintos TDS, para observar la sensibilidad de la relación costo beneficio ante esta variable.

**Tabla 23 VPN de los costos y beneficios en escenarios**

Tecnología	TSD	VPN Beneficios	VPN Costos	Relación B/C
<b>Escenario I Incineración</b>	12%	\$ 301.752.333.527,31	\$ 759.463.081.099,10	0,40
	6%	\$ 399.103.155.167,59	\$ 794.726.732.563,32	0,50
	1%	\$ 520.587.840.497,08	\$ 843.696.197.157,02	0,62
<b>Escenario II Compostaje</b>	12%	\$ 69.852.545.109,25	\$ 19.678.974.483,93	3,55
	6%	\$ 87.390.423.230,03	\$ 21.376.033.300,97	4,09
	1%	\$ 100.935.768.307,69	\$ 24.357.528.595,79	4,14
<b>Escenario III MRF+Compostaje</b>	12%	\$ 76.650.879.469,02	\$ 42.934.396.027,33	1,79
	6%	\$ 95.859.227.975,97	\$ 55.976.893.293,88	1,71
	1%	\$ 110.720.734.809,18	\$ 62.589.805.103,24	1,77

Fuente: Elaboración del autor

Del análisis de la tabla 3 es posible inferir que el Escenario I, en donde se plantea el uso de la tecnología de incineración tipo parilla, no es económicamente viable una inversión, es decir, que teniendo en cuenta los beneficios, costos y los supuestos de la modelación, esta alternativa no es viable para la gestión de los residuos sólidos ordinarios del Distrito de Cartagena porque los costos de inversión principalmente, no alcanzan a cubrir los beneficios asociados a esta tecnología.

Para el caso del Escenario II, se puede observar que el compostaje es viable económicamente bajo todas las TSD consideradas, siendo el escenario en el cual se obtendría mayores beneficios para la sociedad. No obstante, se resalta que esta opción tecnológica fue diseñada bajo supuestos, como la buena clasificación de los residuos orgánicos de material peligroso o inhibidores de los procesos biológicos.

Finalmente el Escenario III, la relación beneficio costos determina la viabilidad económica de una planta de separación mecanizada complementada con un sistema de tratamiento biológico (compostaje) tiene viabilidad económica y social, para los distintos TSD calculados.

Podemos resumir que de acuerdo a este método de valoración económica ambiental (análisis costo/beneficio) que, aun cuando las alternativas de aprovechamiento contempladas otorgan beneficios ambientales sobre el relleno Sanitario parque Ambiental loma de los Cocos y a la población de su área de influencia, estos podrían no compensar los altos costos de inversión y operacionales, salvo la alternativa de compostaje.

La alternativa del compostaje demostró tener una alta rentabilidad, aun cuando no haya venta de subproductos (compostaje), esto asociado principalmente a que los costos medios de operación se asemejan a la tarifa de disposición final en relleno sanitario, situación que le permite recuperar la inversión.

Para ultimar este estudio, a continuación se muestran las conclusiones y recomendaciones, con el fin de dar a conocer los resultados globales del análisis de valoración económica ambiental realizada en el presente estudio, así como algunos puntos a considerar para determinar la pertinencia financiera y ambiental de las alternativas de aprovechamiento analizadas.

## 7. Conclusiones y Recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

El análisis económico y ambiental efectuado en el presente estudio, evaluó la viabilidad de realizar alternativas de aprovechamiento (identificadas como viable para Colombia) en el Distrito de Cartagena de Indias, a la vez permitió cuantificar de forma precisa los costos de los beneficios ambientales identificados sobre el relleno sanitario.

En el proceso de cuantificación de los beneficios ambientales (numeral 6.2.) se pudo establecer que todos los proyectos de aprovechamiento analizados aportan beneficios en cuanto a reducción de impactos ambientales asociados a la gestión de residuos por medio de la técnica de relleno sanitario.

También se pudo establecer que, el punto crítico de selección entre las alternativas se define en los costos de inversión, costos operacionales y también a las condiciones técnicas de presentación y recolección de los residuos.

Si solo se realiza un análisis puntual de los beneficios ambiental, se podría concluir que el Escenario I de incineración sería ambientalmente la tecnología más conveniente por aporta los mayores desvíos de residuos, que se traducen en el aumento de 7 años<sup>15</sup> de vida útil del relleno sanitario Parque Ambiental Loma de los Cocos hasta el 2027; reducción del 56% de generación de lixiviado y de 26,8% en generación de GEI, con respecto a la generación que se daría en el mismo periodo en el relleno sanitario sin aprovechamiento.

Aun con lo anterior, al incluir en el análisis el aspecto económico (los costos operativos y de inversión), se encuentra que para una tecnología como la incineración, los costos son tan elevados que aun con los beneficios ambientales asociado no se alcanza a recuperar la inversión en un periodo de 10 años, es decir, que aun cuando hay altos beneficios ambientales, este escenario no es viable para Cartagena de Indias porque no sería rentable.

---

<sup>15</sup> Extensión de vida útil del relleno sanitario teniendo en cuenta la capacidad volumétrica remanente estimada hasta diciembre de 2015, y manteniendo una densidad de compactación de residuos de 1034 kg/m<sup>3</sup>.

La forma de establecer viabilidad de esta tecnología en Cartagena, sería realizando ajustes a la regulación tarifaria del sistema de aseo, para que esta refleje los costos reales de este tipo de tecnología y/o que el Estado incentive esta tecnología a través de subsidios, es decir, sea cual sea la vía para viabilizar este tipo de tecnología, los usuarios tendrían que asumir costos más elevados para disposición final que los actualmente establecidos con un relleno sanitario.

Para el caso del Escenario III, una MRF complementados con un sistema de compostaje, desde una perspectiva ambiental esta podría ser viable por la reducción en la generación de lixiviado (reducción del 35%), el área evitada de disposición (5 años de extensión de vida útil) y los GEI evitados (reducción del 37%). Pero desde una visión económica, este Escenario no aportaría una rentabilidad en un periodo de 10 años.

Aun así, se considera que de las opciones tecnológicas analizadas, los subproductos (CDR) que se pueden obtener del Escenario III tienen mayor potencial de venta, considerando que el Relleno Sanitario se encuentra cerca del sector industrial de Cartagena, habiendo compañías que podrían tener interés en el CDR a producir.

En el aspecto ambiental, el Escenario II no es el sistema que aporta mayores beneficios ambiental de los sistemas analizados, aun así este permitiría una extensión de la vida útil del relleno sanitario de 4 años con respecto a la vida útil real, permitiendo a la vez una reducción en generación de GEI del 17%, y una reducción de generación de lixiviado de 34%, la cual es muy similar a la del escenario III.

Un sistema de Compostaje a cielo abierto para Cartagena de indias, sin internalizar los beneficios ambientales ni tener ingresos por venta de subproductos, es una opción tecnológica que podría generar una alta rentabilidad.

En cuanto a la valoración económica ambiental del Escenario II de compostaje, esta es la opción tecnológica que otorgaría los mayores beneficios económicos al Distrito, siendo de los tres (3) escenarios analizados el único que alcanza a tener niveles de rentabilidad por encima de la TSD para proyectos de inversión social.

La viabilidad del compostaje, se asocia a que esta demanda menor inversión inicial y a que los costos medios de operación se asimilan a los posibles ingresos por tarifa.

No obstante, hay dificultades a nivel operativo que deben considerarse para efectuar un sistema de compostaje a gran escala, dado que se debe garantizar la ausencia de inhibidores del proceso biológico y el Distrito a la fecha del estudio, no cuenta con un sistema de recolección selectiva de residuos ordinarios ni con su población capacitada.

Por lo anterior, el Distrito de Cartagena de Indias debe establecer posturas que sean acorde a las directrices nacionales en cuanto a la gestión integral de los residuos sólidos, en donde se está promoviendo la inclusión de economías circulares que permitan aumentar las tasas de aprovechamiento (Departamento Nacional de Planeación, 2016).

Sumado a eso, la política pública local de residuos sólidos domiciliarios debe atender las directrices de la Corte Suprema de Justicia que da en su Sentencia T-724 de 2003, en la que determina la necesidad de establecer Acciones Afirmativas a favor de los *Recicladores de Oficio*<sup>16</sup>, por ende, el Distrito debe considerar no solo la rentabilidad económica y ambiental para el desarrollo de alternativas de aprovechamiento de residuos sólidos, sino que también la rentabilidad o beneficios sociales no cuantificables de forma monetaria.

Dicha rentabilidad social, podría verse materializada en el establecimiento y aplicación de instrumentos que permitan la formalización y vinculación de los Recicladores de Oficios del Distrito como personas prestadoras de servicios en la cadena de aprovechamiento, los cuales podrían vincularse tanto en las actividades de segregación, recolección, transportes, como en el acondicionamiento del material a procesar.

---

<sup>16</sup> De acuerdo a la Artículo 2º del Decreto 596 de 2016, un Reciclador de oficio es una “*Persona natural que realiza de manera habitual las actividades de recuperación, recolección, transporte, o clasificación de residuos sólidos para su posterior reincorporación en el ciclo económico productivo como materia prima; que deriva el sustento propio y familiar de esta actividad*”.

## **7.2.Recomendaciones**

En la selección de una opción tecnológica de aprovechamiento, es pertinente considerar los ajustes operativos a nivel de presentación, recolección y transporte de los residuos, dado que esta debe ser ajustada para garantizar la obtención de los beneficios ambientales estimados.

Por otra parte, está claro que hay opciones tecnológica que no demandan una estricta separación de los residuos como lo son la Incineración y el sistema MRF + Compostaje, que si bien no presentan rentabilidad, en ese aspecto, son tecnologías que se ajustan a una realidad de separación deficiente. A diferencia del Compostaje, en el cual gran parte de su éxito depende de la buena calidad de los residuos que entran al sistema.

Se recomienda complementar el estudio, para que se consideren los ajustes a nivel operativo y de gestión municipal en los que deben incurrir para que la tecnológica de compostaje a cielo abierto a gran escala sea exitoso, es decir, se recomienda considerar los costos de inversión en formación a la ciudadanía y cambio de esquema de recolección y transporte, al igual que identificar los beneficios sociales intrínsecos a esos ajustes.

De igual forma, sería pertinente que el Distrito de forma anticipada establezca políticas públicas que permitan fortalecer el mercado de los subproductos de residuos, y que a nivel nacional, se realice un ajuste al régimen tarifario, para que este reconozca los costos reales de disposición o tratamiento de las tecnologías de aprovechamiento.

## 8. Literaturas citadas

- Alcaldía de Cartagena de Indias. (2015). *Plan de gestion integral de residuos Sólidos (PGIRS) 2015*. Cartagena de Indias D.T. y C.
- Alcaldía Distrital de Cartagena de Indias. (2007). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Distrito de Cartagena* (Vol. III). Cartagena De Indias D.T. y C.
- Alcaldía Distrital de Cartagena de Indias. (2015). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Cartagena.
- Bermejo, R. (1997). Libre mercado versus desarrollo. *Donostia-San Sebastián : Eusko Ikaskuntza*, 75-87.
- Bojo, J., Maler, K.-G., & Unemo, L. (1992). *Environment and Development: An Economic Approach*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Carbon BW Colombia S.A.S. (2011). *Descripción del proyecto informe para Caribe Verde S.A. E.S.P.* Bogotá D.C.
- Caribe Verde S.A. E.S.P. (2005). Memoria técnica con los cálculos del diseño, construcción y operación. En *Concesión para la disposición final de los residuos sólidos ordinarios de Cartagena de Indias D.T. y C.: Propuesta Técnica*. Cartagena de Indias D.T. y C.
- Caribe Verde S.A. E.S.P. (2015). *Informe de Cumplimiento Ambiental 2014*. Cartagena de Indias D.T. y C.
- Caribe Verde S.A. E.S.P. (2015). *Registro de densidades*. Cartagena de Indias D.T. y C.
- Carpenter, S. (1991). Inventing Sustainable Technologies. *The Technology of Discovery and the Discovery of Technology: Proceedings of the Sixth International Conference of the Society for Philosophy and Technology*, 481-482.
- Contraloría Distrital de Cartagena de Indias. (2013). *Informe Macro Ambiental 2013*. Cartagena de Indias: Contraloría Distrital.



Correal, M. (2014). *COLOMBIA: Desarrollo Económico Reciente en Infraestructura - Sector Aseo*. Bogotá D.C.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (18 de Septiembre de 2017). *Índice de Precios del Productor -IPP- Históricos*. Obtenido de DANE Información Estratégica : <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-del-productor-ipp/ipp-historicos>

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2014). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018: Todos por un nuevo país*. Bogotá D.C.: DNP.

Departamento Nacional de Planeación. (2016). *Política Nacional para la Gestión de los Residuos Sólidos (Documento CONPES 3874)*. Bogotá D.C.: DNP.

Echeverry, J., & Collazos, H. (Mayo de 2017). CORENOSTOS. Bogotá D.C.

EPEM S.A. (30 de Octubre de 2015). *Waste Control software*. Obtenido de Database of Waste Management Technologies: <http://www.epem.gr/waste-control/database/default.htm>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). Volumen 5. Waste. En IPCC, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (pág. 35).

MAG CONSULTORIA – DNV.GL. (2016). *Estudio de técnicas alternativas de tratamiento, disposición final y/o aprovechamiento de residuos sólidos - propuesta de ajuste decreto 838 de 2005*. Bogota D.C.

Mazo, E. (23 de Junio de 2017). Costos de tratamiento de lixiviado por osmosis inversa. (V. Arellano, Entrevistador)

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Metodología general para la presentación de estudios ambientales*. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2012). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico: TÍTULO F. Sistemas de Aseo Urbano*. Bogotá, D.C.

- Morán, H. (2000). Presupuestos filosóficos del desarrollo sustentable. *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 183-200.
- OECD/ECLAC. (2014). *Environmental Performance Reviews: Colombia 2014*. OECD Publishing.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2004). *Guías para la calidad del agua potable* (Vol. I). Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- Resolución 0229 de 2005, Por medio del cual se otorga una licencia ambiental (Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique -CARDIQUE- 18 de Marzo de 2005).
- Resolución 0631. (17 de Marzo de 2015). Diario Oficial de la Republica de Colombia No. 49.486. Bogota D.C., Colombia.
- Resolución CRA 720. (10 de Octubre de 2015). Diario Oficial No. 49.569 de 10 de julio de 2015. Bogotá D.C., Colombia.
- Shiva, V. (1992). Resources. En W. Sachs, *The Development Dictionary* (pág. 306). Londres: Zed Books.
- Sistema Europeo de Negociación de CO<sub>2</sub>. (16 de Junio de 2017). *Precios CO<sub>2</sub>*. Obtenido de SENDECO<sub>2</sub>: <http://www.sendeco2.com/es/precios-co2>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios - SSPD-. (10 de Marzo de 2016). *Sistema unico de información de Servicios Públicos - SUI-*. Obtenido de Reporte SUI: <http://www.sui.gov.co/SUIAuth/portada.jsp?servicioPortada=3>
- Sutcliffe, B. (2008). Marxismo y Desarrollo. *Mientras Tanto*, 133-154.
- Tchobanoglous, G. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos* (Vol. I). (A. García, Ed.) Madrid, España: McGraw-Hill.
- US Environmental Protection Agency. (17 de Mayo de 2016). *Particulate Matter (PM)*. Obtenido de EPA: <https://www3.epa.gov/pm/health.html>



## 9. Anexos

### Anexo 1. Resultados de aplicación de lista de chequeo basada en el Título F numeral 6 del RAS 2000

PREGUNTAS	CUMPLE	NO CUMPLE	OBSERVACIONES
<b>PARÁMETROS DE DISEÑO</b>			
<b>1. SELECCIÓN DEL MÉTODO</b>			
1.1. ¿el método utilizado para la operación del relleno es uno de los recomendados por el RAS 2000?	x		
1.2. ¿el método seleccionado va acorde a las características topográficas y estudios hidrogeológicos?	x		
<b>2. TRAMA VIAL</b>			
<b>2.1. vías internas</b>			
a) ¿permiten la doble circulación de los vehículos recolectores o de transferencia hasta el frente de trabajo del relleno sanitario?	x		
b) ¿Presentan pendientes menores de 5%?	x		
c) ¿tienen los radios de giro adecuados?	x		
d) ¿hay instalaciones de energía eléctrica que satisfagan las necesidades de iluminación en las señalizaciones exteriores e interiores?	x		
e) ¿La red de circulación interna de ingreso y egreso de vehículos está diseñada para circular en un solo sentido?		x	
<b>2.2. Externa (condiciones mínimas)</b>			
a) ¿El acceso al relleno sanitario es por una vía pública?	x		
b) ¿Es de trazado permanente?	x		
c) ¿Garantiza el tránsito en cualquier época del año, a todo tipo de vehículos que acudan al relleno sanitario?	x		
<b>3. SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN</b>			
3.1. ¿La capa de arcilla del fondo de la masa de relleno es de un espesor superior a 1 metro?		X	información extraída del RTO
3.2. Debe lograrse una masa homogénea con una conductividad hidráulica menor o igual a $1 \times 10^{-7}$ cm/s, compactando el suelo con un contenido de humedad de 2% a 3% por encima de la humedad óptima y con un alto nivel de energía de compactación.		X	
3.3. Para niveles alto y medio alto de complejidad del sistema ¿posee Geomembrana instalada?	x		
3.4. ¿Está establecido un programa de seguridad de la calidad en la construcción para la instalación de la Geomembrana?	x		Corresponde al Plan de la supervisión de la calidad
<b>4. SISTEMAS DE DRENAJE</b>			
<b>4.1. Aguas de escorrentía</b>			

PREGUNTAS	CUMPLE	NO CUMPLE	OBSERVACIONES
<b>4.1.1. Drenaje de aguas lluvias para los niveles de alta complejidad</b>			
4.1.1.1. ¿Se poseen obras de drenaje temporales?	x		Son canales en tierra
4.1.1.2. ¿Las obras de drenaje permanentes están construidos en los límites del relleno para captar el escurrimiento de aguas arriba?	x		
4.1.1.3. ¿los canales están revestidos con material apropiado?		X	no se encuentran revestidos
4.1.1.4. ¿Los canales son diseñados con una velocidad del agua mayor 0.30 m/s?	x		Los diseños se encuentran en la propuesta técnica
4.1.1.5. ¿Los canales de drenaje temporal estan construidos con taludes 3:1 (H:V) y rellenos de grava de 5 cm de tamaño máximo para evitar socavaciones?	x		No se efectúan los rellenos de grava.
<b>4.2. LIXIVIADOS</b>			
4.2.1. ¿hay sistema de drenaje de lixiviado?	x		
4.2.2. ¿El área recolectora cubre la totalidad de la superficie del área impermeabilizada?	x		
4.2.3. ¿el área recolectora posee un estrato de arena de 0.30 m?	x		Según la información contenida en el RTO
4.2.4. ¿La pendiente de los recolectores laterales es mayor de 2%?	x		
4.2.5. ¿están los sumideros ubicados en los puntos más bajos del estrato construido para recolectar el lixiviado?	x		se encuentran registros de control en los vértices de la red de filtros de fondo
4.2.6. ¿Se está usando geotextiles para la retención de finos?	x		
<b>4.3. Drenaje de gases</b>			
4.3.1. ¿Hay mínimo 4 chimeneas por hectáreas?	x		Separación entre chimeneas varia de 30 a 50 metros
4.3.2. ¿Hay mínimo 1 chimenea por modulo?	x		
4.3.3. Para rellenos tipo área ¿las chimeneas están ubicadas en la mayor cota final del módulo relleno y cubierto?	x		
<b>5. DISEÑO DE CELDAS</b>			
<b>5.1. Dimensionamiento</b>			
5.1.1. Para los niveles alto y medio alto de complejidad ¿la altura máxima de la celda diaria es de 3 m incluidos el espesor de los residuos a disponer y el material de cubierta requerido?, (la altura depende de la estabilidad del sitio)		x	La altura de la celda según el RTO es de 4 m con cobertura incluida, no hay estudios que sustente el aumento de la altura. En la Propuesta Técnica, se establece una altura de 2 m.
5.1.2. ¿los taludes guardan pendientes de 3:1?	x		
<b>5.2. Compactación</b>			
5.2.1. ¿Se utiliza equipo pesado para realizar las operaciones de compactación?	x		

PREGUNTAS	CUMPLE	NO CUMPLE	OBSERVACIONES
5.2.2. ¿El número mínimo de pasadas de 3 a 4 por capa?		x	El mínimo que se tiene documentado es de 2 pasadas según RTO.
<b>5.3. Material de cobertura</b>			
5.3.1. para los niveles alto y medio alto de complejidad ¿la capa del material de cobertura de la celda tiene un espesor mínimo entre 0,15 y 0,30 m?	x		Tiene una cobertura de 0,15 m
5.3.2. ¿la frecuencia de cobertura es mínimo a una vez por día?	x		Cobertura permanente
5.3.3. ¿La capa compactada de cobertura debe tener una pendiente comprendida entre el 2% y el 3%?	x		Información suministrada en entrevista por el Director Técnico Operativo, no se encuentra documentado este dato.
5.3.4. ¿Las cubiertas intermedias que sirven de separación a los niveles tiene un espesor mínimo de 0.30 m?		x	Las capas son de 0,15 m según RTO.
5.3.5. Si es usado material impermeable entre capas, ¿hay filtros longitudinales bajantes (intercomunicantes entre niveles)?	x		Se utilizan las chimeneas como filtros intercomunicantes.
<b>6. SUELO DE SOPORTE</b>			
6.1. ¿la limpieza y el desmonte se realiza por etapas conforme con el avance de la obra?	x		
6.2. ¿La nivelación del suelo de soporte y los cortes de los taludes se realiza por etapas conforme con el avance de la obra?	x		
<b>7. ESTABILIDAD DEL RELLENO SANITARIO</b>			
7.1. ¿Se ha calculado el peso unitario del residuo teniendo en cuenta como mínimo la compactabilidad, contribución de la cubierta diaria y humedad de absorción del residuo?		x	Hay cálculos de peso específico, en caracterización de residuos efectuada en el 2014. No se encontró análisis de caracterización de residuos dispuestos.
7.2. ¿se ha realizado pruebas de laboratorio donde se determinen los valores del ángulo de resistencia al corte de los residuos?		x	
7.3. ¿se ha realizado pruebas de laboratorio donde se determinen la cohesión de los residuos?		x	
<b>8. OBRAS COMPLEMENTARIAS</b>			
8.1. ¿La trama vial circundante tiene las condiciones necesarias que permitan el normal desplazamiento de los vehículos recolectores?	x		
8.2. ¿La trama vial circundante se encuentra iluminada?	x		
8.3. ¿La trama vial circundante se encuentra señalizada?	x		
8.4. ¿Está construida una cerca perimetral?	x		
8.5. ¿A la entrada del relleno sanitario se encuentra instalada una caseta de vigilancia (área aproximada de 10 m <sup>2</sup> )?		x	
8.6. ¿Desde la caseta de vigilancia se controla el ingreso de los vehículos?	x		

PREGUNTAS	CUMPLE	NO CUMPLE	OBSERVACIONES
8.7. ¿Desde la caseta de vigilancia se controla el ingreso de calidad del material a descargar?		x	Se cree en la buena fe.
8.8. ¿Se lleva un registro de las entradas y salidas?	x		
8.9. ¿La caseta de vigilancia posee las condiciones estéticas y de confort adecuadas para el personal que desempeña funciones en ella?		x	
8.10. ¿Las dimensiones de la caseta de pesaje tienen un mínimo de 10 m <sup>2</sup> ?	x		
8.11. ¿La superficie de la bascula tiene las dimensiones suficientes y una capacidad acorde para dar servicios a las unidades recolectora o de transferencia de mayor volumen de carga?	x		
8.12. ¿hay una zona de espera para pesaje?	x		
8.13. ¿hay un almacén para guardar equipo, herramientas y materiales conforme los tamaños de los equipos?	x		
8.14. ¿El frente del almacén tiene un patio de maniobras lo suficientemente grande para poder recibir los vehículos que descargarán los materiales?	x		
8.15. ¿se cuenta con un área adicional destinada para el mantenimiento y limpieza de los equipos?	x		
8.16. ¿las oficinas posee las instalaciones sanitarias y elementos necesarios para desarrollar las actividades con eficiencia?	x		
8.17. ¿se posee área de emergencia para la recepción de los residuos municipales, cuando las condiciones climatológicas no permita?	x		
8.18. ¿El área de emergencia tiene la capacidad de operar de manera ininterrumpida durante 3 meses?		x	Solo para operar un mes.
8.19. ¿El terreno del área de emergencia se encuentra impermeabilizado?	x		
8.20. ¿el área de emergencia posee por lo menos obras de drenaje pluvial temporal?	x		
8.21. ¿Hay alguna franja perimetral forestada con especies vegetales de talla y follaje suficiente para reducir la salida de polvos, ruidos y materiales ligeros durante la operación?	x		
8.22. ¿hay una Valla publicitaria de presentación de la obra en construcción que contenga una breve descripción del proyecto y una leyenda cívica?	x		
<b>9. CIERRE Y USO FINAL DEL SITIO</b>			
<b>9.1. COBERTURA FINAL</b>			
El sistema de cubierta está diseñado y construido de acuerdo con los siguientes parámetros:			
9.1.1. ¿el material de cobertura minimiza la infiltración y percolación de líquidos al relleno sanitario durante todo el periodo de posclausura?	x		
9.1.2. ¿está aislado del medio ambiente los residuos sólidos rellenos?	x		

PREGUNTAS	CUMPLE	NO CUMPLE	OBSERVACIONES
9.1.3. ¿hay cárcavas debidas a la erosión ocasionadas por agua de escorrentía?	x		Se efectúan mantenimientos periódicos
9.1.4. en caso de que se dispongan sustancias volátiles peligrosas ¿la cobertura final evita la salida de gases tóxicos en el relleno sanitario?	x		
9.1.5. ¿La construcción del sistema de cubierta tiene en cuenta el asentamiento inicial, mantiene la integridad de la capa impermeable durante los periodos de clausura y posclausura?	x		
9.1.6. ¿hay cubierta temporal que minimice la infiltración en el relleno sanitario para que el sistema de recolección de lixiviados opere apropiadamente? <i>Espesor minimo debe ser 0,30 m</i>	x		
9.1.7. ¿se emplean métodos para prevenir la erosión y la exposición del residuo?	x		Canalización
perfil mínimo de cubierta requerido:			
9.1.8. Para el nivel alto de complejidad, ¿el perfil de cobertura debe contener la capa de control de infiltración, la capa de control de erosión, sistema de recolección de gas y una capa de drenaje?	x		Se poseen los diseños, aun no se ha efectuado todas las tapas del plan de clausura.
9.1.9. Capa o barrera de control de infiltración:			
a) Si la impermeabilización del relleno sanitario está constituida por el suelo natural (in situ), ¿la capa de control de infiltración consiste de un estrato de suelo compactado de un espesor mínimo de 0.45 m y una permeabilidad máxima de $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ ?	x		
b) Si en el diseño de la impermeabilización se utiliza un sistema de estrato compuesto, ¿hay instalada una geomembrana sobre el estrato de suelo compactado?	x		
9.1.10. Capa de control de erosión			NO SE HA EFECTUADO ESTA ETAPA
a) ¿El espesor mínimo de la capa de erosión es de 0.15 m?			
b) ¿Las pendientes son menores que 4:1 (H:V)?			
9.1.11. Capa de drenaje			NO SE HA EFECTUADO ESTA ETAPA
a) ¿están localizadas en algunas partes del sistema de cubierta con pendientes mayores que la relación 5:1 (H:V)?			
b) ¿el estrato de drenaje constituya parte de la cobertura final?			
c) ¿la fricción en la interfase de los estratos adyacentes que forman la cubierta son suficiente para prevenir la falla por deslizamiento?			
d) ¿se realizaron pruebas de fricción en la interface para determinar una pendiente máxima aceptable para la cubierta del relleno?			
9.2. EFECTOS DE SUBSIDENCIA			NO SE HA EFECTUADO ESTA ETAPA
¿La cubierta evita el almacenamiento de agua en la superficie?			
9.3. EFECTOS CLIMÁTICOS			NO SE HA EFECTUADO ESTA ETAPA



PREGUNTAS	CUMPLE	NO CUMPLE	OBSERVACIONES
9.3.1. ¿La cubierta es capaz de resistir condiciones climáticas extremas?			
9.3.2. ¿la cubierta permanece en constante funcionamiento con un mínimo de mantenimiento?			
<b>9.4. CUIDADOS DESPUÉS DEL CIERRE DEL RELLENO SANITARIO</b>			
9.4.1. ¿se realiza el monitoreo y el mantenimiento para asegurar que el relleno permanezca seguro y estable?			Se aporta un plan de clausura, en el que se describen las actividades descritas.
9.4.2. Los cuidados de posclausura y monitoreo deben realizarse durante el tiempo en el cual se garantice la estabilidad de los residuos.			
9.4.3. ¿hay preparado un plan de mantenimiento de posclausura y monitoreo?	x		
9.4.4. ¿Las actividades de mantenimiento de posclausura incluyen las siguientes actividades:			
a) Mantenimiento de la integridad de la cobertura y control de erosión.	x		
b) Monitoreo de la producción de lixiviados.	x		
c) Inspección del sistema de venteo de gas y reparación inmediata en caso de daños.	x		
d) Monitoreo de aguas subterráneas.	x		
<b>10. CONTROL AMBIENTAL</b>			
10.1.¿hay instrumentado un programa de monitoreo ambiental?	x		Se describe en el Plan de monitoreo ambiental, se encuentran discrepancias entre el programa de monitoreo y el PMA
10.2.¿ el programa de monitoreo ambiental incluye medición y control de los impactos generados en el sitio de disposición final?	x		
10.3.¿El cumplimiento de este programa asegura la adecuada operación del relleno sanitario?	x		
<b>CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS</b>			
10.4.¿hay establecido un programa de monitoreo de la calidad hídrica?	x		Incluye verificación a la calidad del agua subterránea y cuerpos de agua superficiales que se encuentran dentro del área del relleno sanitario.
10.5.El programa de monitoreo de la calidad hídrica, considera los siguientes aspectos:			
a) Calidad de los recursos hídricos del entorno y del área del relleno, antes del inicio de los trabajos.		x	No se efectúa caracterización de calidad de agua a recursos hídricos externos al relleno.
b) Estudios hidrogeológicos	x		
c) Diseño de la red de monitoreo de las aguas subterráneas		x	

PREGUNTAS	CUMPLE	NO CUMPLE	OBSERVACIONES
d) Estaciones de muestreo en los cursos de agua superficiales aledañas.		x	
e) Determinación de la frecuencia del muestreo.	x		
f) Determinación de la técnica de toma de muestras y control de calidad.	x		
g) Determinación de los parámetros por analizar.	x		
h) Control del líquido percolado: Composición y cantidad.	x		Se efectúa caracterización de lixiviado de acuerdo a la licencia ambiental.
i) Recopilación y análisis estadístico de los datos obtenidos.	x		Poseen una hoja de excel con los datos históricos de caracterizaciones y se efectúan informes de cumplimiento ambiental mensual que incluye análisis de resultados de análisis de laboratorio
<b>10.6.</b> ¿Se toman muestras y se les realiza análisis físicos, químicos y bacteriológicos al agua superficial de canales, acumulada en depresiones del terreno natural?	x		
<b>10.7.</b> ¿El procedimiento para realizar el monitoreo de aguas subterráneas y superficiales debe basarse según la Guía Técnica GTC 30 y las Normas Técnicas NTC-ISO 5667-6 y NTC-ISO 5667-11, del ICONTEC?	x		
<b>10.8.</b> ¿Los parámetros determinados y su frecuencia de muestreo en el programa de monitoreo de acuíferos son los siguientes:			
a) pH SEMESTRAL	x		
b) Conductividad eléctrica SEMESTRAL	x		
c) Oxígeno Disuelto SEMESTRAL	x		
d) Metales Pesados SEMESTRAL	x		
e) DQO , DBO SEMESTRAL	x		
f) Materia Orgánica SEMESTRAL	x		
g) Amoníaco SEMESTRAL	x		
h) Nitritos SEMESTRAL	x		
i) Nitratos SEMESTRAL	x		
<b>MONITOREO DE BIOGÁS</b>			
<b>10.9.</b> ¿Los parámetros determinados y su frecuencia de muestreo en el programa de monitoreo de biogás son los siguientes:			
a) Composición de biogás: CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> BIMESTRAL	x		
b) Explosividad BIMESTRAL	x		
c) Caudal MENSUAL		x	Se efectúa bimestral

PREGUNTAS	CUMPLE	NO CUMPLE	OBSERVACIONES
MONITOREO DE PARTÍCULAS AEROTRANSPORTABLES			
<b>10.10.</b> ¿Los parámetros determinados y su frecuencia de muestreo en el programa de monitoreo de partículas aerotransportables son los siguientes:			
a) Partículas suspendidas totales MENSUAL		x	Se efectúan trimestralmente
b) Partículas respirables MENSUAL		x	
ANÁLISIS DEL MONITOREO			
<b>10.11.</b> ¿La información obtenida a partir de los monitoreo es almacenada en un banco de datos para analizarla y tomar las medidas adecuadas para el control de dichos impactantes?	x		
<b>11. OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO</b>			
ACCESO			
<b>11.1.</b> ¿El acceso al relleno sanitario está indicado y enunciado con carteles diagramados?	x		
<b>11.2.</b> ¿Las barreras al relleno sanitario están indicado y enunciado con carteles diagramados?	x		
<b>11.3.</b> ¿Las casillas de control de ingreso y vigilancia del relleno sanitario está indicado y enunciado con carteles diagramados?	x		
FRENTE DE TRABAJO			
<b>11.4.</b> ¿La operatividad del frente de trabajo es continua en cualquier época del año?	x		
<b>11.5.</b> En los casos de operación nocturna, ¿el frente esta iluminado en su totalidad?	x		
RESTRICCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS			
<b>11.6.</b> ¿Los residuos peligrosos son excluidos del relleno sanitario de residuos sólidos municipales?	x		
COMPACTACIÓN DE LOS RESIDUOS			
<b>11.7.</b> ¿La compactación es efectuada con capas máximas de 30 cm de espesor?	x		
<b>11.8.</b> ¿La compactación se da con un número mínimo de pasadas de 3 a 4 por capa?	x		
<b>11.9.</b> ¿La pendiente es 3:1 (H:V) para máquina de cadenas o de 4:1 (H:V) para equipo compactador?	x		
MATERIAL DE CUBIERTA DIARIA			
<b>11.10.</b> ¿el material de cobertura es colocado diariamente?	x		
CONTROL DEL AGUA DE INFILTRACIÓN Y DE ESCORRENTÍA			
<b>11.11.</b> ¿Hay un sistema de control de agua de escorrentía sobre la masa de relleno?	x		

PREGUNTAS	CUMPLE	NO CUMPLE	OBSERVACIONES
11.12. ¿Hay mediante canales perimetrales, bermas o canales de sedimentación?	x		
TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS			
INSTRUMENTACIÓN			
En el <b>nivel alto de complejidad del sistema</b> , ¿el rellenos sanitarios esta instrumentado para medir presiones de poros y deformaciones con:			
11.13. Piezómetros?	x		Posee 3 piezómetros
11.14. inclinómetros?		x	
11.15. malla topográfica?	x		
11.16. ¿El número y localización de instrumentado fue determinado por la interventoría?		x	
<b>TOTAL</b>	<b>103</b>	<b>22</b>	
<b>PORCENTAJE DE CUMPLIMIENTO</b>	82%	18%	

**Fuente:** Elaboración del autor

**Anexo 2. Datos históricos de disposición final de residuos de Cartagena de Indias 2006-2015**

<b>AÑO<sup>a</sup></b>	<b>RESIDUOS DISPUESTOS (Ton/año)</b>	<b>VOLUMEN<sup>b</sup> (m3)</b>	<b>VOLUMEN+ COBERTURA 13% (m3)</b>	<b>TASA DE CRECIMIENTO</b>	<b>RESIDUOS DISPUESTOS (Kg/Día)</b>	<b>POBLACIÓN (Hab)</b>	<b>PPC (Kg/Hab/Día)</b>
2006	268.734	259.897	293.684		736.258	853.102	0,86
2007	280.882	271.646	306.960	4,52%	769.540	864.358	0,89
2008	290.943	281.376	317.955	3,58%	797.104	875.818	0,91
2009	303.536	293.555	331.717	4,33%	831.605	887.430	0,94
2010	322.485	311.881	352.425	6,24%	883.520	899.200	0,98
2011	316.526	306.118	345.913	-1,85%	867.193	911.271	0,95
2012	318296,11	307.830	347.848	0,56%	872.044	923.418	0,94
2013	348372,25	336.917	380.716	9,45%	954.445	935.524	1,02
2014	374148,67	361.846	408.886	7,40%	1.025.065	947.606	1,08
2015	391444,72	378.573	427.788	4,62%	1.072.451	959.570	1,12
<b>TOTAL</b>	<b>3.215.367</b>	<b>3.109.639</b>	<b>3.513.893</b>				

<sup>a</sup> Información suministrada por Caribe Verde S.A. E.S.P.

<sup>b</sup> Volumen estimado con densidad de 1.034 kg/m<sup>3</sup>

**Fuente:** Elaboración del Autor

**Anexo 3. Proyección de generación de residuos sólidos ordinarios con densidad de 800 kg/m<sup>3</sup>**

AÑO	POBLACIÓN (Hab)	PPC (Kg/Hab/Día)	DIARIA (kg/día)	ANUAL (ton/año)	ACUMULADO (ton)	DENSIDAD DE COMPACTACIÓN (ton/m <sup>3</sup> )	VOLUMEN DE RESIDUOS (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN RESIDUOS + COBERTURA (13%) (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN ACUMULADO (m <sup>3</sup> )
2016	971.700	1,13	1.102.158	402.288	402.288	0,8	502.860	568.231	568.231
2017	983.629	1,16	1.140.565	416.306	818.594	0,8	520.383	588.032	1.156.264
2018	995.205	1,18	1.179.157	430.392	1.248.986	0,8	537.990	607.929	1.764.193
2019	1.006.323	1,21	1.217.780	444.490	1.693.476	0,8	555.612	627.842	2.392.034
2020	1.016.944	1,24	1.256.351	458.568	2.152.044	0,8	573.210	647.728	3.039.762
2021	1.029.127	1,26	1.297.429	473.561	2.625.605	0,8	591.952	668.905	3.708.667
2022	1.040.621	1,29	1.338.237	488.457	3.114.062	0,8	610.571	689.945	4.398.612
2023	1.052.116	1,31	1.379.628	503.564	3.617.626	0,8	629.455	711.284	5.109.897
2024	1.063.611	1,34	1.421.600	518.884	4.136.510	0,8	648.605	732.923	5.842.820
2025	1.075.106	1,36	1.464.153	534.416	4.670.926	0,8	668.020	754.862	6.597.682

**Fuente:** Elaboración del Autor

**Anexo 4. Proyección de generación de residuos sólidos ordinarios con densidad de 1.034 Kg/m<sup>3</sup>**

AÑO	POBLACIÓN (Hab)	PPC (Kg/Hab/Día)	DIARIA (kg/día)	ANUAL (ton/año)	ACUMULADO (ton)	DENSIDAD DE COMPACTACIÓN (ton/m <sup>3</sup> )	VOLUMEN DE RESIDUOS (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN RESIDUOS + COBERTURA (13%) (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN ACUMULADO (m <sup>3</sup> )
2016	971.700	1,13	1.102.158	402.288	402.288	1,034	389.060	439.637	439.637
2017	983.629	1,16	1.140.565	416.306	818.594	1,034	402.617	454.957	894.595
2018	995.205	1,18	1.179.157	430.392	1.248.986	1,034	416.240	470.351	1.364.946
2019	1.006.323	1,21	1.217.780	444.490	1.693.476	1,034	429.874	485.757	1.850.704
2020	1.016.944	1,24	1.256.351	458.568	2.152.044	1,034	443.490	501.143	2.351.847
2021	1.029.127	1,26	1.297.429	473.561	2.625.605	1,034	457.990	517.528	2.869.375
2022	1.040.621	1,29	1.338.237	488.457	3.114.062	1,034	472.395	533.807	3.403.182
2023	1.052.116	1,31	1.379.628	503.564	3.617.626	1,034	487.006	550.317	3.953.499
2024	1.063.611	1,34	1.421.600	518.884	4.136.510	1,034	501.822	567.059	4.520.557
2025	1.075.106	1,36	1.464.153	534.416	4.670.926	1,034	516.843	584.033	5.104.590

**Fuente:** Elaboración del Autor

**Anexo 5. Proyecciones de disposición final de residuos con escenario I Incineración con densidad de 800 kg/m<sup>3</sup>**

PROYECCIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS CON INCINERACIÓN 2016-2025 COMBUSTIÓN EN PARRILLA											
AÑO	POBLACIÓN (Hab)	PPC (Kg/Hab/Día)	DIARIA (kg/día)	ANUAL (ton/año)	ACUMULADO (ton)	RESIDUOS PROCESABLES (ton/año)	RECHAZO (ton)	DENSIDAD DE COMPACTACIÓN	VOLUMEN DE RESIDUOS (m3)	VOLUMEN RESIDUOS + COBERTURA (13%) (m3)	VOLUMEN ACUMULADO (m3)
2016	971.700	1,13	1.102.158	402.288	402.288	380.162	137.885	0,8	172.356	194.763	194.763
2017	983.629	1,16	1.140.565	416.306	818.594	393.409	142.690	0,8	178.362	201.550	396.312
2018	995.205	1,18	1.179.157	430.392	1.248.986	406.721	147.518	0,8	184.397	208.369	604.682
2019	1.006.323	1,21	1.217.780	444.490	1.693.476	420.043	152.350	0,8	190.437	215.194	819.876
2020	1.016.944	1,24	1.256.351	458.568	2.152.044	433.347	157.175	0,8	196.469	222.010	1.041.886
2021	1.029.127	1,26	1.297.429	473.561	2.625.605	447.516	162.314	0,8	202.893	229.269	1.271.155
2022	1.040.621	1,29	1.338.237	488.457	3.114.062	461.592	167.420	0,8	209.275	236.480	1.507.635
2023	1.052.116	1,31	1.379.628	503.564	3.617.626	475.868	172.598	0,8	215.747	243.794	1.751.430
2024	1.063.611	1,34	1.421.600	518.884	4.136.510	490.345	177.849	0,8	222.311	251.211	2.002.641
2025	1.075.106	1,36	1.464.153	534.416	4.670.926	505.023	183.172	0,8	228.965	258.731	2.261.372

**Fuente:** Elaboración del autor



**Anexo 6. Proyecciones de disposición final de residuos con escenario I Incineración con densidad de 1034 kg/m<sup>3</sup>**

PROYECCIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS CON INCINERACIÓN 2016-2025													
AÑO	POBLACIÓN (Hab)	PPC (Kg/Hab/Día)	DIARIA (kg/día)	ANUAL (ton/año)	ACUMULADO (ton)	RESIDUOS PROCESABLES (ton/año)	RECHAZO (ton)	DENSIDAD DE COMPACTACIÓN	VOLUMEN DE RESIDUOS (m3)	VOLUMEN RESIDUOS + COBERTURA (13%) (m3)	VOLUMEN ACUMULADO (m3)	ALTURA (m)	
2016	971.700	1,13	1.102.158	402.288	402.288	380.162	137.885	1,034	133.351	150.687	150.687	35	4.305
2017	983.629	1,16	1.140.565	416.306	818.594	393.409	142.690	1,034	137.998	155.938	306.625	35	8.760
2018	995.205	1,18	1.179.157	430.392	1.248.986	406.721	147.518	1,034	142.667	161.214	467.839	35	13.365
2019	1.006.323	1,21	1.217.780	444.490	1.693.476	420.043	152.350	1,034	147.340	166.495	634.333	35	18.120
2020	1.016.944	1,24	1.256.351	458.568	2.152.044	433.347	157.175	1,034	152.007	171.768	806.101	35	23.025
2021	1.029.127	1,26	1.297.429	473.561	2.625.605	447.516	162.314	1,034	156.977	177.384	983.486	35	28.090
2022	1.040.621	1,29	1.338.237	488.457	3.114.062	461.592	167.420	1,034	161.915	182.964	1.166.449	35	33.325
2023	1.052.116	1,31	1.379.628	503.564	3.617.626	475.868	172.598	1,034	166.923	188.622	1.355.071	35	38.710
2024	1.063.611	1,34	1.421.600	518.884	4.136.510	490.345	177.849	1,034	172.001	194.361	1.549.432	35	44.205
2025	1.075.106	1,36	1.464.153	534.416	4.670.926	505.023	183.172	1,034	177.149	200.179	1.749.611	35	49.980

**Fuente:** Elaboración del autor

**Anexo 7. Proyecciones de disposición final de residuos con escenario II Compostaje con densidad de 800 kg/m<sup>3</sup>**

PROYECCIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS CON COMPOSTAJE 2016-2025											
AÑO	POBLACIÓN (Hab)	PPC (Kg/Hab/Día)	DIARIA (kg/día)	ANUAL (ton/año)	ACUMULADO (ton)	RESIDUOS PROCESABLES (ton/año)	RECHAZO (ton)	DENSIDAD DE COMPACTACIÓN	VOLUMEN DE RESIDUOS (m3)	VOLUMEN RESIDUOS + COBERTURA (13%) (m3)	VOLUMEN ACUMULADO (m3)
2016	971.700	1,13	1.102.158	402.288	402.288	312.175	214.983	0,8	268.728	303.663	303.663
2017	983.629	1,16	1.140.565	416.306	818.594	323.054	222.474	0,8	278.093	314.245	617.907
2018	995.205	1,18	1.179.157	430.392	1.248.986	333.984	230.002	0,8	287.502	324.877	942.785
2019	1.006.323	1,21	1.217.780	444.490	1.693.476	344.924	237.535	0,8	296.919	335.519	1.278.303
2020	1.016.944	1,24	1.256.351	458.568	2.152.044	355.849	245.059	0,8	306.324	346.146	1.624.449
2021	1.029.127	1,26	1.297.429	473.561	2.625.605	367.484	253.071	0,8	316.339	357.463	1.981.912
2022	1.040.621	1,29	1.338.237	488.457	3.114.062	379.042	261.031	0,8	326.289	368.707	2.350.619
2023	1.052.116	1,31	1.379.628	503.564	3.617.626	390.766	269.105	0,8	336.381	380.110	2.730.729
2024	1.063.611	1,34	1.421.600	518.884	4.136.510	402.654	277.292	0,8	346.614	391.674	3.122.403
2025	1.075.106	1,36	1.464.153	534.416	4.670.926	414.707	285.592	0,8	356.990	403.398	3.525.801

**Fuente:** Elaboración del Autor

**Anexo 8. Proyecciones de disposición final de residuos con escenario II Compostaje con densidad de 1034 kg/m<sup>3</sup>**

PROYECCIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS CON COMPOSTAJE 2016-2025											
AÑO	POBLACIÓN (Hab)	PPC (Kg/Hab/Día)	DIARIA (kg/día)	ANUAL (ton/año)	ACUMULADO (ton)	RESIDUOS PROCESABLES (ton/año)	RECHAZO (ton)	DENSIDAD DE COMPACTACIÓN (ton/m <sup>3</sup> )	VOLUMEN DE RESIDUOS (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN RESIDUOS + COBERTURA (13%) (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN ACUMULADO (m <sup>3</sup> )
2016	971.700	1,13	1.102.158	402.288	402.288	312.175	214.983	1,034	207.914	234.942	234.942
2017	983.629	1,16	1.140.565	416.306	818.594	323.054	222.474	1,034	215.159	243.129	478.072
2018	995.205	1,18	1.179.157	430.392	1.248.986	333.984	230.002	1,034	222.439	251.356	729.427
2019	1.006.323	1,21	1.217.780	444.490	1.693.476	344.924	237.535	1,034	229.725	259.589	989.016
2020	1.016.944	1,24	1.256.351	458.568	2.152.044	355.849	245.059	1,034	237.001	267.811	1.256.827
2021	1.029.127	1,26	1.297.429	473.561	2.625.605	367.484	253.071	1,034	244.750	276.567	1.533.394
2022	1.040.621	1,29	1.338.237	488.457	3.114.062	379.042	261.031	1,034	252.448	285.266	1.818.660
2023	1.052.116	1,31	1.379.628	503.564	3.617.626	390.766	269.105	1,034	260.256	294.089	2.112.750
2024	1.063.611	1,34	1.421.600	518.884	4.136.510	402.654	277.292	1,034	268.174	303.036	2.415.786
2025	1.075.106	1,36	1.464.153	534.416	4.670.926	414.707	285.592	1,034	276.201	312.107	2.727.893

**Fuente:** Elaboración del Autor

**Anexo 9. Proyecciones de disposición final de residuos con escenario III MRF + Compostaje con densidad de 800 kg/m<sup>3</sup>**

PROYECCIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS CON MRF + COMPOSTAJE 2016-2025											
AÑO	POBLACIÓN (Hab)	PPC (Kg/Hab/Día)	DIARIA (kg/día)	ANUAL (ton/año)	ACUMULADO (ton)	RESIDUOS PROCESABLES (ton/año)	RECHAZO (ton)	DENSIDAD DE COMPACTACIÓN (ton/m <sup>3</sup> )	VOLUMEN DE RESIDUOS (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN RESIDUOS + COBERTURA (13%) (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN ACUMULADO (m <sup>3</sup> )
2016	971.700	1,13	1.102.158	402.288	402.288	387.001	170.087	0,8	212.609	240.248	240.248
2017	983.629	1,16	1.140.565	416.306	818.594	400.487	176.014	0,8	220.018	248.620	488.868
2018	995.205	1,18	1.179.157	430.392	1.248.986	414.037	181.970	0,8	227.462	257.032	745.901
2019	1.006.323	1,21	1.217.780	444.490	1.693.476	427.599	187.930	0,8	234.913	265.451	1.011.352
2020	1.016.944	1,24	1.256.351	458.568	2.152.044	441.143	193.883	0,8	242.353	273.859	1.285.211
2021	1.029.127	1,26	1.297.429	473.561	2.625.605	455.566	200.222	0,8	250.277	282.813	1.568.025
2022	1.040.621	1,29	1.338.237	488.457	3.114.062	469.895	206.519	0,8	258.149	291.709	1.859.733
2023	1.052.116	1,31	1.379.628	503.564	3.617.626	484.429	212.907	0,8	266.134	300.731	2.160.464
2024	1.063.611	1,34	1.421.600	518.884	4.136.510	499.166	219.384	0,8	274.230	309.880	2.470.344
2025	1.075.106	1,36	1.464.153	534.416	4.670.926	514.108	225.951	0,8	282.439	319.156	2.789.500

**Fuente:** Elaboración del Autor

**Anexo 10. Proyecciones de disposición final de residuos con escenario III MRF + Compostaje con densidad de 1034 kg/m<sup>3</sup>**

PROYECCIÓN DE GENERACIÓN DE RESIDUOS CON MRF + COMPOSTAJE 2016-2025											
AÑO	POBLACIÓN (Hab)	PPC (Kg/Hab/Día)	DIARIA (kg/día)	ANUAL (ton/año)	ACUMULADO (ton)	RESIDUOS PROCESABLES (ton/año)	RECHAZO (ton)	DENSIDAD DE COMPACTACIÓN (ton/m <sup>3</sup> )	VOLUMEN DE RESIDUOS (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN RESIDUOS + COBERTURA (13%) (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN ACUMULADO (m <sup>3</sup> )
2016	971.700	1,13	1.102.158	402.288	402.288	387.001	170.087	1,034	164.494	185.879	185.879
2017	983.629	1,16	1.140.565	416.306	818.594	400.487	176.014	1,034	170.227	192.356	378.235
2018	995.205	1,18	1.179.157	430.392	1.248.986	414.037	181.970	1,034	175.986	198.864	577.099
2019	1.006.323	1,21	1.217.780	444.490	1.693.476	427.599	187.930	1,034	181.751	205.378	782.477
2020	1.016.944	1,24	1.256.351	458.568	2.152.044	441.143	193.883	1,034	187.507	211.883	994.361
2021	1.029.127	1,26	1.297.429	473.561	2.625.605	455.566	200.222	1,034	193.638	218.811	1.213.172
2022	1.040.621	1,29	1.338.237	488.457	3.114.062	469.895	206.519	1,034	199.729	225.693	1.438.865
2023	1.052.116	1,31	1.379.628	503.564	3.617.626	484.429	212.907	1,034	205.906	232.674	1.671.539
2024	1.063.611	1,34	1.421.600	518.884	4.136.510	499.166	219.384	1,034	212.170	239.752	1.911.292
2025	1.075.106	1,36	1.464.153	534.416	4.670.926	514.108	225.951	1,034	218.521	246.929	2.158.221

**Fuente:** Elaboración del Autor

Kk

### Anexo 11. Corrección de composición física de residuos a disponer en el relleno sanitario

	Sin aprov	Compostaje <sup>a</sup>	Incineración <sup>b</sup>	MRF+C <sup>c</sup>
Food Waste	77,6%	58,08%	0,0%	77,3%
Paper and Cardboard	5,7%	10,67%	0,0%	5,7%
Garden Waste (Green Waste)	0,0%	0,00%	0,0%	0,0%
Wood Waste	1,0%	1,87%	0,0%	1,0%
Rubber, Leather, Bones, Straw	0,9%	1,68%	0,0%	0,9%
Textiles	1,6%	2,99%	0,0%	1,6%
Toilet Paper	0,0%	0,00%	0,0%	0,0%
Other Organics	0,0%	0,00%	0,0%	0,0%
Diapers (assume 20% organics / 80% inorganics)	0,0%	0,00%	0,0%	0,0%
Metals	1,0%	1,87%	18,2%	1,0%
Construction and Demolition Waste	0,0%	0,00%	0,0%	0,0%
Glass and Ceramics	4,2%	7,86%	76,4%	4,2%
Plastics	7,7%	14,41%	0,0%	7,7%
Other Inorganic Waste	0,3%	0,56%	5,5%	0,7%
TOTAL	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

**Nota:** Datos de caracterización sin aprovechamiento (sin aprov) corresponden a un reagrupamiento de los datos de caracterización física del PGIRS 2007 del Distrito de Cartagena de Indias. Fuente: Alcaldía Distrital de Cartagena de Indias. (2007). Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Distrito de Cartagena (Vol. III). Cartagena De Indias D.T. y C.

<sup>a</sup> Dato calculado sobre la base de un rechazo del 20% de residuos orgánicos y disposición final de la totalidad de la fracción no fermentable

<sup>b</sup> Dato calculado sobre la base de rechazo de compuestos no procesables en planta de incineración.

<sup>c</sup> Dato calculado sobre la base de un rechazo del 40% de todos los residuos, salvo los catalogados como *otros residuos inorgánicos* (Other inorganic waste).

## Anexo 12. Estimación de costos de Escenario I

ESCENARIO I:		INCINERACIÓN (TIPO PARRILLA)		
<b>Capacidad de Diseño (ton/mes)</b>		<b>36.784</b>		
<b>COSTOS DE INVERSIÓN</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>
<b>Pre-inversión</b>				<b>4.566.823.893</b>
Estudios, Diseños	% de inversión	0,50%	608.909.852.363	3.044.549.261,8
Permisos	% de inversión	0,25%	608.909.852.363	1.522.274.630,9
<b>Infraestructura</b>				<b>15.003.573.933</b>
Predio	Ha/tpa	0,000015	16.045.908	106.240.549
Construcción (obra civil, instalaciones eléctricas-hidráulicas-sanitarias, personal: bodega, planta de selección, oficinas, servicios, enfermería, restaurante, portería, vías internas, otros.)	Ha/tpa	0,00000375	9.000.000.000	14.897.333.384
<b>Maquinaria y Equipos (incluido el costo de instalación)</b>				<b>593.906.278.429,2</b>
Sistema de separación de residuos con alto poder calorífico	Global	1	1.345.164	593.758.713.006
Concrete pit				
Overhead cranes				
Caldera				
Turbina de vapor/generador				
Particle size classification				
magnetic removal iron				
tratamiento de gases				
Báscula de pesaje	Unidad	2	73.782.712	147.565.423
<b>Subtotal (100% importado)</b>				<b>613.476.676.255</b>
<b>COSTOS DE OPERACIÓN</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>\$ / Año</b>
bottom ashes (cenizas de fondo) suponiendo que no es peligroso	ton/ton de residuos	0,22	27.101	2.631.786.459
fly ashes (cenizas volátiles) suponiendo que no es peligroso	ton/ton de residuos	0,02	27.101	269.159.979
flue gas treatment residues (residuos tratamiento gases) suponiendo que no es peligroso	ton/ton de residuos	0,04	27.101	478.506.629
Metales no ferrosos	ton/ton de residuos	0,00	-	-
Hidróxido/Oxido de Calcio	ton/ton de residuos	0,02	467.000	4.534.968.983
Carbón activado	ton/ton de residuos	0,0003	6.100.000	807.766.521
Agua (limpieza y enfriamiento)	m3/ton de residuos	0,40	700	123.592.692
Energía (autoconsumo)	MWh/ton de residuos	0,12	-	-
Fuel oil (diesel)	Gal/ton de residuos	0,53	8.000	1.865.190.280
Monitoreo Ambiental (Continuous emission measurements for total dust, TOC, HCl, HF, SO2, Nox, CO; sampling and measurement of air contents for PCDD/F and heavy metals (Cd, Tl, Hg + summa Sb, As, Pb, Crf, Co, Cu, Mn, Ni, V))	Muestras/año	12	10.000.000	120.000.000
<b>Subtotal</b>				<b>10.830.971.543</b>
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>\$ / Año</b>
Maquinaria y equipos	% / inversión	2,0%	593.906.278.429,2	11.878.125.568,6
Infraestructura	% / inversión	1%	14.897.333.384	148.973.333,8
<b>Subtotal</b>				<b>12.027.098.902,4</b>

<b>COSTOS DE PERSONAL</b>	<b>Unidad</b>	<b># personas/tur no</b>	<b>turno/día</b>	<b>Vlr Unitario</b>	<b>\$ / Año</b>
Director	mes	1	1	13.866.749	166.400.991
Ingeniero	mes	1	3	7.447.725	268.118.102
Especialista	mes	3	1	7.447.726	268.118.141
Supervisor	mes	1	3	4.238.215	152.575.726
Operario técnico 1	mes	8	3	4.146.515	1.194.196.422
Operario 2	mes	2	3	1.112.927	80.130.727
<b>Subtotal</b>	mes				<b>2.129.540.110</b>

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<b>CANTIDAD DE RESIDUOS (ton/mes)</b>		<b>31.680</b>	<b>32.784</b>	<b>33.893</b>	<b>35.004</b>	<b>36.112</b>	<b>37.293</b>	<b>38.466</b>	<b>39.656</b>	<b>40.862</b>	<b>42.085</b>
<b>INGRESOS POR COMERCIALIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS</b>	<b>0</b>	<b>44.081.748.692</b>	<b>46.378.495.015</b>	<b>48.319.605.626</b>	<b>50.118.476.074</b>	<b>51.702.759.826</b>	<b>53.490.882.925</b>	<b>55.223.468.874</b>	<b>56.975.101.885</b>	<b>58.746.584.696</b>	<b>60.283.192.851</b>
Energía		29.397.221.797	30.421.620.088	31.450.956.081	32.481.126.340	33.509.918.922	34.605.553.081	35.694.025.604	36.798.005.614	37.917.493.111	39.052.488.095
Tarifa		10.302.955.411	10.661.980.151	11.022.735.426	11.383.783.090	11.744.347.914	12.128.338.958	12.509.820.036	12.896.736.082	13.289.087.096	13.686.873.077
Reciclables	0	3421457283	3540684025	3660485452	3780383977	3900122159	4027639837	4154323993	4282813021	4413106920	4545205690
Lixiviado (m3/año)		946.867.129	1.740.502.060	2.146.362.870	2.360.982.415	2.375.744.237	2.506.485.015	2.599.469.589	2.694.513.753	2.791.065.289	2.633.354.018
Area (\$/Ha)		13.247.072,00	13.708.689,70	14.172.532,45	14.636.751,13	15.100.349,00	15.594.067,24	16.084.558,28	16.582.037,35	17.086.504,46	17.597.959,61
CER (\$/TonCO2eq)		-	-	24.893.264	97.563.501	157.526.246	207.271.967	249.745.093	286.451.378	318.745.775	347.674.011
<b>COSTOS</b>	<b>613.476.676.255</b>	<b>25.862.176.925</b>	<b>26.767.353.117</b>	<b>27.704.210.476</b>	<b>28.673.857.843</b>	<b>29.677.442.867</b>	<b>30.716.153.368</b>	<b>31.791.218.735</b>	<b>32.903.911.391</b>	<b>34.055.548.290</b>	<b>35.247.492.480</b>
<b>CAPEX</b>	613.476.676.255										
<b>OPEX</b>		25.862.176.925	26.767.353.117	27.704.210.476	28.673.857.843	29.677.442.867	30.716.153.368	31.791.218.735	32.903.911.391	34.055.548.290	35.247.492.480
Operación		11.210.055.547	11.602.407.491	12.008.491.754	12.428.788.965	12.863.796.579	13.314.029.459	13.780.020.490	14.262.321.207	14.761.502.450	15.278.155.035
Mantenimiento		12.448.047.364	12.883.729.022	13.334.659.538	13.801.372.621	14.284.420.663	14.784.375.386	15.301.828.525	15.837.392.523	16.391.701.261	16.965.410.806
Personal		2.204.074.013	2.281.216.604	2.361.059.185	2.443.696.256	2.529.225.625	2.617.748.522	2.709.369.721	2.804.197.661	2.902.344.579	3.003.926.639
<b>Saldo (Ingresos - Costos)</b>	<b>-613.476.676.255</b>	<b>18.219.571.767</b>	<b>19.611.141.898</b>	<b>20.615.395.150</b>	<b>21.444.618.231</b>	<b>22.025.316.959</b>	<b>22.774.729.557</b>	<b>23.432.250.138</b>	<b>24.071.190.494</b>	<b>24.691.036.406</b>	<b>25.035.700.371</b>

Nota: Índices de cálculo tomados de Anexo Modelación de Costos. Informe *Estudio de técnicas alternativas de tratamiento, disposición final y/o aprovechamiento de residuos sólidos - propuesta de ajuste Decreto 838 de 2005* realizado por MAG CONSULTORIA – DNV.GL. 2005

**Fuente:** Elaboración del autor



## Anexo 13. Estimación de costos de escenario II

ESCENARIO II		COMPOSTAJE A CIELO ABIETO				
Capacidad de Diseño (ton/mes)		30.205				
<b>COSTOS DE INVERSIÓN</b>		<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>	
<b>Pre-inversión</b>					<b>52.748.306</b>	
Estudios, Diseños	% de inversión	0,50%	7.033.107.450		35.165.537,2	
Permisos	% de inversión	0,25%	7.033.107.450		17.582.768,6	
<b>Infraestructura</b>					<b>5.546.864.026</b>	
Predio	Ha/tpa	0,000100	16.045.908		581.606.112	
Construcción (Invernadero (compostaje) y planta de tamizaje, obra civil, instalaciones eléctricas-hidráulicas-sanitarias, bodega, planta de selección, oficinas, servicios, enfermería, restaurante, portería, vías internas , otros.)	m2/tpa	0,015	900.000		4.965.257.914	
<b>Maquinaria y Equipos (incluido el costo de instalación)</b>					<b>1.486.243.423,5</b>	
Trommel		2	274.339.000		548.678.000	
Bobcat		1	187.000.000		187.000.000	
Tractor		1	187.000.000		187.000.000	
Retroexcavadora		1	163.000.000		163.000.000	
Montacargas		2	58.000.000		116.000.000	
Planta eléctrica		1	110.000.000		110.000.000	
Compresor		1	27.000.000		27.000.000	
Báscula de pesaje	Unidad	2	73.782.712		147.565.423	
<b>Subtotal</b>					<b>7.085.855.755,7</b>	
<b>COSTOS DE OPERACIÓN</b>		<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>\$ / Año</b>	
Energía	MWh/ton de residuos	0,01	142.195		432.941.178	
Combustible	Gal/ton de residuos	0,56	8.000		1.623.837.948	
Agua (limpieza y enfriamiento)	m3/ton de residuos	0,20	700		50.744.936	
Monitoreo Ambiental Temperatures, moisture and pH-values, C/N-ratio, pore space (particle size)	Muestras/año	12	1.000.000		12.000.000	
<b>Subtotal</b>					<b>2.119.524.063</b>	
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>		<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>\$ / Año</b>	
Maquinaria y equipos	% / inversión	3%	1.486.243.423		44.587.303	
Infraestructura	% / inversión	1%	4.965.257.914		49.652.579	
<b>Subtotal</b>					<b>94.239.882</b>	
<b>COSTOS DE PERSONAL</b>		<b>Unidad</b>	<b>personas/turr</b>	<b>turno/día</b>	<b>Vlr Unitario</b>	<b>\$ / Año</b>
Director	mes	1	1	13.866.749	166.400.991	
Ingeniero	mes	1	2	7.447.725	178.745.401	
Especialista	mes	1	1	7.447.726	89.372.714	
Supervisor	mes	1	2	4.238.215	101.717.151	
Operario 1	mes			4.146.515	-	
Operario 2	mes	7	2	1.112.927	186.971.696	
<b>Subtotal</b>		mes			<b>723.207.953</b>	

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<b>CANTIDAD DE RESIDUOS (ton/mes)</b>		<b>26.015</b>	<b>26.921</b>	<b>27.832</b>	<b>28.744</b>	<b>29.654</b>	<b>30.624</b>	<b>31.587</b>	<b>32.564</b>	<b>33.554</b>	<b>34.559</b>
<b>INGRESOS POR COMERCIALIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS</b>	<b>0</b>	<b>9.805.734.432</b>	<b>10.587.852.201</b>	<b>10.998.513.030</b>	<b>11.393.026.072</b>	<b>11.655.264.261</b>	<b>12.090.017.975</b>	<b>12.496.660.897</b>	<b>12.905.769.904</b>	<b>13.317.839.065</b>	<b>13.587.282.083</b>
Tarifa		8.931.980.020	9.243.230.693	9.555.981.626	9.868.986.039	10.181.571.863	10.514.466.668	10.845.185.499	11.180.616.087	11.520.758.432	11.865.612.534
Compost / Enmienda Orgánica		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lixiviado (m3/año)		864.370.067	1.334.910.149	1.400.816.282	1.441.584.760	1.358.090.739	1.432.828.515	1.485.983.011	1.540.314.869	1.595.508.415	1.505.352.996
Area (\$/Ha)		9.384.344	9.711.358	10.039.949	10.368.805	10.697.222	11.046.977	11.394.445	11.746.863	12.104.232	12.466.552
CER (\$/TonCO2eq)		-	-	31.675.173	72.086.468	104.904.437	131.675.816	154.097.942	173.092.084	189.467.986	203.850.002
<b>COSTOS</b>	<b>6.299.708.385</b>	<b>3.039.765.914</b>	<b>3.146.157.721</b>	<b>3.256.273.241</b>	<b>3.370.242.805</b>	<b>3.488.201.303</b>	<b>3.610.288.348</b>	<b>3.736.648.440</b>	<b>3.867.431.136</b>	<b>4.002.791.226</b>	<b>4.142.888.919</b>
<b>CAPEX</b>	6.299.708.385										
<b>OPEX</b>		3.039.765.914	3.146.157.721	3.256.273.241	3.370.242.805	3.488.201.303	3.610.288.348	3.736.648.440	3.867.431.136	4.002.791.226	4.142.888.919
Operación		2.193.707.405	2.270.487.164	2.349.954.215	2.432.202.612	2.517.329.704	2.605.436.243	2.696.626.512	2.791.008.440	2.888.693.735	2.989.798.016
Mantenimiento		97.538.278	100.952.117	104.485.442	108.142.432	111.927.417	115.844.877	119.899.447	124.095.928	128.439.286	132.934.661
Personal		748.520.231	774.718.440	801.833.585	829.897.760	858.944.182	889.007.228	920.122.481	952.326.768	985.658.205	1.020.156.242
<b>Saldo (Ingresos - Costos)</b>		<b>6.765.968.518</b>	<b>7.441.694.480</b>	<b>7.742.239.788</b>	<b>8.022.783.267</b>	<b>8.167.062.958</b>	<b>8.479.729.627</b>	<b>8.760.012.457</b>	<b>9.038.338.768</b>	<b>9.315.047.839</b>	<b>9.444.393.165</b>

Nota: Índices de cálculo tomados de Anexo Modelación de Costos. Informe *Estudio de técnicas alternativas de tratamiento, disposición final y/o aprovechamiento de residuos sólidos - propuesta de ajuste Decreto 838 de 2005* realizado por MAG CONSULTORIA – DNV.GL. 2005

**Fuente:** Elaboración del autor

## Anexos 14. Estimación de costos de escenario III

TECNOLOGÍA:		TRATAMIENTO MECÁNICO - MRF-				
<b>Capacidad de Diseño (ton/mes)</b>		<b>37.445</b>				
<b>COSTOS DE INVERSIÓN</b>		<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total</b>	
<b>Pre-inversión</b>					<b>507.508.361</b>	
Estudios, Diseños	% de inversión	0,50%	67.667.781.480	338.338.907,4		
Permisos	% de inversión	0,25%	67.667.781.480	169.169.453,7		
<b>Infraestructura</b>					<b>60.826.062.856</b>	
Predio	Ha/tpa	0,000025	14.666.024	164.751.892		
Construcción (obra civil, instalaciones eléctricas-hidráulicas-sanitarias, personal: bodega, planta de selección, oficinas, servicios, enfermería, restaurante, portería, vías internas, otros.)	m2/tpa	0,15	900.000	60.661.310.964		
<b>Maquinaria y Equipos (incluido el costo de instalación)</b>					<b>6.841.718.623,5</b>	
Overhead cranes	Unidad	1	1.062.564.000	1.062.564.000		
Bandas transportadoras	€/m	250	3.541.880	885.470.000		
Sistema de tamizaje (piso vivo, tolva viva, bandas y t	Unidad	2	354.188.000	708.376.000		
magnetic removal iron (metales)	Unidad	2	70.837.600	141.675.200		
sistema separación balística	Unidad	2	885.470.000	1.770.940.000		
Rompebolsas	Unidad	2	1.062.564.000	2.125.128.000		
Báscula de pesaje	Unidad	2	73.782.712	147.565.423		
<b>Subtotal (80% nacional, 20% importada)</b>					<b>68.175.289.840,7</b>	
<b>COSTOS DE OPERACIÓN</b>		<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>\$ / Año</b>	
Combustible	Gal/ton de residuos	0,25	8.000	898.686.088		
Energía (consumo)	MWh/ton de residuos	0,04	142.195	2.555.776.961		
Monitoreo Ambiental	Muestras/año	12	500.000	6.000.000		
<b>Subtotal</b>					<b>3.460.463.050</b>	
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>		<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>\$ / Año</b>	
Maquinaria y equipos	% / inversión	3%	6.841.718.623,5	205.251.558,7		
Infraestructura	% / inversión	1%	60.661.310.964,05	606.613.109,6		
<b>Subtotal</b>					<b>811.864.668,3</b>	
<b>COSTOS DE PERSONAL</b>		<b>Unidad</b>	<b># personas/turno</b>	<b>turno/día</b>	<b>Vlr Unitario</b>	<b>\$ / Año</b>
Director	mes	1	1	13.866.749	166.400.991	
Ingeniero	mes	1	2	7.447.725	178.745.401	
Especialista	mes	1	1	7.447.726	89.372.714	
Supervisor	mes	1	2	4.238.215	101.717.151	
Operario 1	mes	2	2	4.146.515	199.032.737	
Operario 2	mes	20	2	1.112.927	534.204.847	
<b>Subtotal</b>					<b>1.269.473.840</b>	

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<b>CANTIDAD DE RESIDUOS (ton/mes)</b>		<b>32.250</b>	<b>33.374</b>	<b>34.503</b>	<b>35.633</b>	<b>36.762</b>	<b>37.964</b>	<b>39.158</b>	<b>40.369</b>	<b>41.597</b>	<b>42.842</b>
<b>INGRESOS POR COMERCIALIZACIÓN DE SUBPRODUCTOS</b>	<b>0</b>	<b>11.609.703.567</b>	<b>12.459.997.981</b>	<b>12.943.013.335</b>	<b>13.405.934.917</b>	<b>13.735.476.224</b>	<b>14.241.104.793</b>	<b>14.718.048.020</b>	<b>15.198.521.595</b>	<b>15.682.990.564</b>	<b>16.024.031.679</b>
Tarifa		10.436.498.449	10.800.176.733	11.165.607.983	11.531.335.410	11.896.573.740	12.285.541.932	12.671.967.624	13.063.898.731	13.461.335.251	13.864.277.184
RDF		295.832.305	306.141.106	316.499.596	326.866.482	337.219.504	348.245.171	359.198.768	370.308.422	381.574.132	392.995.897
Lixiviado (m3/año)		865.739.129	1.341.641.061	1.413.188.838	1.456.842.424	1.374.978.987	1.450.646.148	1.504.461.636	1.559.469.126	1.615.349.019	1.524.072.492
Area (\$/Ha)		11.633.684	12.039.081	12.446.431	12.854.112	13.261.247	13.694.834	14.125.587	14.562.478	15.005.505	15.454.669
CER (\$/TonCO2eq)		-	-	35.270.487	78.036.490	113.442.747	142.976.708	168.294.403	190.282.838	209.726.658	227.231.437
<b>COSTOS</b>	<b>900.128.870</b>	<b>5.541.801.558</b>	<b>5.541.801.558</b>	<b>5.541.801.558</b>	<b>5.541.801.558</b>	<b>5.541.801.558</b>	<b>5.541.801.558</b>	<b>5.541.801.558</b>	<b>5.541.801.558</b>	<b>5.541.801.558</b>	<b>5.541.801.558</b>
<b>CAPEX</b>	900.128.870										
<b>OPEX</b>		5.541.801.558	5.541.801.558	5.541.801.558	5.541.801.558	5.541.801.558	5.541.801.558	5.541.801.558	5.541.801.558	5.541.801.558	5.541.801.558
Operación		3.460.463.050	3.460.463.050	3.460.463.050	3.460.463.050	3.460.463.050	3.460.463.050	3.460.463.050	3.460.463.050	3.460.463.050	3.460.463.050
Mantenimiento		811.864.668	811.864.668	811.864.668	811.864.668	811.864.668	811.864.668	811.864.668	811.864.668	811.864.668	811.864.668
Personal		1.269.473.840	1.269.473.840	1.269.473.840	1.269.473.840	1.269.473.840	1.269.473.840	1.269.473.840	1.269.473.840	1.269.473.840	1.269.473.840
<b>Saldo (Ingresos - Costos)</b>		<b>6.067.902.009</b>	<b>6.918.196.423</b>	<b>7.401.211.776</b>	<b>7.864.133.359</b>	<b>8.193.674.666</b>	<b>8.699.303.234</b>	<b>9.176.246.461</b>	<b>9.656.720.036</b>	<b>10.141.189.006</b>	<b>10.482.230.120</b>

Nota: Índices de cálculo tomados de Anexo Modelación de Costos. Informe *Estudio de técnicas alternativas de tratamiento, disposición final y/o aprovechamiento de residuos sólidos - propuesta de ajuste Decreto 838 de 2005* realizado por MAG CONSULTORIA – DNV.GL. 2005

**Fuente:** Elaboración del autor

