



**ESTRATEGIA DE MANEJO AMBIENTAL SOBRE EL BIOGÁS EN
LA FASE DE CIERRE DEL RELLENO SANITARIO EL
CARRASCO, BUCARAMANGA (SANTANDER).**

Valeria Gutiérrez Rincón

Elissa Marcela Verjel Quintero

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
Bogotá, D.C., 2019

**ESTRATEGIA DE MANEJO AMBIENTAL SOBRE EL BIOGÁS EN
LA FASE DE CIERRE DEL RELLENO SANITARIO EL
CARRASCO, BUCARAMANGA (SANTANDER).**

Valeria Gutiérrez Rincón
Elissa Marcela Verjel Quintero

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Directora:

Claudia Gómez Rendón

Línea de Investigación:

Salud ambiental

Gestión ambiental

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2019

Estrategia de manejo ambiental sobre el biogás en la fase de cierre del relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga (Santander).

*Valeria Gutiérrez Rincón
Elissa Marcela Verjel Quintero*

Acta de sustentación

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Dedicado a:

Dios,

Porque eres la fuente y la inspiración para mis días.

Padres,

Porque son mi apoyo y el motor que me impulsa cada día a superarme como persona.

ELISSA VERJEL

Dios,

Por ser el inspirador y darme la fuerza suficiente para continuar en este proceso y poder obtener el primer anhelo más deseado.

Mamá,

Porque eres la persona que me apoya, me brinda seguridad y ser la razón para superarme día a día.

VALERIA GUTIÉRREZ

Agradecimientos

Al *Padre celestial* por sus bendiciones y por ser mi guía día a día.

A mis *Padres* por ser quienes me han brindado su apoyo incondicional en este camino profesional y me han ayudado a superar los obstáculos.

ELISSA VERJEL

A *Dios*, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad.

A mi *Mamá*, por ser mi apoyo incondicional, gracias a ella soy la persona que soy, por su entrega conmigo e interés por mi formación como profesional.

VALERIA GUTIÉRREZ

A la *Universidad El Bosque* por los aprendizajes brindados y las experiencias vividas en nuestra formación como Ingenieros Ambientales.

A *Rubén Enrique Amaya* por permitirnos conocer información detallada del relleno sanitario El Carrasco.

A la docente *Claudia Gómez* por compartirnos sus conocimientos y por mostrarnos la pista para aterrizar nuestras ideas y así, mejorar día a día en el desarrollo del proyecto.

ELISSA Y VALERIA

Tabla de Contenido

1.	Resumen	6
2.	Introducción	7
3.	Planteamiento del problema	8
4.	Justificación.....	12
5.	Pregunta problema.....	13
6.	Objetivos	13
6.1	Objetivo general.....	13
6.2	Objetivos específicos	13
7.	Marcos de referencia	14
7.1	Antecedentes.....	14
7.2	Estado del arte	15
7.2.1	Generación y recuperación del gas metano en rellenos sanitarios	15
7.2.2	Influencia de los rellenos sanitarios en el cambio climático	16
7.3	Marco conceptual.....	17
7.4	Marco teórico.....	19
7.4.1	Cambio climático en Colombia.....	19
7.4.2	Implicaciones del gas metano	20
7.4.3	Rendimientos teóricos de Biogás a partir de los residuos sólidos dispuestos	21
7.4.4	Modelo colombiano de biogás para rellenos sanitarios	23
7.5	Marco normativo.....	24
7.6	Marco geográfico.....	27
7.7	Marco institucional	29
8.	Metodología	31
9.	Plan de trabajo.....	36
9.1	Cronograma	36
9.2	Presupuesto	37
10.	Resultados	38
10.1	Resultados del objetivo específico 1.....	38
10.1.1	Características de los residuos que ingresan al Carrasco	41
10.1.2	Composición química.....	41
10.1.3	Composición física	41
10.1.4	Producción y composición de los residuos	45
10.1.4.1	Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB): Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta.....	46
10.1.4.2	Betulia.....	46
10.1.4.3	Rionegro	47
10.1.4.4	Lebrija	47
10.1.4.5	Suratá	48
10.1.4.6	Charta.....	48
10.1.4.7	California	48
10.1.4.8	Matanza	49
10.1.4.9	El Playón	49
10.1.4.10	Tona.....	49
10.1.4.11	Los Santos.....	50
10.1.4.12	Santa Bárbara	50
10.1.4.13	Zapatoca.....	50
10.1.5	Planta de Tratamiento de Lixiviados	50
10.1.6	Manejo de lixiviados	52
10.1.7	Componente Geológico	55

10.1.8 Meteorología de la zona.....	56
10.1.9 Temperatura ambiente	58
10.1.10 Precipitación	58
10.1.11 Vientos	59
10.1.12 Hidrografía subterránea y superficial.....	61
10.1.13 Presencia de aves: Zopilote negro	61
10.1.14 Situación socioeconómica	62
10.2 Resultados del objetivo específico 2.....	65
10.2.1 Fase 1: Regiones geográficas de Colombia.....	65
10.2.2 Alimentación.....	66
10.2.3 Disposición y Recuperación de Biogás	68
10.2.4 Caracterización de los residuos	69
10.2.5 Tabla de resultados	71
10.2.6 Gráfica de resultados	73
10.3 Resultados del objetivo específico 3.....	74
10.3.1 Estrategia de manejo ambiental 1	74
10.3.2 Estrategia de manejo ambiental 2.....	77
10.3.3 Evaluación de la estrategia.....	79
11. Análisis de resultados.....	82
11.1 Análisis objetivo 1 “Establecer las variables que determinan el cálculo del biogás, a través de un diagnóstico ambiental del relleno sanitario”	82
11.2 Análisis objetivo 2 “Estimar la generación y recuperación del gas metano en el relleno sanitario mediante la herramienta automatizada “Modelo colombiano de biogás”	83
11.3 Análisis objetivo 3 “Establecer los lineamientos que permitan medir el funcionamiento de la estrategia de manejo ambiental sobre el biogás”.....	84
13. Recomendaciones.....	86
14. Referencias bibliográficas	87

Listado de Tablas

Tabla 1. Permanencia de los GEI en la atmósfera según el GWP (potencial de calentamiento bruto)	19
Tabla 2. Composición típica de gas de vertederos de Residuos Sólidos Urbanos	21
Tabla 3. Rango de valores	23
Tabla 4. Marco normativo.....	25
Tabla 5. Marco institucional.....	29
Tabla 6. Eficiencia del sistema de captura	35
Tabla 7. Cronograma.....	36
Tabla 8. Presupuesto	37
Tabla 9. Producción de Bucaramanga.....	39
Tabla 10. Relación de disposición de residuos en el predio El Carrasco.....	39
Tabla 11. Composición química de los residuos sólidos	41
Tabla 12. Composición física de los residuos sólidos en el relleno sanitario El Carrasco para el año 2016.....	42
Tabla 13. Composición física de los residuos sólidos en el relleno sanitario El Carrasco para el año 2017.....	44
Tabla 14. Producción de residuos y Producción Per Cápita de los municipios atendidos por la EMAB.	45
Tabla 15. Caracterización de los residuos en el Área Metropolitana de Bucaramanga	46
Tabla 16. Caracterización física de los residuos en el municipio de Betulia	46
Tabla 17. Caracterización de residuos del municipio de Lebrija, Santander.	47
Tabla 18. Características de los residuos en el municipio de Suratá, Santander.....	48
Tabla 19. Tipo y peso de los residuos en el municipio de Charta, Santander.....	48
Tabla 20. Caracterización de los residuos sólidos en la fuente en el municipio de California, Santander.	48

Tabla 21. Composición de residuos cabecera municipal municipio de Tona, Santander	49
Tabla 22. Resultados del monitoreo del mes de enero de 2019 en la PTLX con los parámetros exigidos por la norma ambiental vigente. RESOLUCIÓN 0631 DE 2015.....	52
Tabla 23. Consolidado caudales	55
Tabla 24. Resumen de los parámetros meteorológicos de muestreo.....	57
Tabla 25. Escalas de precipitación	59
Tabla 26. Clasificación de vientos según velocidad (Beaufort).....	59
Tabla 27. Población de los municipios en el área de influencia del relleno sanitario El Carrasco y su respectiva tasa de crecimiento anual	63
Tabla 28. Alimentación del modelo colombiano de biogás	66
Tabla 29. Resultados de la eficiencia de captura de biogás	69
Tabla 30. Caracterización de residuos en el relleno sanitario El Carrasco y en el Departamento de Santander	69
Tabla 31. Resultados obtenidos de la caracterización de los residuos	70
Tabla 32. Tabla de resultados.....	72
Tabla 33. Parámetros del modelo	73
Tabla 34. Estrategia de manejo ambiental	75
Tabla 35. Segunda estrategia de manejo ambiental	77
Tabla 36. Matriz DOFA aplicada al proyecto	79
Tabla 37. Matriz DOFA cruzada con el proyecto	80

Listado de ecuaciones

Ecuación 1. Método de aproximación simple	22
Ecuación 2. Método de degradación de primer orden.....	22
Ecuación 3. Ecuación de primer orden.....	23
Ecuación 4. Eficiencia de captura	24
Ecuación 5. Eficiencia de captura si la recuperación de biogás es conocida	24
Ecuación 6. Eficiencia de captura si la recuperación de biogás es conocida	24
Ecuación 7. Producción para el municipio de Bucaramanga (1978-1895)	38
Ecuación 8. Producción para el municipio de Bucaramanga (1985-2011).....	38
Ecuación 9. Determinación de velocidad promedio del gas	54
Ecuación 10. Flujo volumétrico estándar seco.....	54
Ecuación 11. Tasa de crecimiento de la población	62
Ecuación 12. Cantidad de vatios por vivienda	75
Ecuación 13. Número de viviendas iluminadas	75

Listado de Figuras

Figura 1. Composición óptima de biogás en una celda de relleno sanitario	9
Figura 2. Departamento de Santander y los municipios de influencia en el Carrasco	28
Figura 3. Ubicación geográfica de los municipios que disponen sus residuos en el relleno sanitario El Carrasco.....	28
Figura 4. Localización geográfica del sitio de disposición final El Carrasco.	29
Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología.....	32
Figura 6. Técnicas e instrumentos	33
Figura 7. Celdas de disposición final de residuos “El Carrasco”	40
Figura 8. Distribución de los residuos según sus propiedades o posibilidades de tratamiento y disposición final.....	43
Figura 9. Composición estimada de residuos que ingresan al relleno El Carrasco para el año 2017	44
Figura 10. Esquema Planta de Tratamiento de Lixiviados PTLX.....	51
Figura 11. Caudal promedio afluente a la PTLX para el periodo de febrero de 2019	53

Figura 12. Chimenea de gas en la celda 1	53
Figura 13. Caudales registrados en los ductos	55
Figura 14. Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo de olores ofensivos	56
Figura 15. Temperatura vs. Precipitación	58
Figura 16. Rosa de vientos	60
Figura 17. Rosa de vientos en el sitio de disposición final El Carrasco	61
Figura 18 Distancia Aeropuerto Internacional Palonegro al relleno sanitario El Carrasco	62
Figura 19. División Político Urbana del municipio de Bucaramanga.....	64
Figura 20. Mapa de Regiones Geográficas de Colombia.....	65
Figura 21. Localización de los ductos y las celdas instalados en 2018.....	68
Figura 22. Gráfica de resultados	74
Figura 23. Diagrama de la planta de compresión y tratamiento del biogás	78

1. Resumen

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal definir la estrategia de manejo ambiental para el proceso de recuperación del biogás, generado en el municipio de Bucaramanga (Santander), para la fase de cierre del relleno sanitario El Carrasco. Se inició con el diagnóstico ambiental del estado actual del relleno, mediante la recopilación de información primaria suministrada por la Empresa de Aseo de Bucaramanga (EMAB) así como secundaria, para lo cual se tuvo en cuenta teorías como las implicaciones del gas metano y los rendimientos teóricos de biogás a partir de los residuos sólidos dispuestos, en este diagnóstico se establecieron las variables que permitieron calcular la generación y recuperación de biogás mediante el modelo de la EPA US denominado “modelo colombiano de biogás”, el cual estableció una eficiencia del sistema de captura del 52%, una generación del biogás de 555 m³/hr y una recuperación de 551 m³/hr para el año 2019, así mismo como la capacidad máxima de la planta de electricidad de 0,9 MW. Estos resultados permitieron establecer 2 estrategias enfocadas al cumplimiento de los objetivos propuestos para darle un aprovechamiento energético al biogás y mitigar el impacto socioambiental en la población aledaña al relleno.

Palabras clave: Biogás, relleno sanitario, efecto invernadero, aprovechamiento.

Abstract

The main objective of this research work was to define the environmental management strategy for the process of recovery of biogas, generated in the municipality of Bucaramanga (Santander), for the closure phase of the El Carrasco landfill. It began with the environmental diagnosis of the current status of the filling, by collecting primary information supplied by the Bucaramanga Toilet Company (EMAB) as well as secondary, for which theories were taken into account such as the implications of methane gas and the theoretical yields of biogas from the disposed solid waste, in this diagnosis the variables that allowed to calculate the generation and recovery of biogas were established using the model of the EPA US called "Colombian model of biogas", which established an efficiency of the catch system of 52%, a generation of biogas of 555 m³/hr and a recovery of 551 m³/hr by 2019, as well as the maximum capacity of the 0,9 MW power plant. These results allowed to establish 2 strategies focused on the fulfillment of the proposed objectives to give an energetic use to the biogas and to mitigate the socioenvironmental impact on the population next to the filling.

Keywords: Biogas, landfill, greenhouse effect, development.

2. Introducción

El presente trabajo comprende el estudio acerca de la estimación de generación de biogás en un relleno sanitario, puesto que los residuos sólidos urbanos depositados en estos sitios no cuentan con un manejo apropiado y pueden producir problemas de contaminación de aire, agua y suelo, con el consecuente riesgo de la salud pública. Además, la contribución al efecto invernadero del metano, uno de los gases presentes en el biogás que se genera en los rellenos, el cual es 21 veces más potente respecto al dióxido de carbono (CO₂) (Aguilar, Taboada & Ojeda, 2011).

Por consiguiente, se ahondaron conceptos como generación y recuperación del gas metano en rellenos sanitarios y el cambio climático, puesto que el biogás recibe este nombre dado al proceso de descomposición anaerobia de los residuos confinados en el sitio de disposición final, siendo contribuyente directo a la generación y emisión de gases de efecto invernadero que se encuentra ligado con el cambio climático. Además de estas problemáticas, también se producen problemas ambientales y sociales.

Uno de los beneficios que actualmente se observan en los rellenos sanitarios es la adecuada captación y aprovechamiento del biogás para posteriormente ser aprovechados como energía o gas, esto con el fin de dar mitigación al problema ambiental y social producido por la actividad del relleno sanitario a las zonas de influencia.

Así, de esta manera, la metodología desarrollada se basa en un enfoque mixto, puesto que caracteriza por ser cuantitativo por la utilización del modelo colombiano de biogás y cuantitativo por la recolección y análisis de la información que pretende contribuir para guiar proyectos de esta índole. Para estimar el aprovechamiento final del biogás en la fase de cierre del relleno sanitario El Carrasco, se tuvo en cuenta un diagnóstico ambiental para evidenciar el estado actual del mismo y el uso de variables que permitieron el cálculo del biogás y así se describieron estrategias para el aprovechamiento del gas con fines energéticos.

Con base en lo anterior, cabe preguntarse ¿De qué manera la definición de estrategia de manejo ambiental sobre el biogás contribuye a mitigar impactos socioambientales producidos en el relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga-Santander?

En el presente trabajo se encuentra planteada una estrategia de manejo ambiental para el aprovechamiento de biogás a nivel interno del relleno sanitario que redundará en beneficios ecológicos, sociales y económicos, los cuales se pueden identificar a través del análisis de los resultados obtenidos por cada objetivo específico planteado.

3. Planteamiento del problema

El área metropolitana de Bucaramanga (Bucaramanga, Floridablanca, Piedecuesta y Girón) y otros 12 municipios: Betulia, Rionegro, Lebrija, Suratá, Charta, California, Matanza, El Playón, Tona, Los Santos, Santa Bárbara y Zapatocha, disponen sus residuos sólidos en el relleno sanitario El Carrasco.

La zona urbana de Bucaramanga tiene un historial de manejo de residuos sólidos muy similar al entorno mundial y nacional, como es el caso del relleno sanitario Doña Juana ubicado en la ciudad de Bogotá y el relleno sanitario Bordo Poniente en la ciudad de México; donde a través del tiempo se fueron implementando estrategias de manejo, que debido a la falta de continuidad en los proyectos no fueron viables y al contrario aumentaron la problemática. La ausencia de procedimientos que generen capacidad institucional y municipal para construir soluciones sostenibles, que den respuesta al manejo de los residuos sólidos en todos los componentes del servicio, considerando su impacto sobre la salud y el medio ambiente; lo social y lo económico, lo político y lo cultural, han hecho de esta problemática en la actualidad no solo en Bucaramanga, sino a nivel nacional un sistema complejo y de difícil solución (Alcaldía de Bucaramanga, 2016).

Según el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), para el año 2014 en el municipio de Bucaramanga, se registró una producción de 16.286 toneladas por mes y para el año 2015, 15.958 toneladas por mes; esto a su vez se ve reflejado con la cantidad de residuos sólidos generados por un habitante al día, expresado como Producción Per Cápita (PPC), la cual fue calculada a partir del periodo de Enero de 2014 a diciembre del mismo año, siendo 0,97 (Kg/habitante-día), ubicándose en un nivel de complejidad alto según lo establecido en el título F del Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) en el año 2003; demostrando con esto que el municipio debe implementar medidas para el aprovechamiento y reducción de los residuos sólidos (Ministerio de Vivienda, 2003). Así mismo, de acuerdo a las proyecciones realizadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), los habitantes para el año 2019 corresponde a 528.694 (DANE, 2005), el cual permite proyectar el cálculo de la PPC para dicho año arrojando 1 Kg/habitante-día.

Tal como es mencionado por Corena (2008), los residuos sólidos que son dispuestos en los rellenos sanitarios inician un proceso de descomposición química, produciendo así complejos a partir de los líquidos de lixiviados y gases. Los líquidos se forman por el percolado a través de sustancias en procesos de descomposición, del mismo modo, el flujo del líquido genera una disolución de algunas sustancias y partículas con otros compuestos químicos, por ende, algunos ácidos orgánicos formados en dicha etapa disuelven metales contenidos en residuos, que finalmente son transportados con el lixiviado.

En la siguiente figura, se presenta la composición óptima de biogás en una celda de relleno sanitario; el cual cuenta con 5 fases:

- Fase I: Aeróbica, que inicia inmediatamente después de la disposición de los residuos sólidos en el relleno sanitario y en la que las sustancias fácilmente biodegradables se descomponen por la presencia de oxígeno y se propicia la formación de dióxido de carbono, agua, materia parcialmente descompuesta registrando temperaturas entre 35 y 40 °C.
- Fase II: Aeróbica con el desarrollo de condiciones anaeróbicas en la que ocurre el proceso de fermentación, actúan los organismos facultativos con la producción de ácidos orgánicos y la reduce significativamente el pH, condiciones propicias para la liberación de metales en el agua y la generación de dióxido de carbono.
- Fase III: Anaeróbica, resultado de la acción de organismos formadores de metano (CH₄), que en las condiciones adecuadas, actúan lenta y eficientemente en la producción de este gas

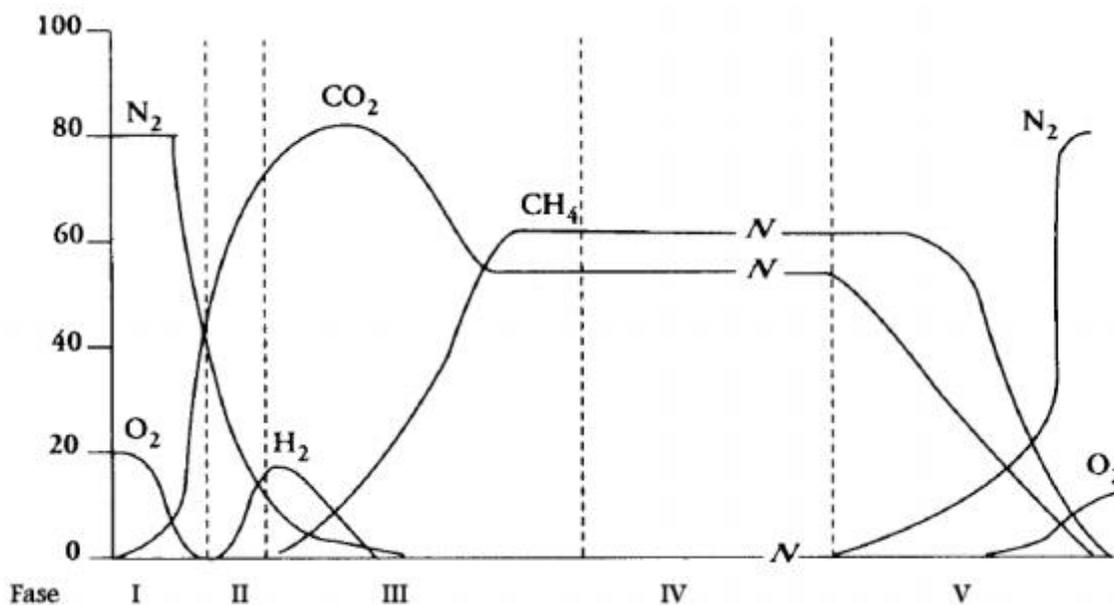
mientras reduce la generación de dióxido de carbono.

-Fase IV: Metanogénica estable, que registra la más alta producción de metano oscilando entre 40-60% de CH₄ en volumen.

-Fase V: Estabilización, la producción de metano comienza a disminuir y la presencia de aire atmosférico introduce condiciones aeróbicas en el sistema.

(Camargo & Vélez, 2009).

Figura 1. Composición óptima de biogás en una celda de relleno sanitario



Fuente: Camargo & Vélez, 2009 (figura 1)

Según el artículo titulado “Evaluación del uso de biogás en Rellenos Sanitarios: El caso de Mallasa” menciona que:

El principal componente de los gases emanados en los rellenos sanitarios es el metano, producido por la descomposición de la materia orgánica debido a la acción de microorganismos que se encuentran en el medio, la cual tiene dos etapas: anaerobia y aerobia. La primera, es la que predomina en el relleno sanitario porque no pasa el aire y no existe circulación de oxígeno, de ahí que se produzcan cantidades apreciables de metano y dióxido de carbono, así como trazas de gases de olor punzante, como el ácido sulfhídrico (H₂S), amoníaco (NH₃) y mercaptanos. El gas metano reviste el mayor interés porque, a pesar de ser inodoro e incoloro, es inflamable y explosivo, si se concentra en el aire en una proporción de 5 a 15% en volumen; los gases tienden a acumularse en los espacios vacíos dentro del relleno y aprovechan cualquier fisura del terreno o permeabilidad de la cubierta para salir. Cuando el gas metano se acumula en el interior del relleno y migra a las áreas vecinas, puede generar riesgos de explosión.

(Sánchez, 2016).

Dentro de los problemas que suscitan la falta de conocimiento de las implicaciones socioambientales del gas metano dentro del relleno, se destaca el venteo de los gases, el cual se encuentra relacionado con el inadecuado diseño de las chimeneas de evaporación de gases y por ende de las condiciones meteorológicas, generando así problemas de salud.

Un estudio realizado por el departamento de salud de Nueva York en el año 1998, donde se

analizaba la presencia de compuestos orgánicos volátiles (COV) emitidos por 25 rellenos, reportó haber encontrado tetracloroetileno, tricloroetileno, tolueno, 1, 1, 1-tricloroetano, benceno, cloruro de vinilo, xileno, etilbenceno, cloruro de metileno, 1,2-dicloroetano y cloroformo en los gases que escapaban y los efectos en la salud de algunos de estos compuestos (Quispe, Núñez & Sánchez, 2018).

De esta manera, es importante resaltar las consecuencias de estos gases que son emitidos directamente a la atmósfera, en especial el metano, el cual es el segundo mayor contribuyente al calentamiento global (15%), después del dióxido de carbono (55%) (Echeverri, 2006). Además, según el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático), el potencial de calentamiento global del metano (en un horizonte temporal de 100 años) es 21 veces mayor que el del dióxido de carbono. Sin embargo, debido a su tiempo de vida atmosférico más corto (de 12 años), se estima que las emisiones totales sólo deberán reducirse en aproximadamente el 8% de los niveles actuales para estabilizar las concentraciones de metano (IPCC, 1996).

Según el Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero, la emisión total de residuos presenta un incremento del 2% promedio anual durante el periodo reportado (1990-2012), influenciado principalmente por el aumento de la participación de la categoría de eliminación de desechos sólidos, en la cual el metano representa un 91,43 %, seguido por dióxido de nitrógeno y dióxido de carbono. Esto a su vez, se encuentra reflejado en el departamento de Santander; ya que para el año 2012 las emisiones y absorciones fueron de 195,72 miles de toneladas (Kton) de Gases Efecto Invernadero (GEI), respectivamente (Ideam, et al., 2016).

En cuanto a las enfermedades que se generan a partir de la emisión de los GEI, la población está expuesta a partículas atmosféricas que son inhaladas a través del tracto respiratorio, afectando la salud, puesto que las partículas más pequeñas alcanzan los pulmones, donde quedan retenidas o, si son todavía más pequeñas, pasan a los fluidos corporales. Según datos de la Secretaría de Salud de Santander, las causas de muerte en niños menores de 1 año son las enfermedades del sistema respiratorio, entre otras, con una tasa promedio anual de 55,2 casos por cada 100.000 habitantes; y en los niños de 1 a 4 años, las principales causas de mortalidad fueron las externas como accidentes que obstruyen la respiración, seguido de las enfermedades del sistema respiratorio (tasa anual de 7,4 casos por 100.000 habitantes) (Secretaría de Salud de Santander, 2014).

El relleno sanitario del Área Metropolitana de Bucaramanga, en sus inicios se denominó como botadero a cielo abierto, desde entonces hasta la actualidad ha sido utilizado como sitio para disponer los residuos sólidos que se generan en la región, causando problemas de tipo ambiental, social y jurídico, este sitio ha tenido diferentes inconvenientes de tipo técnico y legislativo, puesto que no ha cumplido con las obligaciones requeridas por las autoridades ambientales competentes, convirtiéndolo de acuerdo con el SIU (Sistema Único de Información de Residuos Sólidos) en uno de los puntos de disposición más críticos del país.

(Franco, et al., 2018).

En la actualidad el relleno sanitario El Carrasco finalizó su ciclo de vida y a pesar de ello sigue funcionando aún bajo la declaratoria de una emergencia sanitaria (Franco, et al., 2018). Cabe resaltar que la autoridad de licencias ambientales (ANLA) dio la orden del cierre definitivo del Carrasco para el año 2019, debido a los múltiples problemas tanto técnicos como ambientales que se originaron a partir de la operación de este. Además, se surgieron problemas sociales que originaron conflictos entre la población aledaña al relleno con el alegato de que este les generó una disminución en su calidad de vida.

El relleno sanitario El Carrasco se ha caracterizado por las problemáticas y la emergencia ambiental declarada por la Alcaldía de Bucaramanga mediante Decreto 153 de 2017; esto ha sido

causa al daño de los recursos agua, aire, suelo, fauna y flora de este territorio y preocupación de la comunidad aledaña al relleno.

Dentro de los problemas ambientales, se suscitan los siguientes:

Existen serias afectaciones debido a la generación de olores ofensivos por las deficiencias en las labores de cobertura diaria de los residuos, lixiviados generados y vertidos a las fuentes hídricas aledañas al sector (quebradas la Iglesia y El Carrasco), y lixiviados almacenados en los pondajes. Los gases emitidos comprenden compuestos nitrogenados y sulfurados (NH_3 , N_3 , H_2S), CO_2 , óxido nitroso (N_2O) y metano en mayor proporción. Además se ha presentado agrietamiento y fractura de taludes, asentamiento diferencial por extracción de lixiviados y el reacomodamiento de los materiales o el proceso de drenaje de las lagunas de lixiviados; así mismo, existe un problema en la celda 3, pues constituye una amenaza grave ya que su colapso afectaría la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), la zona administrativa, y asentamientos ubicadas en las afueras del relleno.

(Franco, et al., 2018).

4. Justificación

El presente trabajo de investigación tiene como propósito estimar la generación y recuperación del gas metano del relleno sanitario El Carrasco, con el fin de proponer una estrategia de manejo ambiental para la fase de cierre y darle un adecuado aprovechamiento final; igualmente identificar los problemas socioambientales que tiene la propagación del gas metano en el territorio, debido a que se hace necesaria la reducción eficaz de las emisiones de metano a corto plazo, para evitar aumentar su concentración en el ambiente, de forma que se convierta en un problema mayor por su alta contribución al efecto invernadero.

Cabe resaltar, que el problema actual por el que atraviesa el relleno sanitario es generado por múltiples causas, una de ellas es el venteo de gases en consecuencia del mal diseño de las chimeneas generando contaminación atmosférica. Otro problema de gran magnitud es la generación y vertimiento de lixiviados a fuentes hídricas causando contaminación a este recurso siendo de gran importancia tanto ambiental como social, adicional a esto, se evidencia falta de implementación de tecnologías y poca área de control para el relleno lo cual crea efectos negativos como conflictos sociales por el terreno, proliferación de vectores y olores, enfermedades a la comunidad, y liberación de sustancias altamente tóxicas generando problemas como el cambio climático.

Algunos autores han estudiado la influencia de diferentes factores ambientales, tales como el viento y la presión atmosférica en emisiones de biogás provenientes de rellenos sanitarios y su dispersión en la atmósfera, reportando en algunos casos alta variabilidad espacial en las emisiones debido a las diferencias en la capacidad de producción de biogás y la influencia de factores como la composición de los residuos, el tipo de material de cobertura y la edad del residuo depositado en el relleno (Camargo & Vélez, 2009). Se han registrado evidencias de concentraciones elevadas de metano y otros tipos de contaminantes en zonas habitadas ubicadas a menos de 3 km de rellenos sanitarios, con un gradiente de concentración desde la fuente emisora objeto de estudio, como el origen de estos gases (Gómez, 2008).

La estimación del biogás emitido desde sitios de disposición final de residuos sólidos es uno de los objetivos previstos en el Protocolo de Kioto, de hecho; resulta fundamental evaluar la contribución de los rellenos sanitarios, botaderos y plantas de compostaje a lo largo del tiempo por la producción de biogás, así como establecer medidas que puedan adoptarse para la reducción de los gases emitidos (Aronica, et al., 2009).

5. Pregunta problema

¿De qué manera la definición de estrategia de manejo ambiental sobre el biogás contribuye a mitigar impactos socioambientales producidos en el relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga (Santander)?

6. Objetivos

6.1 Objetivo general

Definir la estrategia de manejo ambiental sobre el biogás, para la fase de cierre del relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga (Santander).

6.2 Objetivos específicos

- ✓ Establecer las variables que determinan el cálculo del biogás, a través de un diagnóstico ambiental del relleno sanitario.
- ✓ Estimar la generación y recuperación del biogás en el relleno sanitario mediante la herramienta automatizada “Modelo colombiano de biogás”.
- ✓ Establecer los lineamientos que permitan medir el funcionamiento de la estrategia de manejo ambiental sobre el biogás.

7. Marcos de referencia

En este capítulo se presenta los marcos de referencia aplicados al proyecto, en el cual es importante la revisión bibliográfica del tema en cuestión. Inicialmente, los antecedentes relacionados con el sitio de disposición final El Carrasco y los estudios que se han realizado sobre la generación y recuperación del gas metano, seguido de las teorías que apalancan el trabajo de investigación, se convierten en los soportes a la solución de la problemática, resaltando los conceptos claves en el marco conceptual para entender las teorías abordadas.

Posteriormente, se expone la normatividad vigente relacionada con las medidas de protección al medio ambiente, calidad del aire y máximos permisibles, entre otras; y por último la ubicación geográfica del caso de estudio seleccionado.

7.1 Antecedentes

La elección del sitio como área de disposición de residuos de la región, el cual tiene por nombre El Carrasco, fue realizado por un convenio suscrito en 1977, entre el municipio de Bucaramanga, Empresas Públicas de Bucaramanga y una firma consultora canadiense “GEORGE RIVOCHÉ”, que localizó y determinó la zona como apta para la realización de este proyecto (Torrado & Rondón, s.f).

Este territorio se remonta en el año de 1978, como botadero a cielo abierto durante más de 20 años, hasta el año 1998 en donde Empresas Públicas de Bucaramanga decide presentar ante la Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) un plan de manejo ambiental, por la cual se establece la Resolución 753 del 13 de Agosto del mismo año (ANLA, 2018).

En marzo de 2005, el Gobierno Nacional expidió el Decreto 838 de 2005, el cual consagró formalmente los procedimientos, criterios, metodología, restricciones y prohibiciones para la localización de áreas para disposición final de residuos mediante la tecnología de relleno sanitario, conocido como PGIRS (Torrado & Rondón, s.f).

En los años consecutivos, la EMAB ha venido recibiendo una serie de sanciones referentes al deficiente manejo técnico y ambiental de este relleno sanitario, conllevado a que la Alcaldía de Bucaramanga y su Área Metropolitana, decretaran emergencia sanitaria en 2011 para poder continuar la disposición en el sitio, a partir de la cual se han proferido un total de 4 emergencias sanitarias así:

- Decreto 0234 de 01 de octubre de 2011: Mediante el cual la Alcaldía de Bucaramanga declaró inicialmente por seis (6) meses la emergencia sanitaria, a raíz de la orden de cierre definitivo dada por el tribunal.
- Decreto 0056 de 30 de marzo de 2012: Mediante el cual la Alcaldía de Bucaramanga prorrogó, a partir del 1 de abril del 2012, por un término de diez y ocho meses (18) el estado de emergencia sanitaria declarado por el municipio de Bucaramanga mediante el decreto 0234 del 2011.
- Decreto 0190 de 30 de septiembre de 2013, el cual amplía la situación de riesgo de calamidad pública y estado de emergencia sanitaria en el municipio de Bucaramanga hasta el 30 de septiembre de 2015, fecha para la cual se dispuso la orden de judicial de cierre definitivo del Relleno Sanitario El Carrasco.
- Decreto 0158 del 25 de septiembre de 2015, por medio del cual Alcalde de Bucaramanga prorrogó a partir del 01 de octubre de 2015, y hasta por el término de veinticuatro (24)

meses, la declaratoria de existencia de situación de riesgo de calamidad pública que da lugar al estado de emergencia sanitaria y ambiental en el Municipio de Bucaramanga. (ANLA, 2018).

Actualmente, a partir del 1 de febrero de 2019 el sitio de disposición de residuos sólidos El Carrasco viene realizando la fase de cierre, fase en la que los residuos sólidos que ingresen a partir de dicha fecha se dispondrán únicamente con el fin de construir las estructuras de contención que garanticen la estabilización de las celdas existentes, y que por consiguiente tendrán un término definitivo en relación con el ingreso de residuos al sitio de disposición final, de acuerdo con el análisis técnico presentado en el Plan de Desmantelamiento y Abandono por medio de la Resolución 153 de 2019 (ANLA, 2019).

7.2 *Estado del arte*

Como parte del marco de referencia, en este apartado se hizo una revisión bibliográfica en donde a través del tiempo se han realizado trabajos previos sobre el manejo de gases, la producción de biogás y su respectiva recuperación en sitios de disposición final, denominados rellenos sanitarios.

7.2.1 *Generación y recuperación del gas metano en rellenos sanitarios*

El documento titulado ***“Alternativas de captación y tratamiento del biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba, Argentina”***, expone las opciones inherentes a la captación y el tratamiento de biogás en el Predio de Enterramiento Sanitario Piedras Blancas; para ello se plantearon diferentes alternativas geométricas para la red de captación de gases, se analizaron las mismas y se seleccionó una configuración matricial. La red seleccionada fue modelada mediante el Software EPANET, para verificar el comportamiento hidráulico de captación de gases propuesta (González, 2014).

Dentro de las alternativas de tratamiento para el biogás, se suscita la recuperación o no de energía, enmarcando la diferencia entre las alternativas, ya que en ambas el gas generado dentro del relleno sanitario se quema, pero en la alternativa de generación se está utilizando el calor generado en esa quema para producir energía eléctrica.

Aduce la investigación, no se recomienda realizar este tipo de proyectos en carácter “temporal”, si no realizar estos trabajos con una visión a largo plazo y con las consideraciones técnicas que un proyecto de esta magnitud necesita; por otro lado, se recomienda optar por la alternativa de quema directa ya que la inversión inicial es baja con respecto a la otra y el costo de operación es nulo, toda vez que es un sistema más simple con menor tecnología (González, 2014).

El artículo titulado ***“Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios”***, tuvo como objetivo estudiar modelos de cálculo de producción de biogás proveniente de rellenos sanitarios, con énfasis en la captura y aprovechamiento energético, tanto en forma de calor como electricidad (López, 2016).

La metodología empleada para este trabajo, se resume en la recopilación de antecedentes sobre rellenos sanitarios, un estudio modelo de predicción de biogás, caracterización de rellenos sanitarios chilenos y por último la selección de tecnologías a estudiar aplicando el respectivo modelo de estudio de ingeniería, tomando como caso el relleno sanitario Osorno y El Molle en Chile.

En lo referido a las tecnologías de aprovechamiento energético, se identificaron tres categorías: generación eléctrica o cogeneración, uso directo del biogás de medio grado de energía y comercialización de biogás de alto grado de energía asimilable a gas natural.

Como conclusión de este trabajo, se menciona que se empleó el modelo LandGEM, para representar mejor el fenómeno de generación de biogás, se complementa dicho modelo con la metodología IPCC, el método estequiométrico y una metodología de evaluación difusa, que en conjunto permitieron determinar los valores de las constantes cinéticas y la composición del biogás (López, 2016).

El estudio planteado en el artículo **“Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia”**, tuvo como objetivo estimar el potencial de generación de biogás proveniente de diferentes rellenos sanitarios y exponer las condiciones para implementar el modelo y lo compara con resultados experimentales, para el caso del relleno sanitario La Glorita de la ciudad de Pereira.

Se concluye que los modelos ampliamente utilizados son el modelo colombiano de biogás y el Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. El primero está aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA), ya que para su desarrollo permite tener en cuenta diferentes regiones del país, en las cuales varían los pisos térmicos y los niveles de pluviosidad (Andrade, Restrepo & Tibaquirá, 2018).

7.2.2 Influencia de los rellenos sanitarios en el cambio climático

De acuerdo con (Díaz, et al., 2017) en su trabajo **“Emisión de gases de efecto invernadero en dos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México”** se plantea la necesidad de determinar la generación del metano como GEI en un relleno sanitario y un botadero a cielo abierto. Para ello, se evaluaron las condiciones de operación, se caracterizaron los residuos sólidos urbanos confinados en temporadas de lluvias y estiaje y se determinó la generación de metano puntual y difuso (Díaz, et al., 2017).

El método utilizado se adapta a una descripción de los sitios de estudio, luego se realizó una caracterización de los residuos sólidos urbanos en el cual se seleccionaron aleatoriamente cinco puntos en cada una de ellas, con el fin de cubrir el total del área y por último se realizaron los respectivos muestreos y la cuantificación de CH₄; para el relleno sanitario se muestrearon 24 pozos de venteo de biogás y las superficies de las Celdas 1, 2 y 3, y para el botadero a cielo abierto se analizó el único pozo activo, ya que los otros fueron destruidos (Díaz, et al., 2017).

Como conclusión, se determinó que el monitoreo del biogás permitió tener mayor certeza de la contribución de GEI de los sitios de disposición estudiados, lo cual es relevante para mejorar su operación, contemplar su aprovechamiento y reducir su impacto al ambiente (Díaz, et al., 2017).

El artículo titulado **“Evaluación de la generación de biogás en rellenos sanitarios en Colombia en el marco del protocolo de Kioto”** se estimó la generación de biogás en el relleno sanitario La Glorita de la ciudad de Pereira y el comportamiento histórico frente al desarrollo de proyectos MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio) (Ordoñez, 2011).

El desarrollo de la investigación se basó en un estudio de tipo exploratorio, basado en fuentes primarias y secundarias para recolección de información, aportando al estudio la secuencia metodológica piloto aplicable a Colombia, además del análisis de criterios técnicos aplicables para el logro de una primera aproximación a la estimación de la generación de biogás de rellenos sanitarios.

De esta investigación se muestra que, este gas es un problema que genera consecuencias graves ambientalmente a largo plazo, pues el biogás producto de los residuos urbanos contiene dos de los principales gases de efecto invernadero en una concentración importante, como son el metano

y el dióxido de carbono. Como se menciona en el documento, estos gases son causantes del efecto invernadero debido a que al ser liberados al ambiente se almacenan en la atmósfera, aumentando su concentración en la capa de ozono y por sus propiedades, han ido aumentando la temperatura interna del planeta causando un gran número de desastres como sequías e inundaciones (Ordoñez, 2011).

El estudio realizado por Carlos Borda titulado “**Biogás: una alternativa energética para los rellenos sanitarios urbanos y un beneficio mitigador de cambio climático**” se hace importante realizar un análisis sobre si este tipo de proyectos contribuye efectivamente a la disminución de gases de efecto invernadero y así poder tener una visión más clara sobre este tipo de metodologías.

Para la realización de este trabajo se hizo necesario realizar un análisis investigativo sobre el gas proveniente de los rellenos sanitarios urbanos y su tratamiento sin dejar a un lado las observaciones y estudios realizados en el relleno sanitario Doña Juana de la ciudad de Bogotá D. C.

Finalmente, trae beneficios como la reducción de rellenos clandestinos, lo cual disminuye el impacto ambiental que estos generan; la oferta de fuentes de empleo debido a la posible instalación de plantas de energía significando así una reducción de GEI a la atmósfera (Borda, 2016).

7.3 Marco conceptual

Por el marco conceptual de este proyecto, se entiende como la representación general de toda la información que se maneja en el proceso de investigación, el cual para llevar a término la investigación es necesario precisar de manera ordenada ciertos conceptos básicos que aportan al proyecto.

- **Estrategia ambiental:** se define como un plan cuya finalidad es mitigar los efectos sobre el medio ambiente de las operaciones de la empresa y sus productos. Los efectos ambientales incluyen aquellos relacionados con el agotamiento de los recursos naturales escasos, los relativos a la acumulación y emisión de residuos, y los efectos colaterales del uso de materiales y de entornos no saludables (Carmona & Magán, 2008).
- **Diagnóstico ambiental:** se constituye con base en el análisis de la organización para identificar los impactos ambientales generados por sus actividades y la posibilidad de proponer acciones de mejora a la situación ambiental actual del lugar a estudiar (CEPPIA, 2004).
- **Residuo sólido municipal:** los residuos sólidos municipales (RSM) son aquellos que provienen de las actividades domésticas, comerciales, industriales (pequeña industria y artesanía), institucionales (administración pública, establecimientos de educación, etc.), de mercados, y los resultantes del barrido y limpieza de vías y áreas públicas de un conglomerado urbano, y cuya gestión está a cargo de las autoridades municipales (Jaramillo, 2002).
- **Relleno sanitario:** es una técnica de disposición final de los residuos sólidos en el suelo que no causa molestia ni peligro para la salud o la seguridad pública; tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de su clausura. Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen (Jaramillo, 2002).

- **Relleno mecanizado:** es aquel diseñado para las grandes ciudades y poblaciones que generan más de 40 toneladas diarias, por sus exigencias es un proyecto de ingeniería bastante complejo, que va más allá de operar con equipo pesado (Jaramillo, 2002).
- **Relleno semi mecanizado:** es aquel diseñado para poblaciones que generen o tengan que disponer entre 16 y 40 toneladas diarias de residuos sólidos municipales en el relleno sanitario, es conveniente usar maquinaria pesada como apoyo al trabajo manual, a fin de hacer una buena compactación de la basura, estabilizar los terraplenes y dar mayor vida útil al relleno (Jaramillo, 2002).
- **Relleno manual:** es una adaptación del concepto de relleno sanitario para las pequeñas poblaciones que por la cantidad y el tipo de residuos que producen (menos de 15 Ton/día), además de sus condiciones económicas, no están en capacidad de adquirir el equipo pesado debido a sus altos costos de operación y mantenimiento (Jaramillo, 2002).
- **Botadero de basura a cielo abierto o basurero:** es el sitio donde los residuos sólidos se abandonan sin separación ni tratamiento alguno. Este lugar suele funcionar sin criterios técnicos en una zona de recarga situada junto a un cuerpo de agua, un drenaje natural, etc. Allí no existe ningún tipo de control sanitario ni se impide la contaminación del ambiente; el aire, el agua y el suelo son deteriorados por la formación de gases y líquidos lixiviados, quemas y humos, polvo y olores nauseabundos (Jaramillo, 2002).
- **Gases:** un relleno sanitario se comporta como un digestor anaerobio debido a la descomposición o putrefacción natural de los residuos, no solo se producen líquidos sino también gases y otros compuestos. La descomposición de la materia orgánica por acción de los microorganismos presentes en el medio tiene dos etapas: aerobia y anaerobia (Jaramillo, 2002).
- **Descomposición aerobia:** es aquella fase en la cual el oxígeno que está presente en el aire contenido en los intersticios de la masa de residuos enterrados es consumido rápidamente (Jaramillo, 2002).
- **Descomposición anaerobia:** es la que predomina en el relleno sanitario porque no pasa el aire y no existe circulación de oxígeno, de ahí que se produzcan cantidades apreciables de metano y dióxido de carbono, así como trazas de gases de olor punzante, como el ácido sulfhídrico, amoníaco y mercaptanos (Jaramillo, 2002).
- **Biogás:** es una mezcla de gases, producto del proceso de descomposición de la materia orgánica y cuyo principal componente es el metano, es quemado con el objetivo de reducir olores ofensivos y evitar que el gas quede expuesto al ambiente ya que es uno de los principales gases de efecto invernadero (EMAB, 2018).
- **Líquido lixiviado o percolado:** la descomposición o putrefacción natural de la basura produce un líquido maloliente de color negro, conocido como lixiviado o percolado, parecido a las aguas residuales domésticas, pero mucho más concentrado (Jaramillo, 2002).
- **Impacto ambiental:** se refiere al impacto ambiental como la alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por acciones humanas o actividad en un área determinada. Este autor, opina que los impactos ambientales pueden ser positivos o negativos, es decir, beneficiosos o no deseados (Obando, 2009).

- **Impacto social:** el impacto social se refiere al cambio efectuado en la sociedad debido al producto de las investigaciones (Libera, 2007).

7.4 Marco teórico

Para lograr una articulación de la investigación en términos de la generación y recuperación del gas metano y su relación con los GEI, es fundamental fortalecer los conceptos y temáticas con teorías que apalanquen la importancia del desarrollo investigativo de manera amplia, ordenada e integral. En este caso, se plasman cuatro teorías basadas en el cambio climático en Colombia, implicaciones del gas metano, rendimientos teóricos de biogás; y, por último el modelo colombiano de biogás.

7.4.1 Cambio climático en Colombia

La generación e incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero son principalmente provenientes de actividades humanas, siendo acumuladas en la atmósfera del planeta, por ende es el principal responsable del cambio climático que actualmente se experimenta.

Colombia al firmar y ratificar la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático se comprometió a reportar periódicamente sus emisiones de GEI en cada uno de los cuatro módulos que contempla el IPCC; dentro del cual se encuentra energía y residuos.

Los GEI primarios son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el Ozono (O₃), sin embargo, la atmósfera contiene otros gases también considerados GEI, como los halocarbonos u otras sustancias que contienen cloro y bromo, el CO₂, del N₂O y del CH₄, el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC) (Ideam, et al., 2017).

En cuanto a la permanencia en el tiempo de los GEI se estima que el tiempo de vida en la atmósfera para estos se extiende desde los 15 años para el metano y los 120 años para el óxido nitroso, mientras que para el dióxido de carbono está entre los 100 y 150 años. El hecho de que tanto el N₂O y el CO₂ tengan un periodo de duración superior a los 100 años rompe el paradigma de que estas emisiones se pudiesen reducir a cero (Pinzón, s.f). La importancia de la recolección y equivalencia a CO₂, y su incidencia en el calentamiento global por su carácter de gas de efecto invernadero se deduce del GWP (gross warming potential) ver Tabla 1.

Tabla 1. Permanencia de los GEI en la atmósfera según el GWP (potencial de calentamiento bruto)

Gas	Tiempo de vida en la atmósfera (años)	GWP, horizonte de 90 años
CO ₂	50-200	1
CH ₄	12	21
N ₂ O	104	269-39
Perclorofluorocarbonados	Se desconoce	6.500
Hidroclorofluorocarbonados	Se desconoce	12.000
SF ₆	3.200	22.200

Fuente: Pinzón, s.f

Las emisiones totales de GEI en Colombia para el año 2017 fueron de 258,8 Mton CO₂ eq, lo cual contempla un escenario negativo dado a que su emisión mundial fue de 0,37% y en los últimos años reporta un aumento del 0,42 %; siendo de gran preocupación para Colombia por ocupar el quinto puesto de los 32 países de América Latina y el Caribe y el puesto 40 entre los 184 países que monitorea el Instituto Mundial de Recursos del Banco Mundial (WRI) en emisiones mundiales de GEI (Ideam, et al., 2017).

Según la distribución de las emisiones en Colombia por sectores de la economía como lo son: transporte, agropecuario, forestal, comercial y residencial e industria manufacturera; y por módulos IPCC, los sitios gestionados de eliminación de desechos emiten el 2% de los GEI totales. En donde los sectores con mayores emisiones de GEI son los relacionados con cambios en el uso del suelo (62%), transporte (11%) e industria manufacturera (11%) (Ideam, et al., 2017).

Entre 1971 y 2015 la temperatura promedio del país aumentó en 0,80 °C, lo cual se ve reflejado en los efectos negativos que estos cambios pueden ocasionar como el aumento del nivel del mar, retroceso de páramos, derretimiento de páramos y glaciares, mayor incidencia de fenómenos climáticos extremos, reducción en la actividad agropecuaria, mayor incidencia de las olas de calor especialmente en áreas urbanas, disminución de la productividad de los suelos agrícolas, incremento en proceso de desertificación, pérdidas de fuentes y cursos de agua (Ideam, et al., 2017).

Actualmente Colombia está adelantando acciones para mitigar el cambio climático a partir de 33 metas priorizadas por los ministerios. El país adquiere una meta de reducción de 66,5 Mton CO₂eq en 2030, que corresponde al 20% de las emisiones estimadas en la línea base. De contar con cooperación internacional, esta meta puede incrementarse hasta 30%, logrando unas reducciones adicionales de 33,4 Mton CO₂eq (Ideam, et al., 2017).

7.4.2 Implicaciones del gas metano

El metano es uno de los compuestos más contaminantes asociado con el efecto invernadero, por lo tanto; sus estrategias para la reducción de sus emisiones, ofrece un mecanismo eficiente de mitigación del calentamiento global, que representa cerca del 18%. La concentración de metano en la atmósfera se ha incrementado alrededor de 0,6 % al año, lo que representa actualmente más del doble en los últimos doscientos años (IPCC, 1990), en contraste con el bióxido de carbono, que incrementa su concentración en la atmósfera alrededor de 0,4 % al año. Las emisiones de metano a nivel mundial asociadas al vertido de residuos han sido estimadas por la EPA entre 22 y 46 millones de toneladas por año, con una media de 34 millones de toneladas por año (Pinzón, s.f).

El metano tiene una vida media de doce años en la atmósfera, mientras que el bióxido de carbono permanece más de 120 años (IPCC, 1992); así, que el metano con su alto poder de absorción, las radiaciones y su vida corta, hace que tenga un impacto inmediato en el cambio climático. También, el biogás generado puede generar riesgo de explosión, incendio e intoxicación según sea la caracterización del mismo y el tiempo de exposición.

La siguiente es una lista de razones comunes para controlar el gas metano:

- El gas metano es altamente combustible generando un riesgo importante en el sitio de disposición final de residuos.
- El gas metano en grandes concentraciones presenta riesgos para seres humanos y animales.
- El gas metano que se produce en rellenos sanitarios y ventea directamente a la atmósfera, tiene olores desagradables generando impacto en las poblaciones aledañas.

Ahora bien dentro de la composición típica de gases que se producen dentro de un relleno sanitario el cual se detalla en la tabla 2, se hace énfasis en el porcentaje del gas metano (45-60), dado a que será el gas a evaluar en este proyecto de investigación.

Tabla 2. Composición típica de gas de vertederos de Residuos Sólidos Urbanos

COMPONENTE	PORCENTAJE (BASE VOLUMEN SECO)
Metano	45-60
Dióxido de carbono	40-60
Nitrógeno	2-5
Oxígeno	0,1-1,0
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos	0-1,0
Amoníaco	0,1-1,0
Hidrógeno	0-0,2
Monóxido de carbono	0-0,2
Constituyentes en cantidades traza	0,01-0,6
Características	Valor
Temperatura	37-67 °C
Densidad específica	1,02-1,06
Contenido de humedad	Saturado
Poder calorífico superior [Kcal/m ³]	890-1.223

Fuente: González, 2014

7.4.3 Rendimientos teóricos de Biogás a partir de los residuos sólidos dispuestos

En teoría, la cantidad de biogás que se genera de una tonelada de carbono biodegradable corresponde a 1,868 Nm³ (metro cúbico normal). En países industrializados, la cantidad teórica es de 370 Nm³ de biogás por cada tonelada de basura depositada. En general, la evidencia empírica en los países desarrollados ha demostrado que la biodegradación ocurre en forma dispereja e imperfecta, por lo que se considera que la generación de biogás se aproximaría más a los 200 Nm³ por cada tonelada de basura depositada que a la cifra anterior (Colmenares, et al., 2007).

Ahora bien, el programa de divulgación de metano en vertederos de la EPA de Estados Unidos recomienda varios métodos para estimar con mayor o menor precisión la generación de biogás en un relleno sanitario:

- ✓ **El “Método A: Aproximación Simple”:** Es una aproximación gruesa basada en la cantidad de basura depositada en un relleno, el procedimiento se basa en una razón empírica entre cantidad de basura y flujo de biogás observado en los muchos y variados proyectos de recuperación de biogás de rellenos sanitarios estudiados por este programa. Es un reflejo de las características del relleno promedio y puede no representar con precisión las distintas características de los residuos, el clima y otras variables que pueden estar presentes en un relleno específico. Esta regla simple de aproximación sólo requiere conocimientos acerca de la cantidad de basura depositada en el relleno de interés y se nutre del juicio y experiencia de expertos de la industria, que han establecido que la generación de biogás varía entre 0,05 y más de 0,20 pies cúbicos (pc) al año por cada libra (lb) de residuos.
- (EPA, 1996)

Lo que da la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Método de aproximación simple

$$\text{Generación anual de biogás (pc)} = 0,10 \frac{\text{pc}}{\text{lb}} * 2000 \frac{\text{lb}}{\text{ton}} * \text{cantidad de basura(ton)}$$

- ✓ **Método B: “Modelo de degradación de primer orden”:** El cual puede ser usado para contabilizar el cambio en la tasa de generación de biogás de acuerdo a la vida útil del proyecto de relleno. El modelo de degradación de primer orden es más complicado que la gruesa regla anterior y requiere de mayor conocimiento de las características del relleno, al menos en lo que se refiere a las siguientes 5 variables:
- Promedio anual de recepción de basura
 - Número de años que el relleno lleva abierto
 - Número de años que el relleno lleva cerrado, sin recibir basura, si corresponde
 - Potencial de generación de metano de la basura
 - Tasa de generación anual de metano de la basura.
- (EPA, 1996)

Ecuación 2. Método de degradación de primer orden

$$LFG = 2L_0 R (e^{-kc} - e^{-kt})$$

Donde:

LFG = Total de biogás generado en el año corriente (pies cúbicos)

L_0 = Potencial total de generación de metano de la basura (pie cúbico/libra)

k = Tasa anual de generación de metano

R = Tasa promedio de recepción de basura anual durante la vida activa (libras)

t = Tiempo en años desde que se abrió el relleno (años)

c = Tiempo en años desde que se cerró el relleno (años).

El potencial de generación de metano L_0 , representa la cantidad total de metano por peso que la basura generaría durante su proceso de descomposición en un relleno sanitario. La constante de degradación, k , representa la tasa a la cual el metano es liberado de cada libra de residuo. El total de biogás que se genera en el relleno es simplemente la multiplicación por 2 de la generación de metano calculada por el modelo (de ahí el factor 2 en la fórmula).

El supuesto es que la mitad del biogás está constituida por metano. Si estos valores fueran conocidos, el modelo podría predecir con bastante precisión la generación de metano, puesto que tanto (L_0) como (k) varían mucho de acuerdo a las características de cada relleno y los residuos recibidos y el clima afecta especialmente al factor k .

(EPA, 1996)

En la utilización de este modelo el Landfill Gas for Energy el programa de la EPA recomienda utilizar los siguientes rangos de valores:

Tabla 3. Rango de valores

Variable	Rango	Valores sugeridos		
		Clima húmedo	Clima semi-húmedo	Clima seco
Lo(pies ³ /libra)	0-5	2,25-2,88	2,25-2,88	2,25-2,88
K (1/año)	0,003-0,4	0,1-0,35	0,05-0,15	0,02-0,10

Fuente: EPA, 1996

7.4.4 Modelo colombiano de biogás para rellenos sanitarios

El Modelo Colombiano de Biogás, provee una herramienta automática para la estimación de la generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios municipales, cuyo propósito es brindar a los propietarios y operadores una herramienta para evaluar la factibilidad y beneficios de recuperar y usar el biogás generado (EPA, 2009).

Los factores que influyen en la generación de biogás están en función de los índices de disposición de los residuos así como la caracterización (disponibilidad del material orgánico en donde los microorganismos descomponen los residuos y producen CH₄ y CO₂).

Además, las condiciones dentro de la masa de los residuos:

- Humedad (la precipitación se usa para estimar la humedad)
- Temperatura y pH (impactos secundarios)
- Condiciones anaerobias (está limitado por la profundidad del relleno sanitario, compactación de los residuos o recubrimiento superior, pueden promover las condiciones aerobias tóxicas a las bacterias).

(EPA, 2009)

El método utiliza una ecuación de primer orden para estimar la generación de metano en rellenos sanitarios usada por la EPA LandGEM con las siguientes variables:

Ecuación 3. Ecuación de primer orden

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k * L_0 * \left(\frac{Mi}{10}\right) * e^{-ktij} (MCF)(F)$$

Donde:

- Q_{CH₄} = Generación anual de metano en el año calculado (m³ /año)

- M_i = Índice de disposición de residuos (Mg/año)
- L_0 = Potencial de la generación de metano (m^3 /Mg)
- k = Constante del índice de generación de metano (1/año)
- n = (año calculado) – (año inicial de aceptación de los residuos)
- i = 1 incremento del año
- j = 0,1 incremento del año
- t_{ij} = Año de la j sección de residuos aceptados en el i año
- MCF= Factor de corrección de metano
- F= Factor de ajuste por incendios

(EPA, 2009).

La recuperación y generación de biogás en los rellenos sanitarios está relacionada por medio de la “eficiencia de captura”, dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 4. Porcentaje (%) recuperación de biogás

$$\text{Recuperación de biogás} = \text{Generación de biogás} * \% \text{ de eficiencia de captura}$$

La eficiencia de captura está en función del diseño del sistema de captura, la operación y mantenimiento del sistema de captura, la configuración del relleno sanitario, operación y condiciones del sitio. Por otra parte, si la recuperación de biogás es conocida (medida), se puede realizar por la siguiente ecuación:

Ecuación 5. Eficiencia de captura si la recuperación de biogás es conocida

$$\text{Eficiencia de captura} = \frac{\text{Recuperación de biogás (medida)}}{\text{Generación de biogás (modelada)}}$$

Por otra parte, si la recuperación de biogás es desconocida, es decir, no se cuenta con un sistema de captura, la eficiencia se calcula en base a la evaluación del sitio, demostrada en la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Eficiencia de captura si la recuperación de biogás es conocida

$$\text{Recuperación de biogás} = \text{Generación de biogás (modelada)} * \text{eficiencia de captura}$$

(EPA, 2009).

7.5 Marco normativo

En esta sección, es importante resaltar los actos normativos más sobresalientes y relacionados con el desarrollo de la investigación, siendo de utilidad para soportar el desarrollo y planteamiento de cada aspecto a mejorar en relación con la calidad del aire y su respectiva relación con los gases efecto invernadero, además de tener en cuenta la normativa relacionada con los residuos sólidos y el gas metano.

Tabla 4. Marco normativo

ACTO NORMATIVO	EXPEDIDO POR	DESCRIPCIÓN
<i>Constitución Política de Colombia (1991)</i>	<i>Congreso de la República</i>	Ley máxima y suprema de un país; se especifican los principales derechos y deberes de sus participantes, y define la estructura y organización del Estado. Art. 79: Derecho a un ambiente sano. Art. 95: Deberes y obligaciones de las personas para la protección y conservación de los recursos naturales del país.
<i>Ley 99 de 1993- Ley General Ambiental de Colombia</i>	<i>Congreso de Colombia</i>	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.
<i>Decreto 2811 de 1974 - Código de los Recursos Naturales Renovables</i>	<i>Presidencia de la República de Colombia</i>	Su objetivo es prevenir y controlar los efectos nocivos del uso de los recursos naturales no renovables sobre los demás recursos, se consideran todos los elementos que componen el ambiente o los que influyen en él.
<i>Ley 164 de 1994 - Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático</i>	<i>Congreso de Colombia</i>	Por medio de la cual se aprueba la “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, llevada a cabo en Nueva York el 9 de mayo de 1992, entrando en vigor el 21 de marzo de 1994.
<i>Ley 629 de 2000</i>	<i>Congreso de la República de Colombia</i>	Aprobación de Protocolo de Kioto en Colombia.
<i>Decreto 1713 de 2002</i>	<i>Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial</i>	Establece las leyes 142 de 1994, 632 del 2000, y 689 del 2001, para rendir servicios de saneamiento público, y el Decreto 2811 de 1974 y Ley 99 de 1993 para Disposición Total de los Residuos Sólidos. E incluye las definiciones de disposición de residuos, las provisiones.
		Artículo 1. Define el aprovechamiento de biogás de manera implícita
		Artículo 70. Métodos de utilización. Entre estos están: reutilización, reciclado, comportado, generación de biogás y recuperación de energía.
		Artículo 93. Manejo y Monitoreo de gases. Los operadores de los rellenos

		<p>sanitarios son responsables del manejo de los gases generados de acuerdo con lo que está establecido en los permisos, autorizaciones y planes de operación.</p> <p>Artículos 99, 100 y 130. Contienen, la clausura de rellenos, recuperación de los sitios de disposición final y la restauración ambiental. Con lo cual se favorece la posibilidad de aprovechamiento de biogás mediante la generación de actividades en el marco del MDL.</p> <p>Artículo 103. Responsabilidad por los impactos causados por los rellenos sanitarios. La persona que ofrece el servicio, que está a cargo de la administración del sistema de disposición final, será responsable de los impactos ambientales y sanitarios resultantes del manejo inadecuado del relleno sanitario.</p>
<i>Decreto 1505 de 2003</i>	<i>Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial</i>	Define el aprovechamiento y aspectos inherentes a los Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), lo cual favorece el aspecto de adicionalidad de proyectos MDL y la contribución al desarrollo sostenible.
<i>Resolución 909 de 2008</i>	<i>Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial</i>	Se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. Artículo 41: rige el tratamiento térmico de residuos y/o desechos peligrosos en instalaciones de incineración y para hornos cementeros que realicen procesamiento.
<i>Resolución 551 de 2009</i>	<i>Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial</i>	Por la cual se adoptan los requisitos y evidencias de contribución al desarrollo sostenible del país y se establece el procedimiento para la aprobación nacional de proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que optan al Mecanismo de Desarrollo Limpio – MDL y se dictan otras disposiciones.
<i>Resolución 2734 de 2010</i>	<i>Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial</i>	Establece el procedimiento para la aprobación nacional de proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que optan al Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) en virtud del artículo 3 del Protocolo de Kyoto.

<i>Resolución 1014 de 2013</i>	<i>Área Metropolitana de Bucaramanga</i>	Aprobar la actualización del plan de manejo ambiental (PMA) para el Relleno sanitario “El Carrasco”, presentado por la Empresa de Aseo de Bucaramanga, con las previsiones establecidas en el considerando décimo octavo de la presente resolución.
<i>Resolución 1541 de 2013</i>	<i>Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible</i>	Establece los niveles permisibles de calidad del aire o de inmisión, el procedimiento para la evaluación de actividades que generan olores ofensivos y se dictan otras disposiciones.
<i>Decreto 298 de 2016</i>	<i>Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible</i>	Por el cual se establece la organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático y se dictan otras disposiciones. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC): reducir el riesgo y los impactos socio-económicos asociados a la variabilidad y al cambio climático en Colombia
<i>Ley 1931 de 2018</i>	<i>Congreso de Colombia</i>	Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático”, así como en mitigación de gases efecto invernadero, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de la población y de los ecosistemas del país frente a los efectos del mismo y promover la transición hacia una economía competitiva, sustentable y un desarrollo bajo en carbono.
<i>Resolución 153 de 2019</i>	<i>Autoridad Nacional de Licencias Ambientales</i>	Por el cual se evalúa un plan de desmantelamiento y abandono para el relleno sanitario El Carrasco.

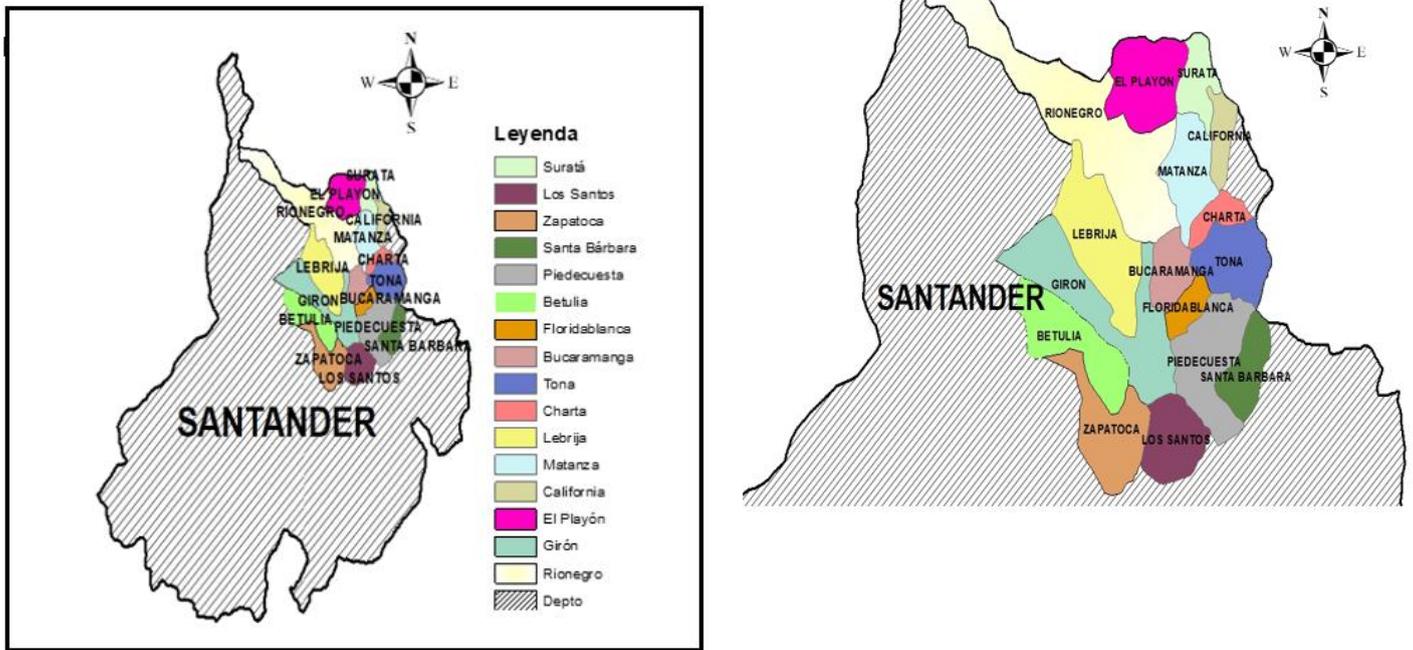
Fuente: Autores, 2019

7.6 Marco geográfico

En este apartado, se realiza un acercamiento al contexto geográfico, dado a que se hace necesario describir las condiciones generales del relleno sanitario El Carrasco, en donde se realiza el tratamiento y disposición final de los residuos sólidos proveniente del Área Metropolitana de Bucaramanga y 12 municipios más, ubicados al oriente del departamento de Santander como se muestra en la figura 2.

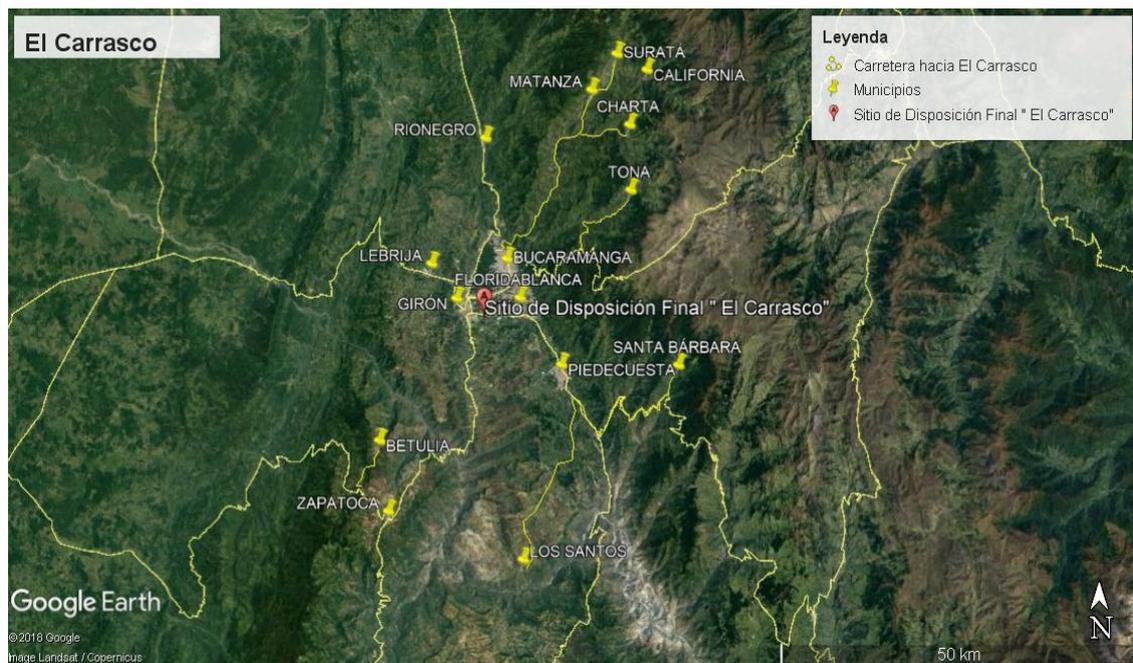
Este territorio denominado “El Carrasco” se encuentra localizado en el kilómetro 6, vía Bucaramanga-Girón; en una cañada natural dentro de los depósitos aluviales de la meseta de Bucaramanga, limitando con el barrio El Porvenir hacia el oriente.

Figura 2. Departamento de Santander y los municipios de influencia en el Carrasco



Fuente: Autores, 2019

Figura 3. Ubicación geográfica de los municipios que disponen sus residuos en el relleno sanitario El Carrasco



Fuente: Google Earth, 2019

Figura 4. Localización geográfica del sitio de disposición final El Carrasco.



Fuente: Google Earth, 2019

7.7 Marco institucional

En este apartado se suscitan las entidades que hacen parte de la operación del relleno sanitario El Carrasco presentadas en la tabla 5.

Tabla 5. Marco institucional

AUTORIDAD	LOGO	DESCRIPCIÓN
Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible		El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es uno de los ministerios actuales del poder ejecutivo de Colombia.
Gobernación de Santander		Busca mejorar la calidad de vida de los santandereanos fomentando la competitividad, fortaleciendo la ciencia y la tecnología, y recuperando la infraestructura vial, entre

		<p>otros; vitales para el desarrollo y la proyección del departamento.</p>
<p>Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga</p>		<p>La Corporación autónoma regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, tiene por objeto la ejecución de las políticas, planes, programas y proyectos sobre medio ambiente y recursos naturales renovables, así como dar cumplida y oportuna aplicación a las disposiciones legales vigentes sobre su disposición, administración, manejo y aprovechamiento, conforme a las regulaciones, pautas y directrices expedidas por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.</p>
<p>Empresa Municipal de Aseo de Bucaramanga S.A E.S.P.</p>		<p>Asumió el 100% de la operación de sus usuarios del servicio de aseo en el municipio de Bucaramanga, con el objeto de garantizar el servicio en la ciudad, la entidad realizó el alquiler del parque automotor y se incrementó en un 50% el número de operarios. Sin embargo, desde entonces EMAB ha venido realizando ajustes a sus procesos y planeación estratégica, lo que ha implicado desde inicios de 2016, variaciones en su estructura de costos, la cual se estima se establezca a partir del segundo semestre.</p>

8. Metodología

Tal como lo menciona Hernández (2010) dentro de la investigación, los enfoques cuantitativo, cualitativo y mixto constituyen posibles elecciones para enfrentar problemas de investigación y resultan igualmente valiosos. Por otra parte, este mismo autor señala que visualizar el alcance de la investigación es importante para establecer sus límites conceptuales y metodológicos (Hernández, Fernández & Baptista, 2010). Ahora bien, la metodología se planteó con el fin de dar cumplimiento a los objetivos específicos siendo estos importantes para llevar a cabalidad el objetivo general.

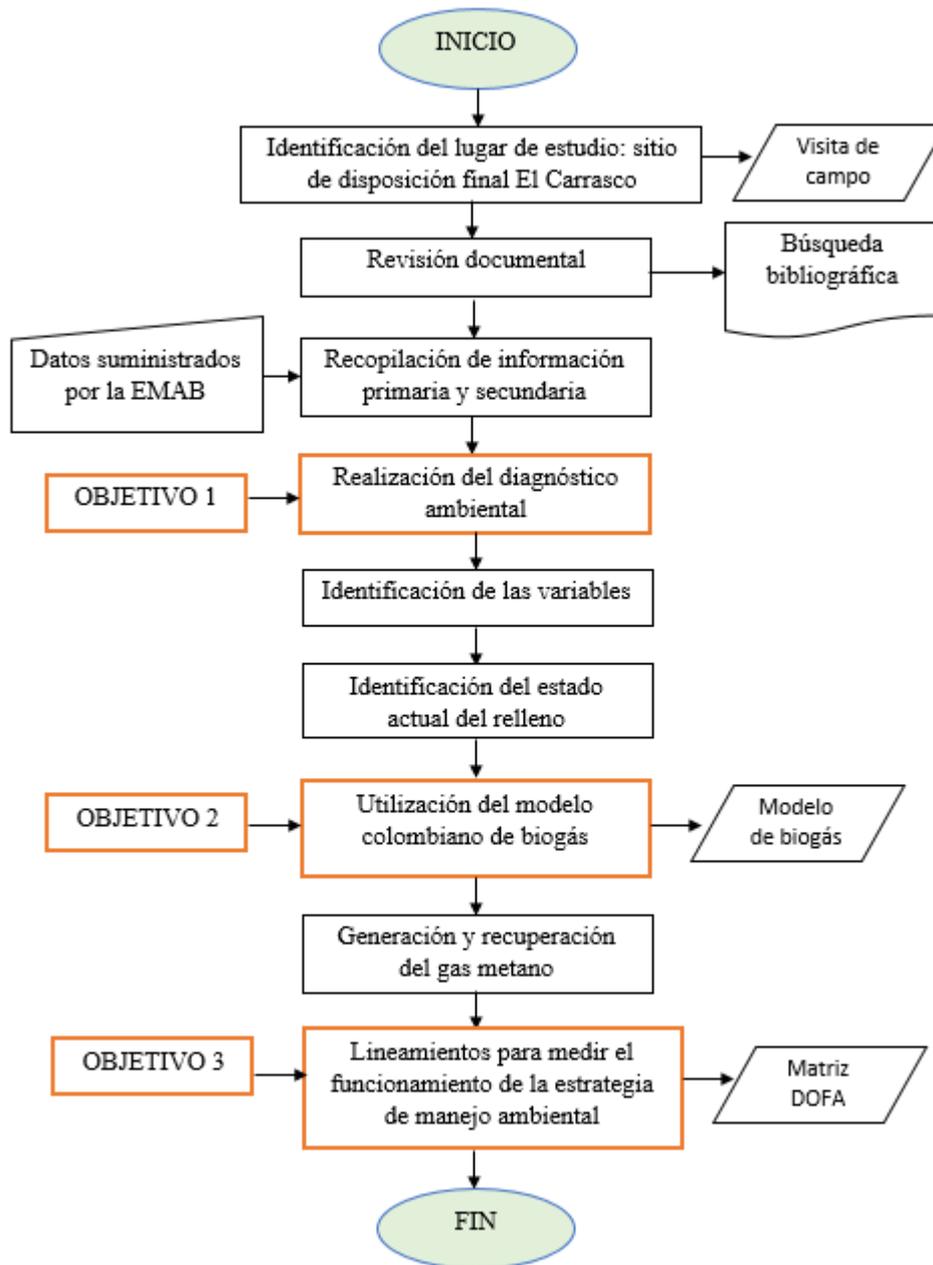
Por tanto, para este proyecto el enfoque que se utilizó es mixto, puesto que el trabajo consta de dos partes, por un lado se caracteriza por ser cuantitativo porque mediante el desarrollo del modelo colombiano de biogás estima la generación y recuperación del mismo que se están produciendo en el relleno sanitario “El Carrasco” y de este modo llegar a formular una estrategia de manejo ambiental para la fase de cierre del relleno, por otro lado, también se caracteriza por ser cualitativo, ya que este se identifica por ser una investigación interpretativa por medio de la recolección y análisis de datos que permitan ajustar o apoyar la pregunta de investigación (Hernández, Fernández & Baptista, 2010). En consecuencia, se realiza un diagnóstico ambiental en la primera fase del proyecto con el fin de tener una visión del estado actual del relleno con información primaria y confiable, avizorando un panorama de los problemas y afectaciones socioambientales que ha tenido la operación del relleno sanitario “El carrasco” en las zonas aledañas.

Por otro lado, el alcance que tiene el proyecto es descriptivo, puesto que este tipo de investigación tiene como prioridad describir las cualidades y características de un problema específico. Su función principal es profundizar, describir, medir conceptos o situaciones. Teniendo en cuenta lo anterior, el proyecto se realiza para determinar la generación y el aprovechamiento de gas que se estima por medio del modelo colombiano de biogás, así como determinar la capacidad de energía que se puede recuperar y con base en esto se describe el impacto tanto ambiental como socialmente.

Existen diferentes técnicas de investigación, pero las que se presentan en el documento es la recopilación de información suministrada por EMAB, para captar los aspectos significantes del estado actual del relleno sanitario El Carrasco dentro de la cual a través de una metodología registrada se presentan y recopilan los datos para dar cumplimiento con los objetivos planteados dentro del trabajo. Este tipo de técnica tiene la particularidad de mostrar de manera selectiva la posible conexión de ideas y el proceso que implica reunir la información, interpretarla, evaluarla y conseguir datos de manera imparcial y clara.

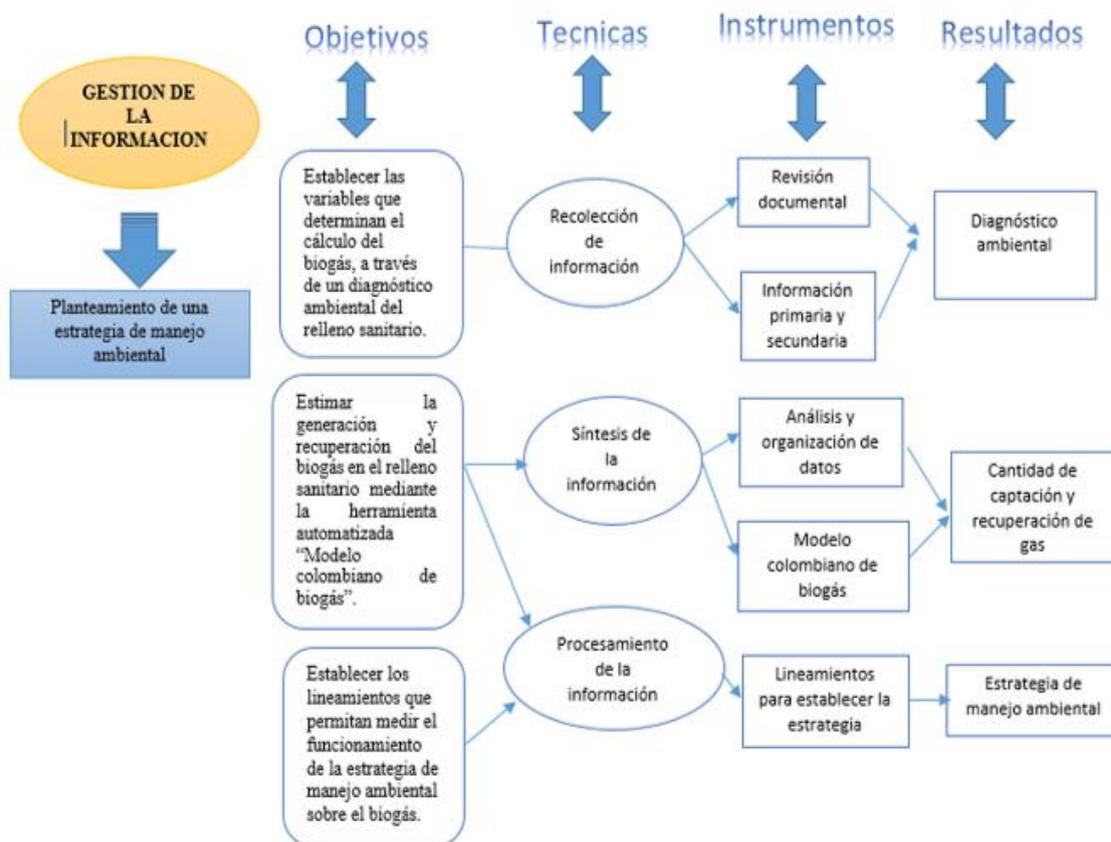
Es importante elegir el tipo de instrumentos que se utiliza para llevar a cabo la técnica seleccionada. Sugiriéndose, se empleen instrumentos que han demostrado ser válidos y confiables en estudios previos o se generan nuevos basados en la revisión de la literatura y se prueban y se ajustan. Por ende, para este proyecto se utilizó como instrumento la revisión documental, el uso del modelo colombiano de Biogás y el uso cartografía base, con el fin de presentar resultados que redunden a partir de la formulación de estrategias de utilización del biogás en la mitigación de impactos socioambientales.

Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología



Fuente: Autores, 2019

Figura 6. Técnicas e instrumentos



Fuente: Autores, 2019

Objetivo 1. Establecer las variables que determinan el cálculo del biogás, a través de un diagnóstico ambiental del relleno sanitario.

Para la realización de este objetivo, se previó una visita técnica que no fue posible realizarla en virtud a que la solicitud formulada desde la Dirección del Programa de Ingeniería Ambiental fue atendida con la siguiente respuesta:

“Para la Autorización del ingreso de las estudiantes al relleno El Carrasco con el fin de hacer visita de campo y obtener registro fotográfico e información primaria, se informa que actualmente el Relleno Sanitario opera bajo emergencia sanitaria, y que actualmente se tienen unas celdas que requiere infraestructura y obras de estabilidad que se vienen ejecutando para la estabilización total del relleno. Luego no es viable ni recomendable el ingreso de las estudiantes en las condiciones actuales al predio el Carrasco pues debemos acatar las órdenes judiciales las cuales nos indican tomar medidas pertinentes para el control y minimizar riesgos de accidentes a personas internas y externas al relleno sanitario”. Es de anotar que si bien la EMAB niega el acceso a sus instalaciones, envía la documentación requerida oficialmente.

Por lo tanto, para el cumplimiento de este objetivo, fue necesario contar con información y revisión bibliográfica confiable para dar un diagnóstico ambiental general y actualizado. Para efectos de este proyecto el diagnóstico se divide en dos partes. En la primera parte, se describe la

zona de estudio, donde por medio de informes proporcionados por la EMAB, se conoce la producción diaria que entra al relleno, además, se describe la configuración espacial de la disposición de los residuos sólidos en el predio.

A partir de las proyecciones de la población del DANE para los años 2014-2018 tanto del Área Metropolitana de Bucaramanga como de los demás municipios que depositan sus residuos en el Relleno Sanitario “El Carrasco”, se calculó la tasa de crecimiento poblacional, con el fin de establecer la producción de residuos. En esta parte también se encuentran especificaciones técnicas propias del funcionamiento y operación del relleno sanitario, como la cobertura diaria de los residuos, el manejo de lixiviados y la caracterización fisicoquímica de los mismos, también se describe como es el proceso y manejo de gases dentro del relleno. Y por último, se describe la caracterización y distribución de los residuos que se depositan en éste y la composición tanto física como química y el funcionamiento de la planta de tratamiento de lixiviados.

Para la segunda parte de este primer objetivo, se diagnosticó el relleno sanitario ambientalmente, teniendo en cuenta la afectación que ha tenido el relleno sobre la hidrografía tanto superficial como subterránea, en esta segunda parte también se encuentra el componente geosférico donde se explica el tipo de suelo, y el perfil estratigráfico e hidrogeológico de la zona de estudio, también se especifican las condiciones climatológicas que se tienen en el lugar, el comportamiento del viento mediante la utilización de datos de monitoreo de calidad del aire.

Objetivo 2. Estimar la generación y recuperación del gas metano en el relleno sanitario mediante la herramienta automatizada “Modelo colombiano de biogás”.

Para la realización del segundo objetivo se recopiló información suministrada en el primer objetivo para poder llevar a cabo dicha estimación. En la utilización de este modelo es primordial contar con fuentes que proporcionen datos reales pues en esto se basa la veracidad de la estimación del gas metano. Este modelo no sólo calcula la generación de gas metano, sino también, la recuperación del mismo.

Para llevar a cabo el cálculo, es necesario información como: la región geográfica para determinar la precipitación anual promedio del departamento donde se encuentra ubicado el relleno, el año de apertura de este, la disposición anual del año más reciente, se pide que este dato se encuentre en Megagramos (Toneladas), el volumen de los residuos dispuestos en el relleno, año de clausura actual del relleno o el año proyectado de clausura, el crecimiento estimado en la disposición anual, la profundidad promedio del relleno, y el diseño y práctica de manejo del relleno sanitario (condiciones históricas promedio), año de arranque del sistema de captura del biogás y la eficiencia de captura estimada (siendo el máximo 85%) en la cual se tiene en cuenta la siguiente tabla:

Tabla 6. Eficiencia del sistema de captura

DESCRIPCIÓN	PORCENTAJES DE EFICIENCIA
Corresponde a las prácticas de manejo del sitio	Descontar 15% si el sitio no fue operado como relleno sanitario controlado
Corresponde a la profundidad de residuos	Descuento progresivo si la profundidad < 10 metros (5% por cada m)
Área de cobertura del sistema de captura	Ajuste del factor de cobertura del sistema
Cobertura superior y su cobertura	Cobertura final = 90%; intermedio = 80%; diaria = 75%; sin cobertura = 50%
Recubrimiento inferior y su cobertura	Descontar 5% x el % de área sin recubrimiento inferior
Compactación de los residuos	Descontar el 3% si no hay compactación
Área de disposición designada	Descontar 5% si no existe área de disposición designada
Lixiviado	Descontar 40% dependiendo del clima y la frecuencia de los afloramientos
Eficiencia captura estimada	

Fuente: EPA, 2009

Objetivo 3. Establecer los lineamientos que permitan medir el funcionamiento de la estrategia de manejo ambiental sobre el biogás.

Teniendo en cuenta los dos objetivos anteriores se realiza una matriz DOFA con el fin de definir los aspectos internos y externos que favorecen o inhiben el buen funcionamiento de la estrategia a plantear.

Las estrategias tienen que traer consigo impactos positivos tanto al ambiente como la sociedad aledaña al relleno, pues el proyecto tiene como finalidad poder mitigar la producción de gas metano.

9. Plan de trabajo

9.1 Cronograma

En esta sección se encuentran las actividades en las que se organizó el desarrollo del proyecto para llegar a feliz término, teniendo una duración total de 32 semanas. Cabe resaltar que el color amarillo hace parte del cronograma pero no se logró realizar.

Tabla 7. Cronograma

ACTIVIDADES	MESES																																
	ago-18				sep-18				oct-18				nov-18				feb-19				mar-19				abr-19				may-19				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
Elección del proyecto	█																																
Revisión bibliográfica	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	
Descripción general de la investigación		█	█	█																													
Planteamiento del problema				█	█	█	█																										
Planteamiento de los objetivos							█	█	█																								
Elaboración del estado del arte									█	█																							
Elaboración de los Marcos de referencia									█	█	█	█																					
Elaboración de metodología											█	█	█																				
Entrega del documento del anteproyecto																█	█																
Reunión con el director																	█																
Visita técnica al relleno																		█	█	█													
Ajustes del anteproyecto																		█	█	█													
Diagnóstico																					█	█	█										
Procesamiento de información																						█	█										
Cálculo del biogás																						█	█										
Análisis y conclusiones																							█	█	█								
Redacción del documento final																									█	█							
Ajustes finales																										█	█	█	█				
Sustentación final																														█			
Entrega de documento final																																█	

Fuente: Autores, 2019

9.2 Presupuesto

Se muestra en la siguiente tabla el costo total en pesos colombianos (COP) de la estrategia 1 para la venta de energía generada, lo cual corresponde a vender 900 kW (0,9 MW) por \$60.138.826 a la Electrificadora de Santander S.A E.S.P.

Tabla 8. Presupuesto

PRESUPUESTO DE LA ESTRATEGIA 1			
COMPONENTES DEL COSTO UNITARIO VARIABLES			
CONCEPTO	TARIFA \$/kWh		
Compra energía	183		
Costo distribución	139		
Costo de comercialización	54		
Costo de compra, transporte y reducción de pérdidas	35		
Costo de restricciones	28		
Costo unitario variable de prestación del servicio	473		
TOTAL	911		
CONCEPTO	TARIFA \$/kWh	Tarifa unificada	TOTAL
Estrato 1	196	\$ 21,164	\$ 4,139,043
Estrato 2	244	\$ 28,860	\$ 7,055,116
Estrato 3	402	\$ 46,463	\$ 18,677,661
Estrato 4	473	\$ 55,541	\$ 26,267,005
Mano de obra (Ingenieras ambientales)	\$ 2,000,000		\$ 4,000,000
TOTAL			\$ 60,138,826

Fuente: Autores, 2019

10. Resultados

Para el presente trabajo, los resultados obtenidos se van a presentar de acuerdo con el desarrollo de la metodología por cada objetivo específico, para ser analizados en el siguiente capítulo.

10.1 Resultados del objetivo específico 1

El sitio de disposición final El Carrasco, está dividido en tres zonas o cárcavas naturales; según la formulación del Plan de Manejo Ambiental aprobado por CDMB con la resolución 0753 del 13 de Agosto de 1998 así:

La cárcava uno, clausurada, se encuentra ubicada en su totalidad en jurisdicción de Bucaramanga, tiene un área de 7 ha, en la que se estima que están enterradas 2.400.000 toneladas de residuos, la cual está compuesta por la zona 1 y la zona 2 (Alcaldía de Bucaramanga, 2016).

La cárcava dos se encuentra ubicada en jurisdicción de Bucaramanga y Girón sobre un drenaje natural de aguas lluvias, conocida como la quebrada El Carrasco, que corresponde al antiguo botadero de Malpaso. Allí, están apiladas 800.000 toneladas de residuos provenientes de Bucaramanga (Alcaldía de Bucaramanga, 2016).

Teniendo en cuenta la información anterior, en El Carrasco se dispusieron 800.000 toneladas provenientes de Bucaramanga a partir del año 1978 hasta 1895, es decir, para cada año se dispusieron cerca de 313 Ton/año, demostrada en la siguiente ecuación.

Ecuación 7. Producción para el municipio de Bucaramanga (1978-1895)

$$\text{Producción} = \frac{800.000 \text{ Ton}}{7 \text{ años}} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} = 313 \text{ Ton/día}$$

Para el periodo que comprende los años de 1985 hasta el 2011 se dispusieron 2.400.000 toneladas (Alcaldía de Bucaramanga, 2016), es decir que en 26 años, se enterraron cerca de 274 Ton/día, como se muestra en la ecuación 8.

Ecuación 8. Producción para el municipio de Bucaramanga (1985-2011)

$$\text{Producción} = \frac{2.400.000 \text{ Ton}}{26 \text{ años}} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} = 253 \text{ Ton/día}$$

Posteriormente para el año 2017 se encuentra que su producción es de 546 Ton/día, como se demuestra en la siguiente tabla.

Tabla 9. Producción de Bucaramanga

AÑO	PRODUCCIÓN (Ton/día)	PPC (KG/HABITANTE-DÍA)
1978 - 1985	313	0,77
1985 - 2011	253	0,48
2017	564	1,74

Fuente: Autores, 2019

A continuación, se muestra el contexto histórico de la disposición de manera detallada.

Tabla 10. Relación de disposición de residuos en el predio El Carrasco

ZONA DE DISPOSICIÓN	PERIODO DE OPERACIÓN
Antiguo botadero (incluye la actual Celda 4 Cárcava 2 – Fase 1)	1978 – 1985
Cárcava 1 – Zona 1	1985 – 2005
Cárcava 1 – Zona 2	2006 – 2011
Zona ZEM (Zona de Extracción de Material)	2009 – 2011
Celda 2	2012
Celda 3 – Zona 1 (Celda 3.1)	2013
Celda 3 – Zona 2 (Celda 3.2)	2013
Celda 1	2013 – 2015
Celda 1 – Domo	2016
Celda 4 – Cárcava 2 (Fase 2)	2016 – 2018
Zona de Contingencia (hace parte de la Celda 1 y contigua a la Zona ZEM)	3 de octubre de 2018 – mediados de enero de 2019
Celda de respaldo 1	Mediados de enero de 2019 - actualidad

Fuente: EMAB, 2019

De acuerdo con lo anterior a continuación se presenta figuras suministrado por la EMAB, en donde se muestran las celdas de disposición final.

Figura 7. Celdas de disposición final de residuos “El Carrasco”



Fuente: EMAB, 2019

El Carrasco, está catalogado como relleno sanitario mecanizado, dado que genera 900 Ton/día (Flórez, 2018); para este tipo de relleno se requiere equipos especializados como: 2 buldóceres, uno tipo D7H y otro D8N, 3 retroexcavadoras de 20 toneladas, un retrocargador, un carrotanque, una motoniveladora, un vibro-compactador y 2 volquetas (EMAB, 2018).

Este relleno se considera regional conforme que recibe los residuos sólidos generados en los municipios cercanos al sitio de disposición final, los cuales son: Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Betulia, Rionegro, Lebrija, Suratá, Charta, California, Matanza, El Playón, Tona, Los Santos, Santa Bárbara y Zapatoca (Alcaldía de Bucaramanga, 2016).

El predio del Carrasco comprende una extensión de 94 hectáreas, en donde se desarrollan todas las actividades asociadas a la disposición final de residuos, desde el pesaje de los vehículos recolectores, tratamiento de lixiviados, fuentes de material de cobertura y zona de disposición (López & García, 2006).

Por otra parte, el área de influencia ambiental, corresponde a los sectores cercanos o que por efectos del comportamiento de las condiciones meteorológicas, especialmente la velocidad, dirección del viento y la temperatura, tenga incidencia en el arrastre de partículas u olores ofensivos que se generan en el área de influencia directa; delimitada con un radio de 2 km. Las viviendas se localizan en el sector oriental del área de influencia ambiental del proyecto en el municipio de Bucaramanga, correspondiente a los barrios El Porvenir, Dangond, Tejares y Manuela Beltrán (Contreras, 2015)

El cubrimiento diario de las celdas en este relleno según informe de la EMAB, se realiza una cobertura diaria con material granular y sintética (lona negro-verde).

10.1.1 Características de los residuos que ingresan al Carrasco

Según Collazos (1988), los residuos sólidos se clasifican de acuerdo con la fuente productora como: residencial o domésticas, comerciales, comerciales de alimentos, plazas de mercado, industriales, institucional, especiales, barrido de calles y lugares públicos; y de acuerdo con su composición pueden ser: patógenas, tóxicas, combustibles, inflamables, explosivas, radioactivas y volatilizables.

Esto a su vez, se ve reflejado en las características de los residuos sólidos, ya que éstos varían en cada municipio en función de la actividad dominante (industrial, comercial, turística, etc.), las costumbres de la población (alimentación, hábitos, patrones de consumo) y el clima, principalmente. La composición de los residuos también varía de acuerdo a su fuente de producción, debido a que el conocimiento de esta información, permite establecer cuáles deben ser los equipos de recolección, el establecimiento de tarifas y la disposición final.

En el relleno sanitario El Carrasco sólo se reciben residuos sólidos domésticos (presentan alto contenido de materia orgánica), comerciales (presentan alto contenido de papel y cartón) e industriales; el cual comprende un conjunto de diversos materiales con unas propiedades físicas y químicas particulares que inciden sobre sus posibilidades de recuperación, tratamiento y disposición final (López & García, 2006).

10.1.2 Composición química

A partir de una muestra de 15 kg de residuos se arrojan los siguientes resultados.

Tabla 11. Composición química de los residuos sólidos

PARÁMETRO	UNIDADES	BASE HÚMEDA	BASE SECA
Peso específico	kg/dm ³	0,4221	0,2221
Humedad	%	47,38	No presenta resultado
Carbono	%	23,27	44,21
Hidrógeno	%	3,04	5,78
Oxígeno	%	16,40	31,16
Nitrógeno	%	0,35	0,66
Azufre	%	0,04	0,08

Fuente: Singep, 2017

10.1.3 Composición física

La composición física de los residuos sólidos municipales en una región está caracterizada por su alto porcentaje de materia orgánica (entre 50 y 70% del total de residuos), lo que se traduce en un mayor contenido de humedad con valores que fluctúan entre 35 y 55%; el resto es papel, cartón, vidrio, metales, plásticos y material inerte, entre otros (Jaramillo, 2002).

Los residuos sólidos se agrupan por categorías, de acuerdo a sus propiedades o posibilidades de tratamiento y disposición final tales como:

- a) Residuos con características físicas de biotransformación: Residuos orgánicos provenientes de actividades domésticas o industriales susceptibles de descomponerse biológicamente y que constituyen sustrato para producción de bioabono tales como compostaje, lombricultura, etc.
- b) Residuos con propiedades físicas para reciclaje: Residuos que por sus características físicas se pueden reutilizar o pueden servir como materia prima en procesos productivos para la elaboración de nuevos productos.
- c) Residuos con características físicas de escombrera: Residuos inertes provenientes de la construcción de vías, viviendas o excavaciones generales cuyo destino o uso final corresponde a depósitos de suelo, agregados, concretos, pavimento, etc.
- d) Residuos con características físicas para disposición directa en el relleno sanitario (no recuperables): Residuos con mínima posibilidad de aprovechamiento por su grado de contaminación o mezcla con otros materiales que ocasiona costos altos para su aprovechamiento. Tales residuos son llantas, papeles pequeños sucios, plásticos no reciclables, etc.
- e) Residuos con características físicas de incineración: Estos residuos corresponden en general a los residuos patógenos especialmente a los provenientes de hospitales y centros médicos.

(López & García, 2006).

A continuación, se presenta la caracterización de los residuos sólidos en el sitio de disposición final El Carrasco.

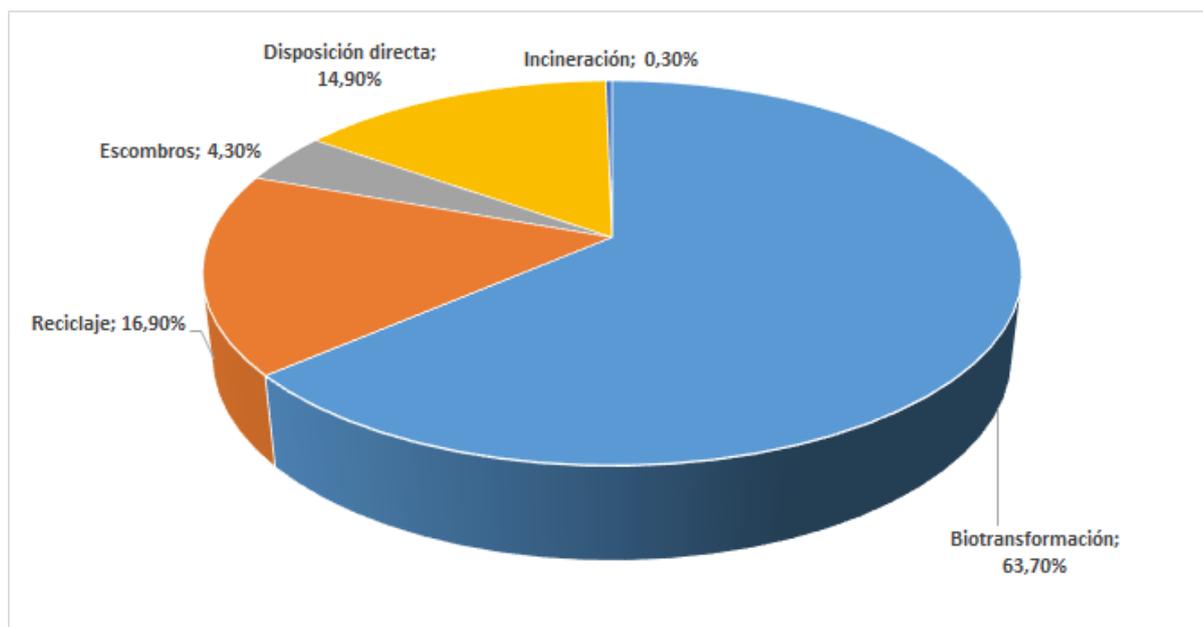
Tabla 12. Composición física de los residuos sólidos en el relleno sanitario El Carrasco para el año 2016

RESIDUOS CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE BIOTRANSFORMACIÓN	%
Residuos de comida	50,3
Papel y cartón sucios o pequeños	0,2
Madera forestales aserrín	7,8
Carbón cenizas escorias	2,5
Pañales desechables, toallas higiénicas, etc.	2,9
Hueso, vísceras, cueros	0
RESIDUOS CON PROPIEDADES FÍSICAS PARA RECICLAJE	%
Plásticos envases	2,3
Plásticos laminados	4
Plásticos expandidos desechables	0,5
Cartón y papel	4,1
Textiles	2,1
Vidrio	1,3
Zapatos	1,5
Metales ferrosos chatarras	0,7
Aluminio	0,1
RESIDUOS CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE ESCOMBRERA	%
Escombros	4,3
RESIDUOS CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	%

PARA DISPOSICIÓN DIRECTA	
Llantas, cauchos	1,4
Especiales, baterías, teléfonos, etc.	0,1
Plásticos no reciclables	0,9
Papel pequeño sucio	3,1
Textiles no reciclables	3,6
Cueros industriales	4,2
Plásticos expandidos desechables	0,1
Otros	1,5
RESIDUOS CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE INCINERACIÓN	
Otros hospitalarios	0,2
Patógenos, hospitalarios	0,1
TOTAL	100%

Fuente: Alcaldía de Bucaramanga, 2016

Figura 8. Distribución de los residuos según sus propiedades o posibilidades de tratamiento y disposición final.



Fuente: Autores, 2019 a partir del PGIRS realizado en el año 2016

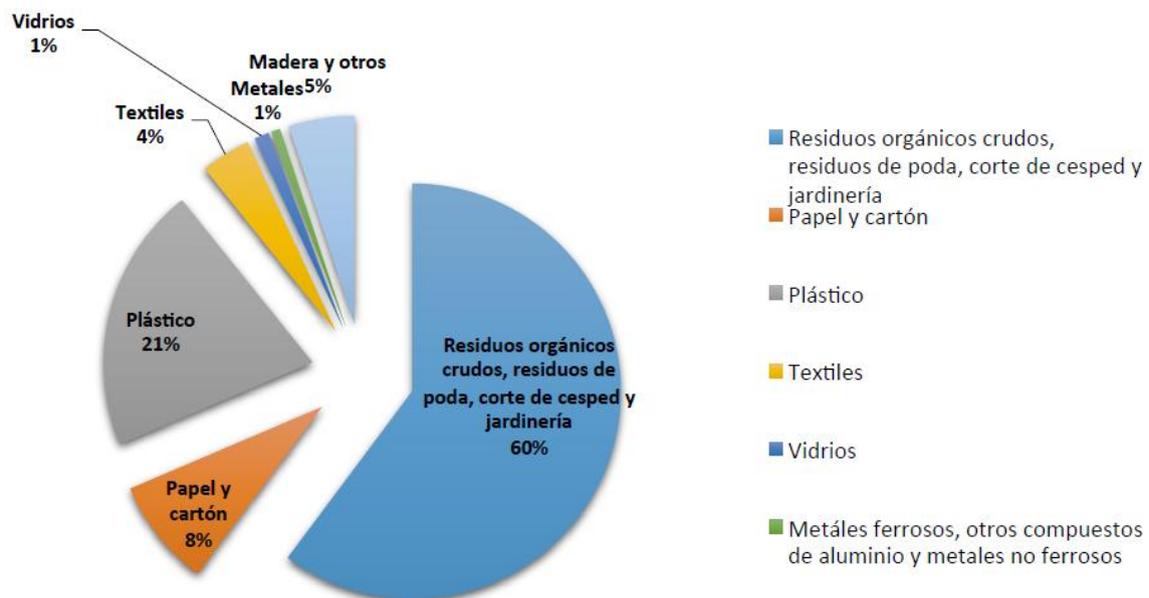
Por otra parte, se presenta la caracterización de los residuos sólidos en el sitio de disposición final El Carrasco, el cual ha sido realizado por la EMAB.

Tabla 13. Composición física de los residuos sólidos en el relleno sanitario El Carrasco para el año 2017

COMPOSICIÓN PORCENTUAL DE MUESTREOS		
TIPO DE RESIDUO	TOTAL PESO (Kg)	PORCENTAJE (%)
Residuos orgánicos crudos, residuos de poda, corte de césped y jardinería	933,0	60%
Papel y cartón	183,3	8%
Plásticos	341,1	21%
Textiles	63,3	4%
Vidrios	18,7	1%
Metales ferrosos, otros compuestos de aluminio y metales no ferrosos	11,3	1%
Madera, caucho, cuero, ceniza, huesos, escombros, y otros	84,0	5%
TOTAL MUESTRAS	1.650	100%

Fuente: Singep, 2017

Figura 9. Composición estimada de residuos que ingresan al relleno El Carrasco para el año 2017



Fuente: Singep, 2017

Es importante aclarar que los datos registrados en el PGIRS se encuentran de manera detallada y contemplando diferentes categorías que no se evidencian en el estudio del 2017, ya que este se realizó de manera general haciendo que se encuentren variaciones de uno con respecto al otro.

10.1.4 Producción y composición de los residuos

Según el Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos realizado en el año 2017, el relleno recibe una cantidad de residuos sólidos de 30.874,6 toneladas mensuales y 1.030 toneladas al día (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018)

Tabla 14. Producción de residuos y Producción Per Cápita de los municipios atendidos por la EMAB.

N°	MUNICIPIOS	POBLACIÓN 2017	PRODUCCIÓN DE RESIDUOS (Ton/día)	PRODUCCIÓN PER CÁPITA (KG/HABITANTE-DÍA)
1	Bucaramanga	528.575	564,28	1,07
2	Floridablanca	266.669	212,1	0,80
3	Piedecuesta	156.167	91,35	0,58
4	Girón	190.283	124,01	0,65
5	Betulia	5.061	1,540	0,30
6	Rionegro	26.680	4,750	0,18
7	Lebrija	40.252	17,18	0,43
8	Suratá	3.225	0,37	0,11
9	Charta	2.592	0,29	0,11
10	California	2.020	0,51	0,25
11	Matanza	5.201	0,53	0,10
12	El Playón	11.520	4,36	0,38
13	Tona	7.168	1,54	0,21
14	Los Santos	12.423	3,5	0,28
15	Santa Bárbara	2.100	0,15	0,07
16	Zapatoca	8.847	4,15	0,47
TOTAL			1030,61	

Fuente: Autores, 2019 a partir de los cálculos realizados con los datos obtenidos por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018.

Igualmente, la cantidad total de los residuos que son generados por una población, permite establecer la caracterización de los residuos en la cual se establece la composición de cada uno de ellos, enunciados a continuación para cada municipio correspondiente del relleno sanitario El Carrasco.

10.1.4.1 Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB): Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta

Tabla 15. Caracterización de los residuos en el Área Metropolitana de Bucaramanga

COMPOSICIÓN	AMB (2012)	
	%	Ton/año
Orgánicos (residuos de alimentos, jardín, madera, plumas)	53,3	147.398
Otros	13,1	36.246
Plástico bolsas	7,7	21.332
Papel y cartón	6,1	16.948
Sanitario (papel higiénico, pañales, toallas higiénicas)	5,2	14.431
Pasta	4,3	11.973
Materiales textiles	3,3	9.218
Vidrio	2,3	6.437
Barrido de calles	2,1	5.838
Chatarra, metales	1,3	3.672
Cuero, gomas corchos	0,8	2.342
Residuos de construcción	0,2	449
Residuos de poda y jardinería	0,1	169
Residuos peligrosos	0,0	29
TOTAL AMB	100%	276.482

Fuente: Concejo Municipal de Bucaramanga, 2012

10.1.4.2 Betulia

Tabla 16. Caracterización física de los residuos en el municipio de Betulia

MATERIAL	Kg	% PESO
Orgánico (residuos orgánicos de cocina, material vegetal)	5,32	39,67

Plástico y PET (plástico rígido, de película, envase de agua)	1,72	12,83
Vidrio (vidrio de color y transparente)	0,34	2,54
Papel y Cartón (cartón, envase de cartón-tetra pack y papel)	2,1	15,66
Residuos Tóxicos (pañal desechables, toallas sanitarias, baterías, envases de aerosoles, etc)	1,84	13,72
Textiles (algodón, fibras sintéticas)	2,09	15,59
Especiales (llantas, colchones, línea blanca, baterías, luminarias, aparatos electrónicos)	0,83	6,19
TOTAL	13,41	100,00

Fuente: Alcaldía Municipal de Betulia, 2017

10.1.4.3 Rionegro

No presenta datos

10.1.4.4 Lebrija

Tabla 17. Caracterización de residuos del municipio de Lebrija, Santander.

TIPO DE RESIDUOS	ÁREA URBANA Kg	% PESO
Residuos orgánicos crudos	0,86	23,6
Residuos de comida	1,1	30,1
Residuos de jardín	0,19	5,2
Productos de papel	0,27	7,4
Productos de cartón	0,19	5,2
Plástico	0,49	13,4
Metales ferrosos, aluminio y otros metales	0,11	3,0
Vidrio	0,19	5,2
Textiles	0,1	2,7
Madera	0,11	3,0
Otros (inservibles)	0,04	1,1

TOTAL	3,65	100,00
--------------	------	--------

Fuente: Alcaldía Municipal de Lebrija, 2016

10.1.4.5 Suratá

Tabla 18. Características de los residuos en el municipio de Suratá, Santander

ELEMENTOS	Kg/mes
Residuos orgánicos	14.930
Papel	497
Cartón	250
Plástico	484
Vidrio	505
Metal	156
Residuos sanitarios	1.900
TOTAL	19.086

Fuente: Alcaldía Municipal de Suratá, 2012

10.1.4.6 Charta

Tabla 19. Tipo y peso de los residuos en el municipio de Charta, Santander

TIPO DE RESIDUO	(Ton/mes)
Orgánicos	2,5
Vidrio	1,4
Cartón - Papel	1,3
Tela	0,3
Plástico	2
Metal	0,2
Sanitario	0,6
TOTAL	8,3

Fuente: Alcaldía Municipal de Charta, 2012

10.1.4.7 California

Tabla 20. Caracterización de los residuos sólidos en la fuente en el municipio de California,

Santander.

TIPO DE RESIDUO	% PESO
Orgánicos	61,38
Plásticos	9,94
Papel	2,95
Cartón	3,37
Vidrio	2,14
Metales	0,96
Otros	7,09
Sanitarios	12,17

Fuente: Alcaldía Municipal de California, 2016

10.1.4.8 Matanza

El municipio de Matanza no cuenta con un programa de manejo integral de residuos sólidos; actualmente se hace la recolección de los residuos en una volqueta de propiedad del municipio y llevados al Carrasco en el municipio de Bucaramanga (Alcaldía de Matanza, 2016).

10.1.4.9 El Playón

No registra datos

10.1.4.10 Tona

Tabla 21. Composición de residuos cabecera municipal municipio de Tona, Santander

COMPONENTES		
ORGÁNICOS	PESO Kg	PORCENTAJE
Residuos comida	43	40,76
Papel	10,5	9,95
Empaques de plástico	18	17,06
Botellas plásticas PET	0,5	0,47
Cartón	1	0,95
Residuos sanitarios	9,5	9,00
Caucho y cuero	0	0,00
R. jardín	0,5	0,47
Huesos	0	0,00
Madera	1	0,95

Empaques de golosinas	3,5	3,32
Textil, tela	12	11,37
INORGÁNICOS	PESO KG	PORCENTAJE
Vidrios	1	0,95
Metales	1	0,95
Aluminio	0	0,00
Productos cerámicos, ceniza, rocas y escombros	3	2,84
Icopor	1	0,95
TOTALES	105,5	100,00

Fuente: Alcaldía Municipal de Tona, 2016

10.1.4.11 Los Santos

No registra datos

10.1.4.12 Santa Bárbara

No registra datos

10.1.4.13 Zapatoca

Los residuos sólidos que se desechan en el municipio son conducidos al relleno Sanitario del área Metropolitana “El Carrasco” ya que el municipio no cuenta con un sitio para la disposición final de las basuras, además este municipio no cuenta con un PGIRS.

10.1.5 Planta de Tratamiento de Lixiviados

Para el manejo de lixiviados la EMAB, mediante contrato de operación y mantenimiento adjudicado a la firma Consorcio Gestión Sostenible, adquirió y puso en marcha desde el mes de febrero de 2016, una planta de tratamiento de lixiviados, la cual consiste en dos etapas: sistema de filtración con membrana (dtro) y ósmosis inversa (ANLA, 2018).

Figura 10. Esquema Planta de Tratamiento de Lixiviados PTLX



Fuente: Torrado & Rondón, s.f.

El primer paso en la planta es el sistema de pondajes; este cuenta con dos lagunas de 3.500 m^3 (aproximadamente) de capacidad de almacenamiento, en el cual el lixiviado originario de las diferentes celdas del relleno es homogeneizado y almacenado. Luego, es conducido por gravedad hasta un pozo de recepción con capacidad de almacenamiento de 5 m^3 (ANLA, 2018).

En esta planta, se realiza un proceso físico químico como etapa inicial, mediante un tamiz rotativo automático el cual detecta cuando entra un caudal. Los materiales extraídos del tamiz se vierten al tanque de lodos, evitando taponamientos de los sistemas de bombeo (ANLA, 2018).

El procedimiento físico químico sigue con la entrada a un sistema de flotación de aire disuelto DAF, en el cual el lixiviado se almacena para aplicar el coagulante, generando un lodo que es dirigido a un compartimiento, separándolo así del agua clarificada. El clarificado inicia un proceso de filtración convencional (arenas) que posteriormente pasa a una microfiltración, que conduce el agua a un tanque de almacenamiento de 20 m^3 (ANLA, 2018).

Por otra parte, los lodos tratados anteriormente con cal y polímeros, son prensados a una presión de 2.500 psi, separando lodo deshidratado que se dispone en el relleno sanitario y agua que vuelve al sistema de tratamiento (ANLA, 2018).

Retomando nuevamente, luego de la microfiltración, el agua ingresa a un equipo de ósmosis inversa por el sistema de discos tubulares para luego pasar a un sistema de osmosis inversa con membranas transversales, que permiten que el efluente sea dispuesto en el riego de vías del relleno sanitario o sobre la quebrada El Carrasco (ANLA, 2018).

10.1.6 Manejo de lixiviados

De acuerdo al informe 37 de operación y mantenimiento de la Planta de Tratamiento de Lixiviados (PTLX), se reportan los resultados del análisis de laboratorio en donde se mide el afluente y efluente en el sitio de disposición final El Carrasco; en este se efectuó el estudio de las propiedades físicas y químicas del lixiviado tales como: pH, sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), sólidos sedimentables (SSED), alcalinidad, entre otras.

Tabla 22. Resultados del monitoreo del mes de enero de 2019 en la PTLX con los parámetros exigidos por la norma ambiental vigente. RESOLUCIÓN 0631 DE 2015.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR MAX. SEGÚN RES. 0631 DE 2015	LIXIVIADO AFLUENTE	EFLUENTE OR (VERTIMIENTO)	CUMPLE	REMOCIÓN (%)
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	7,71	7,12	X	
DQO	mg/L O ₂	2.000	32.754	<10	X	99,96
DBO_5	mg/L O ₂	800	11.019	4,38	X	99,95
SST	mg/L	400	2.612	9,4	X	99,54
SSED	ml/L	5	69,00	<0,1	X	99,81
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	11.084	183		97,89
Dureza total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	>1.000	<3,00		99,62

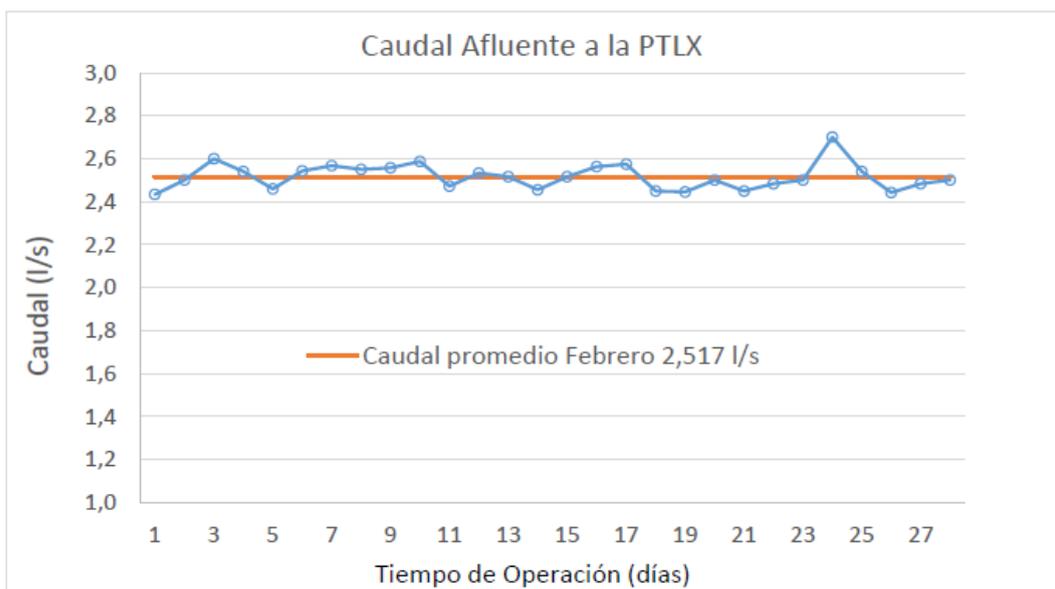
Fuente: EMAB, 2019

En la entrada del sistema se encontró una alcalinidad alta que resultó coherente con el pH, así mismo el valor de dureza obtenido permitió clasificar el agua como “Muy Dura” principalmente por la presencia de calcio como lo evidencia la concentración obtenida por la dureza cálcica que reporta los mismos datos de la dureza total. En contraparte al efluente de la PTLX, se encontró una disminución relevante de las concentraciones de estos parámetros (EMAB, 2019).

En cuanto a los sólidos suspendidos totales y los sólidos sedimentables, registraron en la salida concentraciones inferiores a los límites de los métodos analíticos empleados por el laboratorio, denotando una remoción eficiente de estos parámetros. La DQO y DBO_5 en la entrada del sistema reportaron concentraciones de, 32.754 y 11.019 mg/L respectivamente, las cuales disminuyeron drásticamente, <10 y 4,38 mg/L respectivamente, posterior al tratamiento, denotando condiciones operativas adecuadas en el sistema de tratamiento (EMAB, 2019).

Según el registro diario del caudal afluente de la PTLX para determinar el lixiviado generado por el relleno sanitario el Carrasco, el caudal de operación de la planta en febrero de 2019 osciló en un rango de 2,44 a 2,7 L/s, siendo el caudal promedio aproximadamente 2,517 l/s. Teniendo en cuenta estos valores, el volumen total de lixiviado tratado en este periodo en la planta fue de aproximadamente 6.666 m³ (EMAB, 2019).

Figura 11. Caudal promedio afluente a la PTLX para el periodo de febrero de 2019



Fuente: EMAB, 2019

10.1.1 Manejo de gases

Los gases producto de la descomposición de los residuos sólidos, salen por las chimeneas, las cuales se encuentran distribuidas en diferentes sectores de la celda 1, celda de disposición para el año 2018 (PGIRS). Estas chimeneas fueron instaladas cada 50 m, interconectadas entre sí, con la finalidad de garantizar una mayor eficiencia en el drenaje de lixiviados y permitiendo el flujo del gas de forma vertical entre niveles (EMAB, 2018).

Figura 12. Chimenea de gas en la celda 1



Fuente: EMAB, 2018

En general el tratamiento o manejo de gases y olores consiste en realzar chimeneas para quemar el gas (principalmente dióxido de carbono y metano), este proceso se logra a partir de la construcción de gaviones, utilizando mallas de 1m x 1m x 1m, piedra bola de 4 a 10 pulgadas, tubería perforada HDPE y geotextil para evitar la colmatación de la chimenea (EMAB, 2018).

El flujo volumétrico estándar seco de salida del gas se efectúa bajo las consideraciones y la ecuación establecida por el método de determinación de velocidad y caudal del gas de chimenea (US EPA)

Ecuación 9. Determinación de velocidad promedio del gas

$$V_s = K_p * C_p * \sqrt{\frac{T_s}{P_s * M_s}} * \sqrt{\frac{\sum \Delta P_i}{N}}$$

Donde:

V_s = Velocidad promedio del gas de chimenea

K_p = Constante

T_s = Temperatura absoluta media en la chimenea

C_p = Coeficiente de tubo pilot

ΔP_i = Cabenza de velocidad de gas chimenea en cada punto

P_s = Presión absoluta de chimenea

M_s = Peso molecular del gas de chimenea en base húmeda

N = Número de puntos de toma πr^2

Ecuación 10. Flujo volumétrico estándar seco

$$Q_{est} = 1000 (1 - Bws)(V_s)(A_s) \left(\frac{T_{est}}{T_{chim\ prom}} \right) \left(\frac{P_{chim}}{P_{est}} \right)$$

Donde:

Q_{est} = Flujo volumétrico estándar seco $\frac{l}{s}$

Bws = Humedad del gas en fracción

V_s = Velocidad promedio del gas en $\frac{m}{s}$

A_s = Área del ducto en m

T_{est} = Temperatura estándar (298k)

$T_{chim\ prom}$ = temperatura del ducto en K

P_{chim} = Presión absoluta del ducto en mmHg

P_{est} = Presión estándar (760 mmHg)

El monitoreo de biogás para el sitio de disposición final El Carrasco, se implementó mediante unas directrices para cumplir con los requisitos exigidos por la autoridad ambiental, se establecieron puntos de muestreo para realizar las respectivas mediciones con el equipo GAS-PRO Monitor de Gases Múltiples- CROWCON, el cual fue verificado y calibrado (Flórez, 2018).

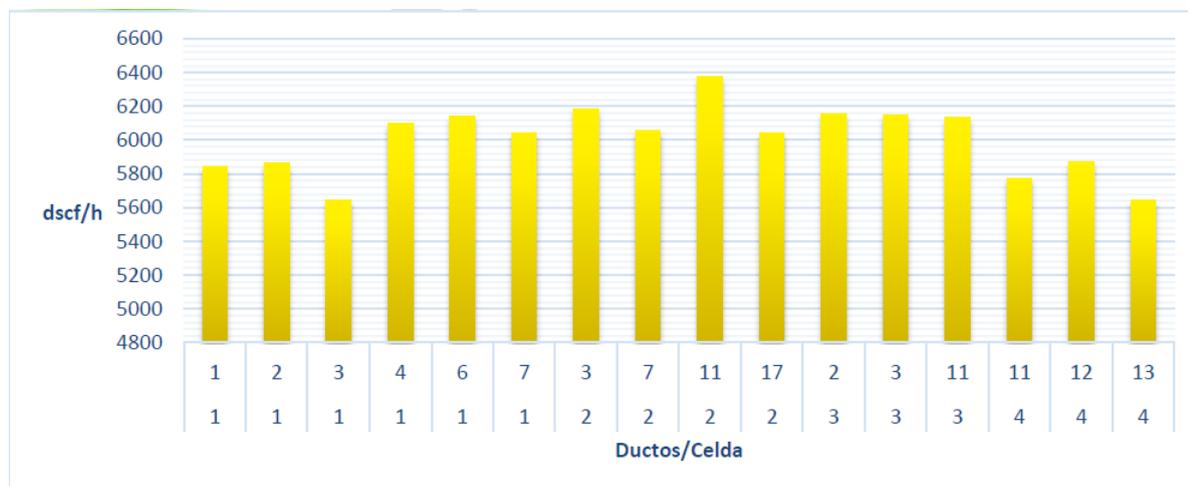
Para la determinación del caudal de los ductos establecidos en las diferentes celdas (1,2 y 4) se utilizó el parámetro Dry Standard Volumetric Flow Rate (dscf/h), (Pies cúbicos secos por hora en condiciones estándar), en el cual los valores de los ductos por cada celda se encuentra registrados en la tabla 23, cabe resaltar que se evaluaron más ductos pero el informe realizado la EMAB sólo reporta los siguientes.

Tabla 23. Consolidado caudales

PARÁMETRO	UNIDADES	CELDA 1					
		Ducto 1	Ducto 2	Ducto 3	Ducto 4	Ducto 6	Ducto 7
Dry Standard Volumetric Flow Rate	dscf/h	5.841	5.863	5.645	6.102	6.145	6.044
		CELDA 2					
		Ducto 3	Ducto 7	Ducto 11	Ducto 17		
		6.187	6.059	6.374	6.041		
		CELDA 4					
		Ducto 2	Ducto 3	Ducto 11	Ducto 12	Ducto 13	
		6.155	6.149	6.132	5.874	5.644	

Fuente: Flórez, 2018

Figura 13. Caudales registrados en los ductos



Fuente: Flórez, 2018

10.1.7 Componente Geológico

Los contaminantes contenidos en los lixiviados son conducidos por los estratos con mayor conductividad hidráulica correspondientes a las unidades geoelectricas IV, V y VI del SEV-2 (sondeos eléctricos verticales), ubicadas por debajo de los 14,0 m de profundidad a los cuales se localiza posiblemente el nivel freático, altamente intervenido por lixiviados debido a las condiciones de saturación, lo cual indica afectación ambiental por carga contaminante en las unidades geológicas localizadas en la celda 4 de la Cárcava 2 (Niño, Ramón & Ramón, 2016).

El primer punto fue localizado en la zona clausurada, en donde a partir del año 1985 se inició el proceso de posclausura; en el perfil estratigráfico se observa el predominio intercalado por capas de material areno-arcilloso y gravas, con capas de residuos sólidos (capas III, IV, V); se evidencia que la unidad geoeléctrica VI está constituida por capas entre gruesas y muy gruesas de variable espesor; texturalmente se trata de una grava de matriz grano, con esfericidad baja a media, y mal calibrada. Presenta feldespatos alterados, en los niveles medios, y arcillas compactas arenosas ligeramente micáceas con trazas de materia orgánica (Niño, Ramón & Ramón, 2016).

Además de las capas de residuos sólidos, se encontraron estratos alternados con material areno-arcilloso, a partir de una profundidad de 3,10 m en el SEV 2, en donde se disminuye notoriamente la resistividad, lo cual indica la función original de las arenas arcillosas que se constituyen como una barrera del paso de los lixiviados (Niño, Ramón & Ramón, 2016).

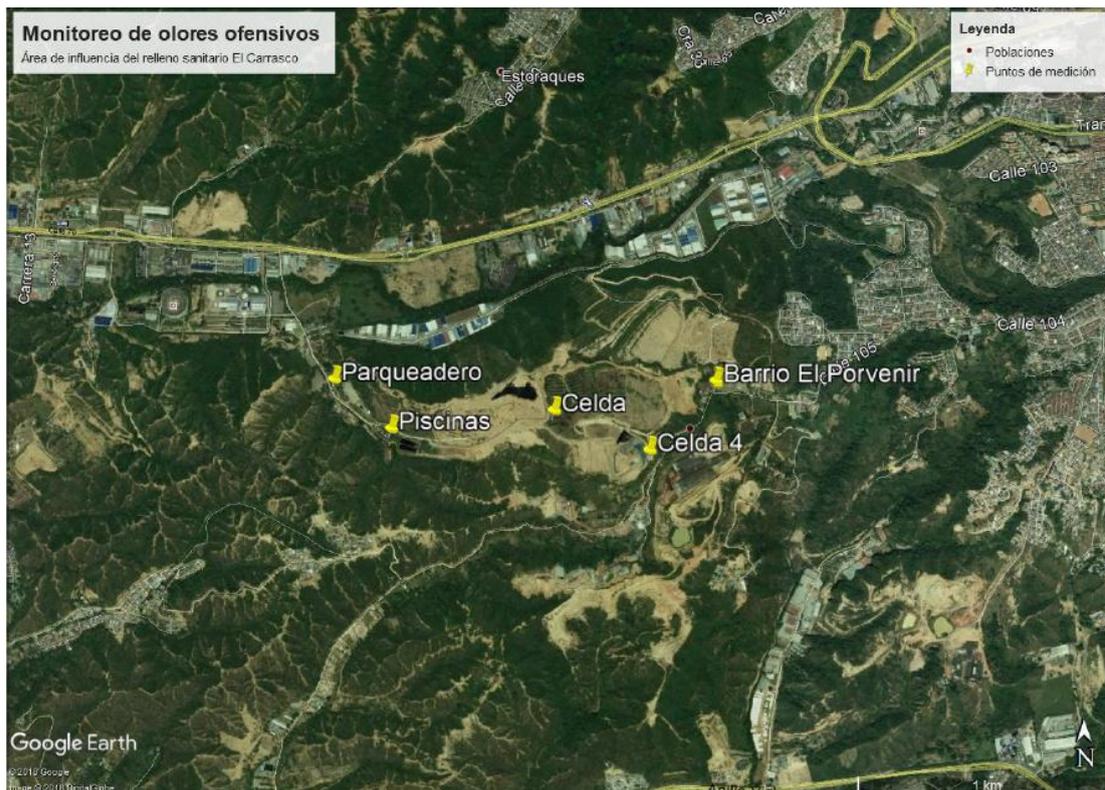
El SEV 1 fue hecho en la parte superior del sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco, punto estratégico ubicado por la importancia de la zona clausurada; en esta unidad geoeléctrica, la resistividad es de 91 Ohm-m, y teniendo en cuenta que la resistividad general para arcillas mezcladas con arena y/o grava es de 100 a 1000 Ohm-m, se puede concluir que el valor generado de 91 Ohm-m es acorde con la etapa de clausura de la celda que fue utilizada para la disposición de residuos (a cielo abierto) entre 1977 y 1985 (Niño, Ramón & Ramón, 2016).

En el área establecida para el SEV 2, se ubica en el centro de la celda que el día 11 de agosto, fecha que se realizó el sondeo, se encontraba en proceso de clausura; la cobertura final de esta celda presentó problemas bastante notables debido al incumplimiento de los requerimientos técnicos establecidos por las buenas prácticas de ingeniería para rellenos sanitarios, debido a que la cobertura final presentaba fallas técnicas porque no se efectuó un correcto manejo de lixiviados, lo cual generó altos niveles de percolación de aguas lluvias, especialmente en los meses de marzo, abril y mayo así como en septiembre y octubre, y parte de noviembre (Niño, Ramón & Ramón, 2016).

10.1.8 Meteorología de la zona

El área de estudio presenta la ubicación de cinco (5) estaciones de monitoreo de olores; la estación 1, se encuentra ubicada en el parqueadero principal, cuya fuente de emisión principal son los vehículos de carga, la estación 2 se ubica en las piscinas, estación que se encuentra cerca de la celda donde se disponen actualmente los residuos y se encuentran las piscinas de control de lixiviados, la estación 3 se ubica en una celda aleatoria del relleno, la estación 4 se localiza en un sector residencial conocido como el barrio El Porvenir y la estación 5 se ubica en la celda 4 del Cárcava 2.

Figura 14. Ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo de olores ofensivos



Fuente: Google Earth, 2018

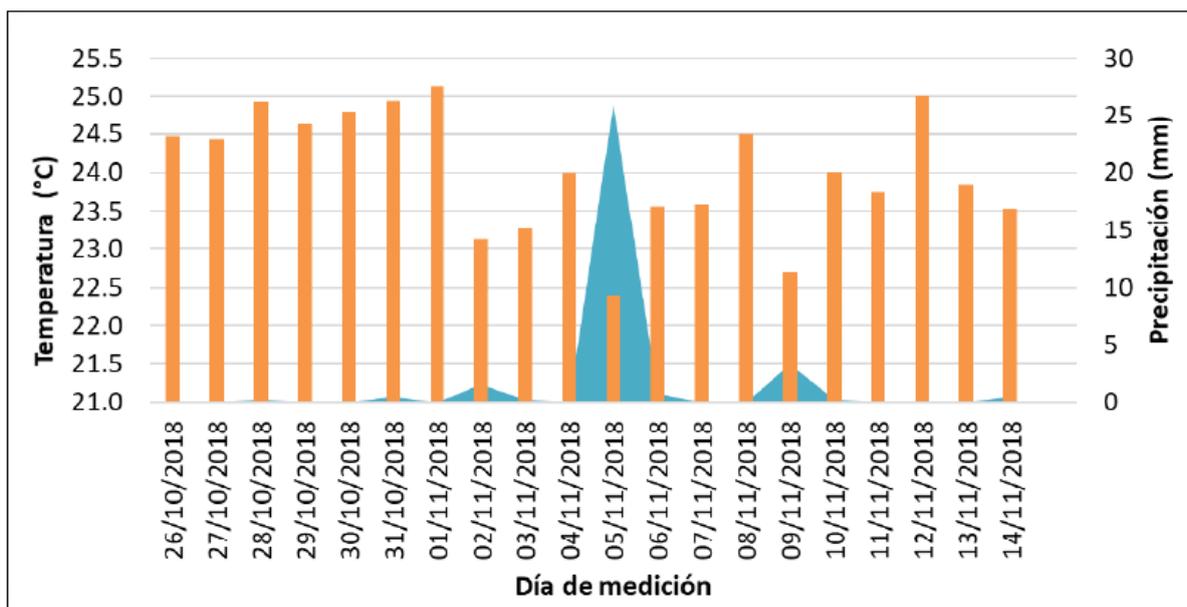
A continuación, se presenta un resumen de la información de los parámetros que tienen mayor incidencia en la dispersión de los contaminantes, en el monitoreo realizado por la firma K2 Ingeniería S.A.S durante los días 26 de octubre a 14 de noviembre de 2018.

Tabla 24. Resumen de los parámetros meteorológicos de muestreo

PARÁMETRO	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN BAROMÉTRICA (mmHg)	PRECIPITACIÓN (MM)	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s)	HUMEDAD (%)
Promedio	24.0	685.8	33.3*	0.1	84.2
Máximo	25.1	686.7	25.9	0.3	87.9
Mínimo	22.4	684.8	0.0	0.0	79.9

*Precipitación acumulada
Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S

Figura 15. Temperatura vs. Precipitación



Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

10.1.9 Temperatura ambiente

El relleno sanitario El Carrasco presenta una temperatura promedio de 24°C, con una máxima de 25.1°C y una mínima de 22.4°C. Las variaciones de temperatura tienen una influencia sobre la densidad del aire y, por lo tanto, sobre la velocidad del viento. A mayores temperaturas, se presenta un aumento en la velocidad del viento y por ende una mayor dispersión de los contaminantes en la atmósfera.

El incremento de la temperatura (25 a 31°C) y los vientos fuertes generan una reducción en la percepción de olores, debido al incremento en la altura de mezcla, el cual es un parámetro esencial en los estudios de dispersión de la contaminación atmosférica al representar el volumen de aire disponible para la dispersión y transporte de los vertidos contaminantes.

Por otro lado, al disminuir la temperatura (19 a 22°C) o menores, se genera la inversión térmica, fenómeno con vientos descendentes esporádicos y vientos ascendentes en zonas urbanas que atraen la atmósfera de otros alrededores, ocasionando que los contaminantes del aire sean transportados a bajas velocidades y así mismo se concentren en la zona de influencia directa.

10.1.10 Precipitación

Teniendo en cuenta la escala de precipitación presentada en la tabla 24 y el acumulado diario obtenida durante el periodo de medición y presentado en la figura 15, la precipitación total se encuentra en un rango de 21 a 40 mm/mes clasificándose como “Ligera”; no obstante, para el día 5 de noviembre en particular, la precipitación se clasifica como “Fuerte”.

Tabla 25. Escalas de precipitación

DENOMINACIÓN	PRECIPITACIÓN DIARIA (mm)	PRECIPITACIÓN MENSUAL (mm)
Escasa	0-5	0-20
Ligera	6-10	21-40
Moderada	11-20	41-80
Fuerte	21-50	81-200
Muy Fuerte	51-70	201-280
Intensa	> 70	> 281

Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

10.1.11 Vientos

Para el área de estudio, se reportaron velocidades entre 0 – 1,5 m/s. clasificadas como vientos en “calma” y “aire ligero”, de acuerdo a la escala Beaufort, información que es presentada en la tabla 26 y observándose una marcada predominancia de los vientos provenientes de la dirección Sur-Suroeste (SSW).

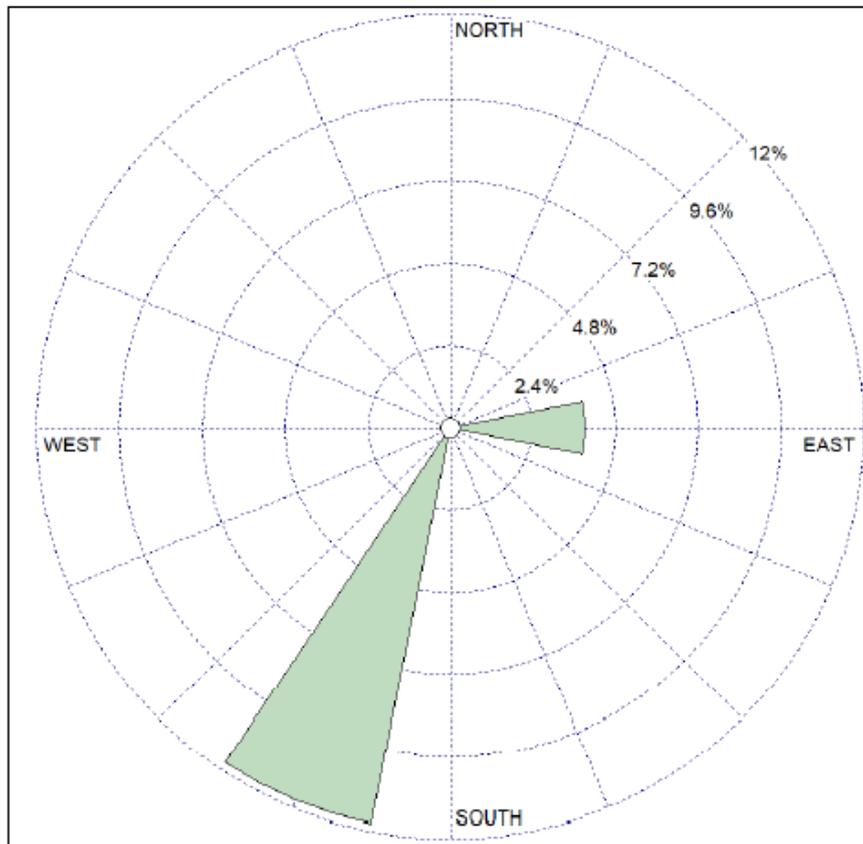
Tabla 26. Clasificación de vientos según velocidad (Beaufort)

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN DEL EFECTO DE VIENTO	RANGO DE VELOCIDAD (m/s)
Calma	Calma, el humo asciende verticalmente	0 – 0,2
Aire ligero	El humo indica la dirección del viento	0,3 - 1,5
Brisa ligera	Se mueven las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos	1,6 – 3,3
Brisa suave	Se agitan las hojas, ondulan las banderas	3,4 – 5,4
Brisa moderada	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles	5,5 – 7,9
Brisa fresca	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada	8 – 10,8
Brisa fuerte	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas	10,9 – 13,8
Viento casi temporal	Se mueven los árboles grandes, dificultad para andar contra el viento	13,9 – 16,9
Viento temporal	Se quiebran las copas de los árboles, circulación de personas dificultosa	17 – 20,5
Viento temporal fuerte	Daños en árboles, imposible andar contra el viento	20,6 – 24,1
Tormenta	Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones	24,2 – 28,3

Tormenta violenta	Estragos abundantes en construcciones, tejados y árboles	28,4 – 32,6
Huracán	Destrucción total	>32,7

Fuente: Beaufort, 2008

Figura 16. Rosa de vientos



Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S, 2019

Figura 17. Rosa de vientos en el sitio de disposición final El Carrasco



Fuente: K2 INGENIERÍA S.A.S.

10.1.12 Hidrografía subterránea y superficial

Dentro de la hidrografía superficial y freática para el área de influencia del sitio de disposición final, se encuentra la quebrada El Carrasco, a través de la cual se ha considerado en amenaza por la alteración de su morfología y topografía, específicamente en el sector aledaño al cauce principal.

Por su parte, el ANLA realizó una visita en el año 2016, y de esta se pudo establecer lo siguiente: “...hacia la zona alta de la quebrada El Carrasco en el sector en que colinda con la celda 1, ocurrió un proceso de remoción en masa en el talud que ocasionó que la masa de residuos se deslizara sobre el cauce de la quebrada El Carrasco, taponándola totalmente y generando el represamiento de las aguas que discurren por la quebrada además del contacto directo de estas aguas con los residuos dispuestos en la celda y por consiguiente con los lixiviados” (ANLA, 2018).

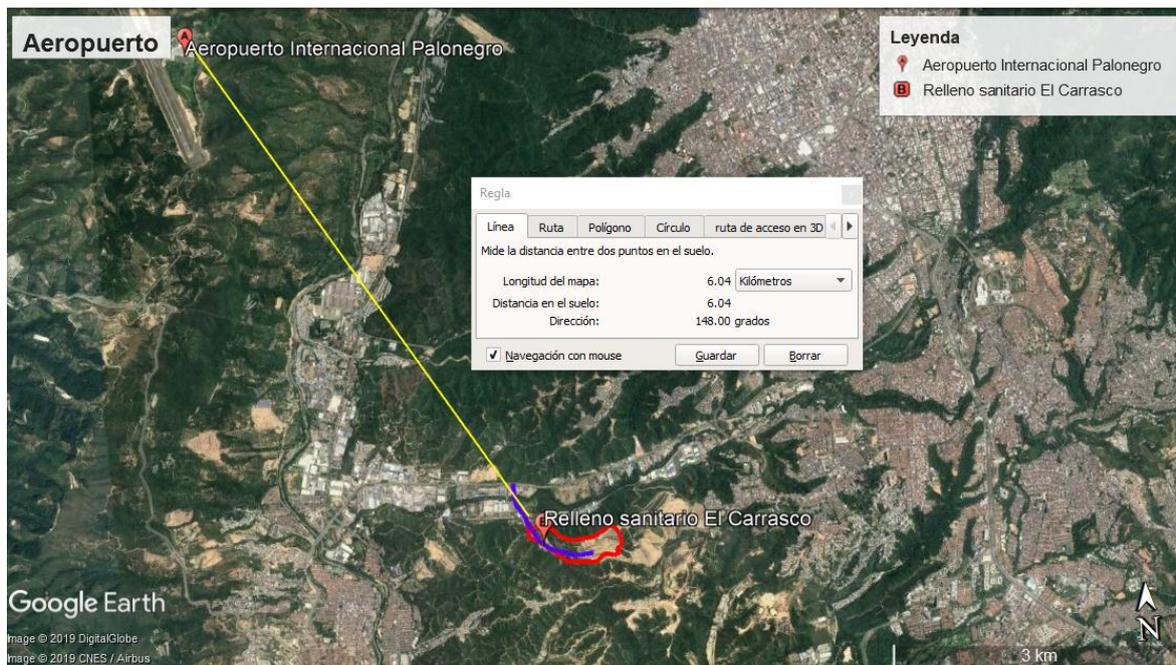
En relación con esto, se presenta un deficiente manejo en cuanto a las aguas lluvias y de escorrentía, dado a que los lixiviados discurren hacia los canales de las vías o drenajes existentes entre celdas, tales aguas se mezclan con aguas de escorrentía llegando a ser descargadas en esta quebrada, afluente de la quebrada la Iglesia, que es tributaria del río de Oro.

10.1.13 Presencia de aves: Zopilote negro

Durante el 2014 se evidenció aumento de presencia de aves de rapiña, de olores ofensivos y de vectores. Se considera que esta afectación presenta una intensidad que se comprende entre el 67 y 99% del predio El Carrasco, dado que la situación de manejo del mismo es precaria y afecta casi toda el área de operación (ANLA, 2017).

Se considera que, el riesgo que generan las aves sobre el tráfico aéreo en el Aeropuerto Internacional Palonegro es alta, considerando que la distancia actual del relleno con el aeropuerto son de escasos 6 km, que implica que las aves están en capacidad de llegar a la pista o con bastante aproximación, dada la capacidad de las aves de desplazarse desde el sitio de alimentación y refugio, que es el relleno Sanitario El Carrasco, hasta el área de aproximación en el aeropuerto (ANLA, 2017).

Figura 18 Distancia Aeropuerto Internacional Palonegro al relleno sanitario El Carrasco



Fuente: Google Earth, 2019

10.1.14 Situación socioeconómica

La cantidad de población en el área del relleno, está determinada por los diferentes municipios circundantes, dentro de los cuales se encuentra el municipio de Bucaramanga, con una población registrada para el año 2014 de 527.552 habitantes y 528.683 habitantes para el año 2018 (DANE, 2005), lo cual representa una tasa de crecimiento de 0,04 % en términos anuales.

En términos de población total, se registra un dato aproximado de 1.278.564 habitantes, demostrando que este dato ha sido calculado para un periodo de 5 años (2014 - 2018) de la población total de cada municipio.

Ecuación 11. Tasa de crecimiento de la población

$$P_t = P_0 (1 + r)^t$$

$$P_5 = P_0 (1 + r)^5$$

$$(1 + r)^5 = \frac{P_5}{P_0}$$

$$(1 + r)^5 = \frac{528.683}{527.552}$$

$$(1 + r)^5 = 1,002$$

$$1 + r = (1,002)^{\frac{1}{5}}$$

$$1 + r = 1,0004$$

$$r = 1,0004 - 1$$

$$r = 0,000428$$

$$r = 0,04 \%$$

Donde:

Pt: Población final

Po: Población inicial

r: tasa de crecimiento de la población total

t: tiempo en años

Además, en esta zona de influencia se encuentra los municipios de Floridablanca, Piedecuesta, Girón, Rionegro, Lebrija, Suratá, Charta, California, Barbosa, Matanza, El Playón, Tona, Vetas, Mesa de los Santos y Zapatoca. A continuación, se presenta la tabla 27, con los respectivos municipios, el registro de la población de los años 2014-2018 y su tasa de crecimiento anual.

Tabla 27. Población de los municipios en el área de influencia del relleno sanitario El Carrasco y su respectiva tasa de crecimiento anual

N°	MUNICIPIOS	POBLACIÓN					TASA DE CRECIMIENTO (%)
		2014	2015	2016	2017	2018	
1	Bucaramanga	527.552	527.985	528.352	528.575	528.683	0,04
2	Floridablanca	264.746	265.452	266.102	266.669	267.170	0,18
3	Piedecuesta	145.810	149.219	152.665	156.167	159.729	1,84
4	Girón	175.457	180.305	185.248	190.283	195.426	2,18
5	Betulia	5.134	5.110	5.075	5.061	5.031	-0,40
6	Rionegro	27.330	27.114	26.896	26.680	26.461	-0,64
7	Lebrija	37.739	38.560	39.398	40.252	41.122	1,73
8	Suratá	3.325	3.295	3.264	3.225	3.196	-0,79
9	Charta	2.718	2.670	2.637	2.592	2.549	-1,28

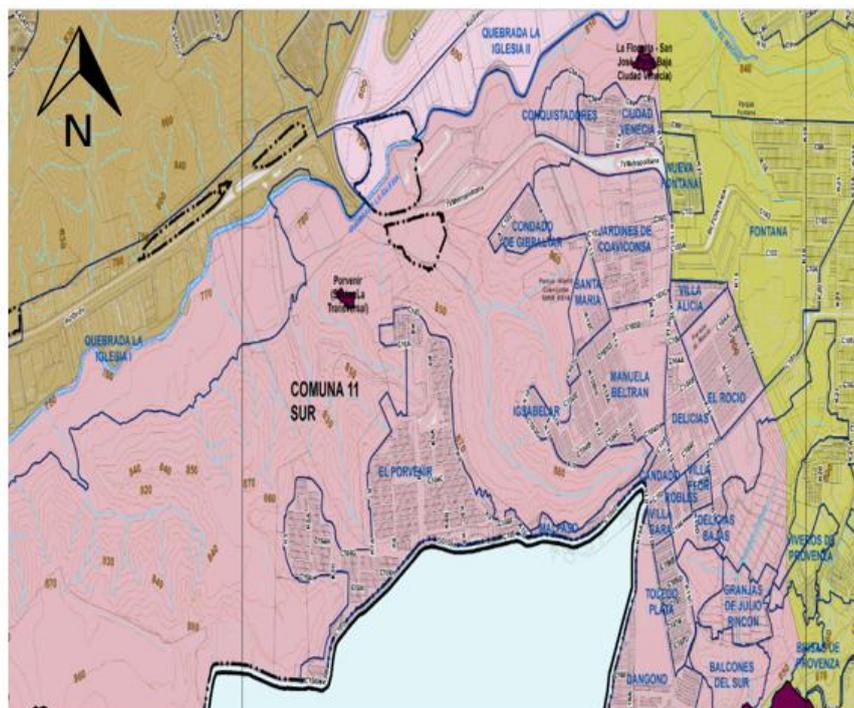
10	California	1.956	1.984	2.006	2.020	2.037	0,81
11	Matanza	5.342	5.297	5.238	5.201	5.147	-0,74
12	El Playón	11.911	11.776	11.646	11.520	11.385	-0,90
13	Tona	7.046	7.085	7.129	7.168	7.201	0,44
14	Los Santos	12.065	12.185	12.299	12.423	12.539	0,77
15	Santa Bárbara	2.146	2.137	2.122	2.100	2.085	-0,58
16	Zapatoca	8.969	8.929	8.891	8.847	8.803	-0,37

Fuente: Autores, 2019

Del mismo modo, la población más cercana se encuentra ubicada a menos de 1 kilómetro en el barrio El Porvenir, el cual tiene aproximadamente 10.000 habitantes y se ha demostrado en diferentes estudios la problemática que enfrenta esta población por la cercanía al relleno, puesto que este barrio registra que el 1% de la población reside hace menos de 1 año, el 5% reside de 1 a 5 años, el 27% reside de 5 a 10 años y el 34% reside hace más de 10 años (Carrascal & Carrascal, 2012).

El barrio El Porvenir, se encuentra localizado dentro de la “Comuna 11 sur” y este a su vez tiene una extensión de 321,50 Ha; como se demuestra a continuación:

Figura 19. División Política Urbana del municipio de Bucaramanga



Fuente: Secretaría de Planeación Municipal, 2019

Del diagnóstico anterior, se puede concluir que en la actualidad El Carrasco se denomina relleno, pero que ha venido de ser un botadero toda vez que ocupó cárcavas, fuentes superficiales de agua y espacios totalmente naturales para el manejo de corrientes impidiendo el desarrollo hídrico de

la región.

De acuerdo a la producción de residuos sólidos mostrada en la tabla 14, se puede inferir que para el año 2017 se obtuvo una producción total de 1030,61 Ton/día equivalente a 376.173 Ton/año, lo cual demuestra una disminución en el año 2019 con una producción total de 328.500 Ton/año.

10.2 Resultados del objetivo específico 2

El modelo colombiano de biogás realizado en el desarrollo del objetivo específico dos, se organizó con base en las cinco fases proporcionadas por el modelo.

En primera instancia, se muestra el mapa de Colombia en donde se clasifican las diferentes regiones geográficas del país, por lo cual el Departamento de Santander hace parte de la región Andina como se muestra en la figura 20.

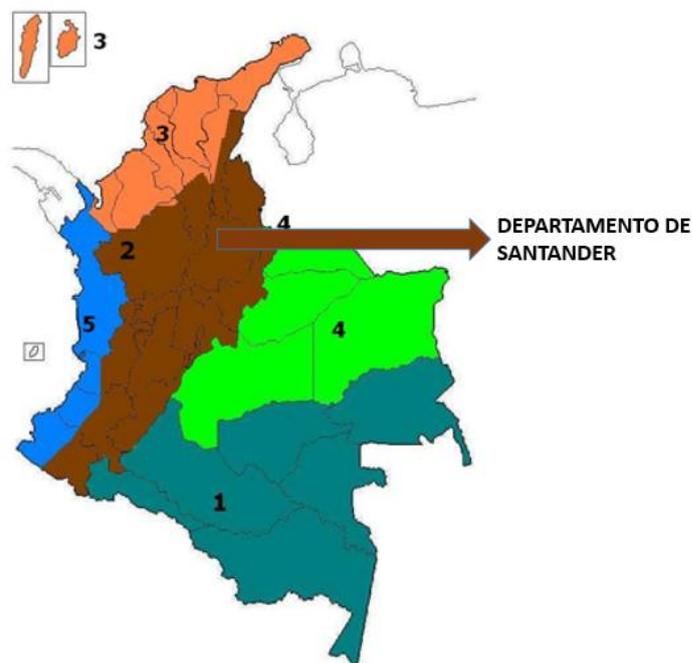
Se presenta la fase de alimentación del modelo, la cual representa la base para obtener resultados confiables, en esta fase se tuvo en cuenta las variables determinadas desde el diagnóstico ambiental realizado en el objetivo específico 1.

Por consiguiente, se expone las respectivas tablas de resultados para determinar la generación y recuperación de biogás, que permiten establecer la capacidad máxima de la planta de electricidad y la gráfica de proyección de recuperación de biogás en el relleno sanitario El Carrasco.

Cabe resaltar, que este modelo determina la reducción de emisiones para CH₄ y CO₂ equivalente, lo cual representa un dato importante para el desarrollo del objetivo específico 3.

10.2.1 Fase 1: Regiones geográficas de Colombia

Figura 20. Mapa de Regiones Geográficas de Colombia



Fuente: EPA, 2009 (Figura 1).

Las regiones Geográficas que corresponden al mapa son las siguientes:

- 1) Amazónica
- 2) Andina
- 3) Caribe
- 4) Orinoquía
- 5) Pacífica

Como se puede observar en el mapa anterior, el departamento de Santander se encuentra ubicado en la región andina, lo cual es importante para el modelo poder basarse en la precipitación anual promedio característico del departamento estudiado.

La precipitación media anual es el valor que se obtiene a partir del promedio de las lluvias registradas en los doce meses del año; en la región andina se da una precipitación húmeda con valores de 1500-1999 mm/yr; los cuales son característicos de esta zona (EPA, 2009).

10.2.2 Alimentación

La hoja de “Alimentación” cuenta con 30 filas de texto que requiere información del relleno sanitario El Carrasco, en donde el modelo calcula con información específica. La tabla 28 muestra el diseño de la sección de alimentación que presenta todas las preguntas y entradas de información del relleno (EPA, 2009).

Tabla 28. Alimentación del modelo colombiano de biogás

MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS		
DESARROLLADO POR SCS ENGINEERS, PARA LA AGENCIA DE PROTECCIÓN AL AMBIENTE DE LOS E.E.U.U (EPA US)		
1	Nombre del sitio:	Relleno Sanitario El Carrasco
2	Ciudad:	Bucaramanga
3	Departamento:	Santander
4	Seleccionar una de 5 regiones geográficas en Colombia:	Andina
5	Seleccionar una de 5 zonas climáticas basado en la precipitación anual promedio:	Húmedo (1500-1999 mm/yr)
6	¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión?	Si
7	Año de apertura del sitio:	1978
8	Disposición anual del año más reciente (Mg/año):	328.500 Mg
9	Año de disposición (ver #8):	2018
10	¿Existe información sobre el volumen total dispuesto en el sitio (volumen o	Si

	masa)? Si no existe información, entonces pasar al #15	
11	¿Existe información sobre la disposición histórica de residuos para calcular el Mg. dispuesto en sitio?	No
12	¿Cuál es el estimado de residuos puesto en el sitio al final del año? (ver #9)	32.851 m ³
13	¿Cuál es la densidad estimada en sitio en Mg/m ³ (rango típico: 0.5-1.0)	1,11 Mg/m ³
14	Si el volumen de residuos puesto en sitio se encuentra en (m ³), convertir a Mg:	36.464 Mg
15	Año de clausura actual o proyectado:	2019
16	Crecimiento estimado en la disposición anual:	-1,0 %
17	Profundidad promedio del relleno sanitario:	13 m
18	Diseño y prácticas de manejo del relleno sanitario (condiciones históricas promedio):	1
19a	¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?	Si
19b	Si la respuesta 19a es "Sí", indique el área del impacto en % del total del relleno sanitario:	11%
19c	Si la respuesta 19a es "Sí", indique la gravedad o impacto del incendio:	2
20	Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado):	2018
21	Porcentaje del área con residuos que cubre el sistema de captura:	90%
22	Porcentaje del área con residuos con cubierta final:	100%
23	Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia:	0%
24	Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria:	0%
25	Porcentaje del área con residuos sin cobertura:	0%
26	Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana:	100%
27	¿La compactación de residuos se hace regularmente?	Si
28	¿La disposición de residuos se hace en un área específica?	Si
29a	¿Existe el afloramiento/brote de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?	Si
29b	Si la respuesta de 29a es "Sí", ¿esto ocurre sólo después de llover?	No
30	Eficiencia de captura estimada	52%

Fuente: Autores, 2019

Para la pregunta 18, diseño y prácticas de manejo del relleno sanitario se tuvo en cuenta la clasificación del modelo que refiere a la disposición del sitio si cuenta o no con control. De ser la primera opción se selecciona el número 2, de ser el caso contrario se opta por el número 1 y de no ser ninguno de los dos casos anteriores, se registra el número 3.

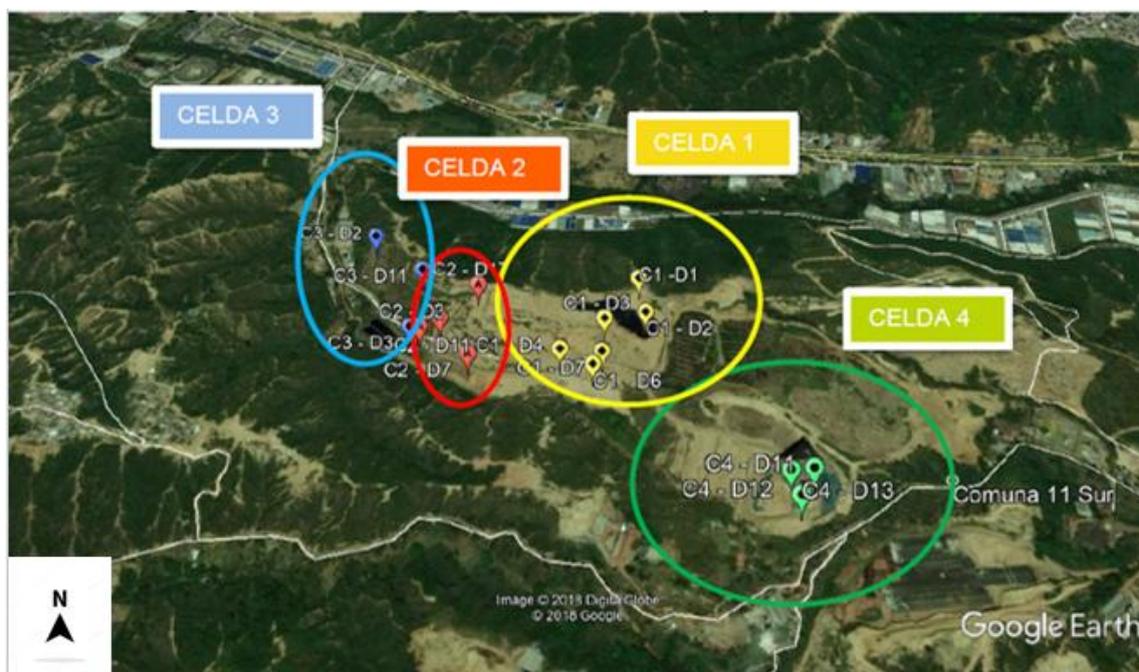
Para la pregunta 19 b, se indica el área del impacto en porcentaje (%) del total del relleno sanitario que fue afectado por un incendio. En este se tuvo en cuenta el incendio reportado en el mes de febrero de 2016, debido al uso de voladores (pólvora) que cayó sobre vegetación presente en el predio (ANLA, 2018). Para estimar el porcentaje se tuvo en cuenta el área total del predio (94 ha) y el área de la zona afectada que corresponde al sector del Carrasco cubierto por vegetación natural (12 ha).

En la pregunta 19 c, se indica la gravedad o impacto del incendio en la cual un impacto bajo corresponde a (1), impacto medio (2) e impacto grave (3).

10.2.3 Disposición y Recuperación de Biogás

Se determinó la disposición de residuos estimada en toneladas métricas, la eficiencia del sistema de captura y la recuperación del biogás (m^3/hr a 50% CH_4), la cual no se está recuperando, puesto que en el año 2018 se instaló el captador de biogás en las celdas 1, 2, 3 y 4 como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Localización de los ductos y las celdas instalados en 2018



Fuente: EMAB, 2018

La eficiencia del sistema de captura hace referencia al porcentaje de la generación del biogás que se estima, el cual puede ser recuperado por el sistema de recolección; dicha eficiencia se establece en función de la cobertura del sistema y la propia operación del sistema de captura.

Se calcula mediante las pautas establecidas por el modelo, detalladas en el capítulo de metodología. En la tabla 29 se muestran los resultados obtenidos de la eficiencia de captura de biogás.

Tabla 29. Resultados de la eficiencia de captura de biogás

PARÁMETRO	PORCENTAJE DE EFICIENCIA
Corresponde a las prácticas de manejo del sitio	85%
Corresponde a la profundidad de residuos	85%
Área de cobertura del sistema de captura	77%
Cobertura superior y su cobertura	69%
Recubrimiento inferior y su cobertura	69%
Compactación de los residuos	69%
Área de disposición designada	69%
Lixiviado	52%
Eficiencia de Captura Estimada:	52%

Fuente: Autores, 2019

De acuerdo con la US EPA, las eficiencias de captura típicas varían entre 60% a 85%, con un promedio de 75%. Un reporte del IPCC estableció que una recuperación menor del 90% puede ser lograda en celdas con cobertura final y un sistema de captura eficiente (EPA, 2009).

En Colombia se pueden alcanzar eficiencias de captura máximas de más de 90% bajo las mejores condiciones y sitios sin manejo nunca podrían alcanzar eficiencias de captura de 50% aún con un muy buen sistema de captura instalado (EPA, 2009).

Ahora bien, la eficiencia de captura de biogás para el relleno sanitario El Carrasco, se encuentra en un escenario intermedio óptimo (52%) para recuperar el biogás y convertirlo en energía (Vera, Estrada, Martínez, & Ortiz, 2015).

10.2.4 Caracterización de los residuos

El valor de la generación potencial de metano (*Lo*) de los residuos describe la cantidad total de gas metano potencialmente producida por una tonelada de residuos cuando esta se degrada y depende casi exclusivamente de la caracterización de los residuos en el relleno sanitario.

Para realizar la siguiente tabla se tuvo en cuenta los datos de caracterización de residuos suministrados por la Empresa de Aseo de Bucaramanga que fueron de gran importancia para alimentar el modelo.

Tabla 30. Caracterización de residuos en el relleno sanitario El Carrasco y en el Departamento de Santander

CATEGORÍA DE RESIDUO	DATOS ESPECÍFICOS AL SITIO	SANTANDER
Comida	30,0%	45,7%
Papel y cartón	8,0%	5,7%
Poda (jardines)	30,0%	5,2%

Madera	2,5%	6,4%
Caucho, piel, huesos y paja	2,5%	3,1%
Textiles	4,0%	7,0%
Papel higiénico	0,0%	2,3%
Otros orgánicos	0,0%	0,2%
Pañales (asume 20% orgánico y 80% inorgánico)	0,0%	2,1%
Metales	1,0%	1,0%
Construcción y demolición	0,0%	4,9%
Vidrio y cerámica	1,0%	1,1%
Plásticos	21,0%	11,9%
Otros inorgánicos	0,0%	3,5%
TOTAL	100,0%	100,0%

Fuente: EMAB, 2018 y Modelo colombiano de biogás, 2019

De la anterior tabla, el modelo proporciona una serie de datos que contribuyen a la generación y recuperación de biogás, la cual se muestra en la tabla 31.

Tabla 31. Resultados obtenidos de la caracterización de los residuos

CATEGORÍA DE RESIDUO	DATOS ESPECÍFICOS AL RELLENO SANITARIO EL CARRASCO	SANTANDER
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	30,0%	46,3%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	30,0%	7,4%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	12,0%	12,7%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	5,0%	9,5%
Total orgánicos	77,0%	75,9%
Total inorgánicos	23,0%	24,1%
Lo de degradación rápida calculado	70	70
Lo de degradación moderadamente rápida calculado	121	121
Lo de degradación moderadamente lenta calculado	145	145
Lo de degradación lenta calculado	200	200

Fuente: Autores, 2019

Teniendo en cuenta la anterior tabla se pueden identificar 4 categorías en las que se dividen los residuos, según el modelo colombiano de biogás.

- ❖ Residuos de degradación muy rápida: residuos alimenticios, otros orgánicos, 20% de los pañales.
- ❖ Residuos de degradación moderadamente rápida: residuos vegetales, poda de casas o parques municipales, papel higiénico.
- ❖ Residuos de degradación moderadamente lenta: papel, cartón, textiles.
- ❖ Residuos de degradación muy lenta: madera, caucho, piel, huesos, paja.

La primera categoría que corresponde a residuos de degradación muy rápida cuenta con el 30% de los residuos del relleno sanitario El Carrasco y el 46,3% para el departamento de Santander, también se evidencia la generación potencial de metano de degradación rápida calculado, el cual tiene un valor de 70 tanto para el relleno sanitario como para el departamento de Santander.

La segunda categoría que corresponde a residuos con degradación moderadamente rápida cuenta con el 30% de los residuos del relleno sanitario El Carrasco, mientras que para el departamento de Santander disminuye a 7,4%. Para esta segunda categoría también se calcula la generación potencial de metano de degradación moderadamente rápida calculado el cual tiene un valor de 121 para los dos sitios.

La tercera categoría que corresponde a residuos de degradación moderadamente lenta se evidencian porcentajes similares, para el relleno sanitario el Carrasco se evidencia el 12% para esta categoría, mientras que para el departamento de Santander el porcentaje es de 12,7. Para esta tercera categoría también se calcula la generación potencial de metano de degradación moderadamente lenta calculado el cual tiene un valor de 145.

Para la última categoría que son residuos de degradación muy lenta le corresponde un 5,0% de esta categoría para el relleno sanitario el carrasco, mientras que para el departamento de Santander le corresponde un 9,5%. Además, el cálculo de la generación potencial de metano de degradación lenta calculado tiene un valor de 200.

Por otro lado, también se evidencia el porcentaje de residuos orgánicos e inorgánicos, para el relleno sanitario El Carrasco en residuos orgánicos corresponde al 77% mientras que para el departamento de Santander es de 75,9%. Para el segundo tipo de residuos que son los inorgánicos el relleno sanitario El Carrasco le corresponde el 23% mientras que para el departamento de Santander se evidencia un ligero aumento con un 24,1%.

10.2.5 Tabla de resultados

Los resultados del modelo se muestran en la tabla 32, la cual proporciona información sobre el año de cierre proyectado o actual, la disposición de residuos en Mg por año y acumulada, generación de biogás para cada año de proyección en m³/hr, pie³/min y mmBtu/hr (millones de unidades térmicas británicas por hora), estimados de reducción de emisiones de metano en toneladas CH₄/año y en toneladas CO₂ eq/año (CER's), entre otras.

Tabla 32. Tabla de resultados

PROYECCIONES DE GENERACIÓN Y RECUPERACIÓN DE BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS													
Relleno Sanitario El Carrasco													
Bucaramanga, Santander, Colombia													
Año	Disposición (Mg/ir)	Disposición Acumulada (Mg)	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad* (MW)	Línea Base del Flujo de Biogás (m ³ /hr)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m ³ /hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)		(m ³ /hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)			(tonnes CH ₄ /yr)	(tonnes CO ₂ eq/yr)
2018	328.500	34.660	-82	-48	-1,5	52%	-42	-25	-0,8	-0,1	0	-133	-2.796
2019	325.220	359.880	555	327	9,9	52%	289	170	5,2	0,5	0	905	19.001
2020	0	359.880	1,059	623	18,9	52%	551	324	9,8	0,9	0	1.727	36.257
2021	0	359.880	849	500	15,2	52%	441	260	7,9	0,7	0	1.385	29.076
2022	0	359.880	689	405	12,3	52%	358	211	6,4	0,6	0	1.123	23.591
2023	0	359.880	565	333	10,1	52%	294	173	5,3	0,5	0	922	19.361
2024	0	359.880	469	276	8,4	52%	244	144	4,4	0,4	0	765	16.065
2025	0	359.880	393	232	7,0	52%	205	120	3,7	0,3	0	641	13.471
2026	0	359.880	333	196	6,0	52%	173	102	3,1	0,3	0	543	11.407
2027	0	359.880	285	168	5,1	52%	148	87	2,6	0,2	0	464	9.748
2028	0	359.880	245	144	4,4	52%	128	75	2,3	0,2	0	400	8.400
2029	0	359.880	213	125	3,8	52%	111	65	2,0	0,2	0	347	7.294
2030	0	359.880	186	110	3,3	52%	97	57	1,7	0,2	0	304	6.377

Fuente: Autores, 2019

En la tabla anterior, se está mostrando que a partir del año 2020 la disposición de residuos sólidos se registra como cero toda vez que el cierre del relleno sanitario se tiene previsto a partir de este año.

El cálculo para la reducción de emisiones no toma en cuenta la generación de electricidad o las emisiones del proyecto; esta es calculada usando una densidad de metano de 0,0007168 Mg/m³ a temperatura estándar (EPA, 2009).

Por otra parte, el modelo utiliza unos parámetros para realizar los cálculos mostrados en la tabla 33 y para esto se utilizó un contenido de metano en el biogás del 50% con un factor de corrección del 0,8, el cual es un ajuste a las estimaciones de generación de biogás del modelo que toma en cuenta el grado de descomposición anaeróbica de los residuos.

Tabla 33. Parámetros del modelo

CATEGORÍA DE RESIDUO	DEGRADACIÓN RÁPIDA	DEGRADACIÓN MODERADAMENTE RÁPIDA	DEGRADACIÓN MODERADAMENTE LENTA	DEGRADACIÓN LENTA
Índice de generación de CH ₄ (k):	0,340	0,150	0,060	0,030
Potencial de generación de CH ₄ (Lo) (m ³ /Mg):	52	90	108	149

Fuente: Modelo colombiano de biogás, 2019

El valor de k describe el índice al cual los residuos dispuestos en el relleno sanitario se degradan y producen metano, y está relacionado con el período de vida de los residuos. Conforme el valor de k incrementa, la generación de metano en un relleno sanitario también incrementa (siempre y cuando el relleno sanitario siga recibiendo residuos) y luego disminuye con el tiempo (después que el relleno sanitario es clausurado) (EPA, 2009).

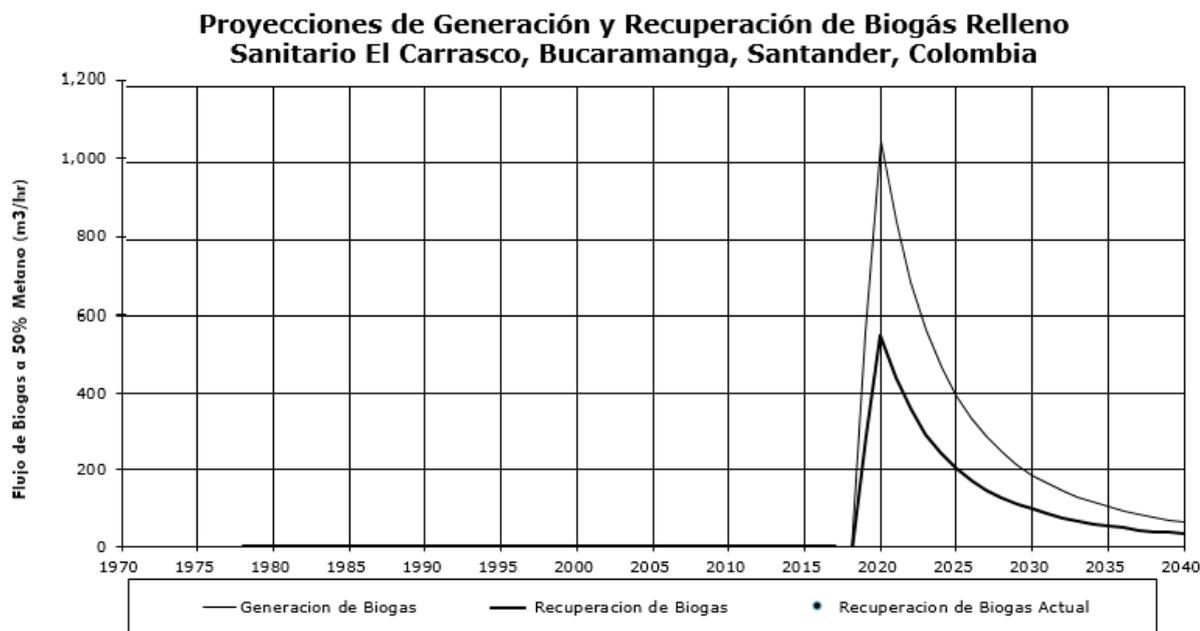
(Lo) es la constante del modelo que representa la capacidad potencial para generar metano (componente principal del biogás) del relleno sanitario, depende de la cantidad de celulosa disponible en los residuos. Las unidades de (Lo) están en metros cúbicos por tonelada de residuos (m³/Mg) y los valores teóricos varían entre 6,2 y 270 m³/Mg (EPA, 2009).

El potencial de generación de metano alcanza su máxima (149 m³/Mg) con una degradación lenta, lo cual corresponde a residuos de madera, caucho, piel, huesos y paja. Esto significa que, este tipo de residuos requiere una degradación más lenta en comparación con residuos alimenticios en donde la degradación es mucho más rápida.

10.2.6 Gráfica de resultados

Por último en esta fase se evidencia los resultados por medio de una gráfica, la cual proyecta la generación y recuperación del relleno sanitario El Carrasco.

Figura 22. Gráfica de resultados



Fuente: Modelo colombiano de biogás, 2019

10.3 Resultados del objetivo específico 3

En esta sección se establecen los lineamientos para definir la estrategia de manejo ambiental mediante la cual el biogás pueda ser recuperado y aprovechado; generando así beneficios socioambientales en la población aledaña al relleno sanitario El Carrasco.

A partir de los resultados obtenidos de la generación y recuperación de biogás (tabla 32), en donde es posible identificar la capacidad máxima de la planta de electricidad (MW) se determina la cantidad de viviendas y de población que se beneficiará de la estrategia a desarrollar.

ESTRATEGIAS DE MANEJO AMBIENTAL

10.3.1 Estrategia de manejo ambiental 1

Tabla 34. Estrategia de manejo ambiental

ESTRATEGIA DE MANEJO AMBIENTAL 1				
ALTERNATIVA	RECUPERACIÓN DEL BIOGÁS			
OBJETIVO	Establecer el uso que se le dará a la energía proporcionada por el modelo.			
FASE DE APLICACIÓN	Construcción y operación del relleno		Cierre del relleno	
TIPO DE MEDIDA	Prevención	Mitigación	Compensación	Recuperación
IMPACTOS A CONTROLAR	<ul style="list-style-type: none"> • Control de emisiones atmosféricas • Control de olores ofensivos • Afectación del paisaje • Estabilidad del relleno • Conflicto con la comunidad 			
ACCIONES A DESARROLLAR	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculos para establecer las viviendas que podrían ser iluminadas con la máxima capacidad de la planta de energía • Identificar los sitios que serán beneficiados por dicha estrategia • Dar a conocer otros usos de la planta de electricidad 			
LUGAR DE APLICACIÓN (LOCALIZACIÓN)	Barrios cercanos al relleno sanitario El Carrasco			

Fuente: Autores, 2019

Los resultados obtenidos en el modelo colombiano de biogás arrojan la capacidad máxima de la planta de electricidad, se utiliza la cantidad mínima para establecer el número de viviendas que se podrían iluminar.

Cabe anotar que para determinar el número de viviendas se tomó como referencia un bombillo Led de 9W (vatios) y un promedio de 15 bombillos por vivienda, en el cual no se tuvo en cuenta la energía de aparatos electrodomésticos y demás. Así mismo, estos cálculos se demuestran en la siguiente ecuación.

Ecuación 12. Cantidad de vatios por vivienda

$$9W * 15 \text{ bombillos} = 135 \text{ W/vivienda}$$

Se escogió la capacidad mínima de la planta de energía de 0,2 MW, lo cual equivale a 200.000 W para determinar el número de viviendas como se muestra en la ecuación 13.

Ecuación 13. Número de viviendas iluminadas

$$\begin{aligned} \text{Número de viviendas} &= 200.000 \text{ W} / 135 \text{ W} \\ \text{Número de viviendas} &= 1.481 \end{aligned}$$

Cabe resaltar, que existen diferentes plantas de generación de energía eléctrica las cuales utilizan como combustible el biogás, se clasifican en tres tecnologías: *planta térmica con motores de combustión interna (MCI)*, la cual se fabrica en potencias de hasta 20 MW y alcanzan rendimiento entre un 70 y 80 %; la *planta térmica de ciclo combinado*, la cual se basa en dos ciclos, uno de turbina de vapor y otro de turbina de gas con un rendimiento entre 25 y 35%. Por último, la *planta térmica con microturbinas de gas*, la cual quema metano de un bajo grado de procesamiento mezclado con aire a presión, estas microturbinas disponen de 350 kW que equivale a 0,35 MW (Cadena, Mora & Pérez, 2012).

Las plantas con capacidad efectiva menor a 10 MW no participan en el mercado mayorista de electricidad, pero su energía puede ser vendida a comercializadoras directamente para uso en el mercado regulado, siempre que no haya vinculación económica entre comprador y vendedor según lo establecido en la resolución 39 de 2001.

10.3.2 Estrategia de manejo ambiental 2

Tabla 35. Segunda estrategia de manejo ambiental

ESTRATEGIA DE MANEJO AMBIENTAL 2				
ALTERNATIVA	RECUPERACIÓN DEL BIOGÁS			
OBJETIVO	Establecer el uso que se le dará al biogás producido en el relleno			
FASE DE APLICACIÓN	Construcción y operación del relleno		Cierre del relleno	
TIPO DE MEDIDA	Prevención	Mitigación	Compensación	Recuperación
IMPACTOS A CONTROLAR	<ul style="list-style-type: none"> • Controlar impactos al medio ambiente como la emisión de contaminantes atmosféricos • Mitigar impactos negativos a la sociedad • Mitigación de olores ofensivos • Control de vectores • Afectación al paisaje • Afectación ambiental 			
ACCIONES A DESARROLLAR	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculos para establecer la cantidad de biogás que es recuperado • Identificar una tecnología ambiental y económicamente viable para desarrollar la estrategia • Dar a conocer los usos de la tecnología propuesta 			
LUGAR DE APLICACIÓN (LOCALIZACIÓN)	Relleno sanitario El Carrasco			

Fuente: Autores, 2019

Los resultados obtenidos en el modelo colombiano de biogás arrojan la capacidad mínima con la que se debe trabajar que corresponde a un flujo de biogás de 97 m³/hr. Por tal motivo el objetivo principal de esta segunda estrategia es convertir el biogás el biometano con el fin de producir gas o alguna fuente de energía para su posterior venta.

Para convertir el biogás producido por el relleno sanitario “El Carrasco” a biometano, es mediante la filtración del biogás y reducción de gases no combustibles, transforma él mismo en biometano, este posee contenidos de metano (CH₄) en torno de 90%. Los microorganismos pueden ser utilizados para la purificación de biogás y remover las sustancias consideradas contaminantes, especialmente para la eliminación de sulfuro de hidrógeno (Souza & Schaeffer, 2013).

En el proceso de purificación del biogás y conversión de este para biometano se retira el dióxido de carbono hasta que el porcentaje de metano quede próxima a la del gas natural, para que pueda ser utilizado en los mismos usos finales. Para realizar esta fase existen diversos disolventes que pueden ser utilizados. Tratándose de solubilidad, el polietileno glicol (PEG)

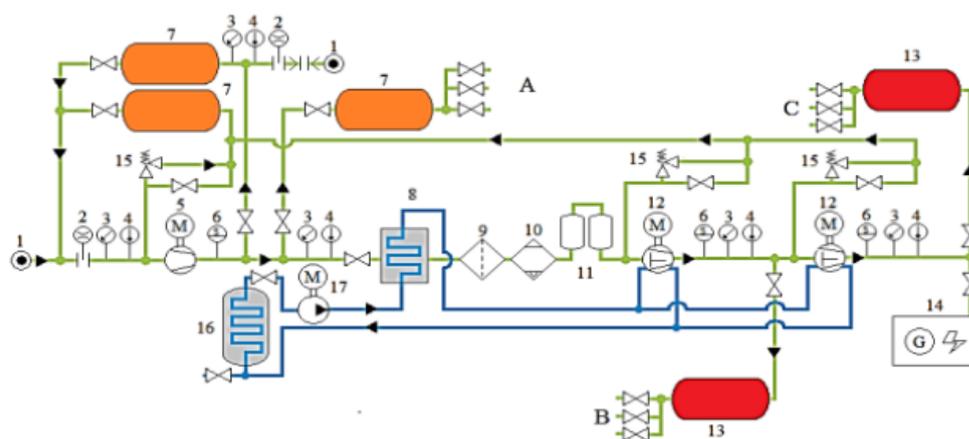
viene siendo utilizado debido a la alta solubilidad del dióxido de carbono y del sulfuro de hidrógeno (H_2S) (Souza & Schaeffer, 2013).

De lo contrario, la quema del biogás sin la filtración del sulfuro de hidrógeno puede causar serios daños al medio ambiente. En la quema del biogás sin remoción del sulfuro de hidrógeno ocurre la formación del dióxido de azufre (SO_2), causante de la lluvia ácida (Souza & Schaeffer, 2013).

El biogás entra en el sistema de compresión y una pequeña parte es utilizada en motores, bombas y generadores de la planta. Con la filtración, la composición del biogás se altera habiendo a partir de entonces una mayor concentración de metano. Enseguida, esta nueva composición, ahora denominada de biometano, pasa por el sistema de compresión lo que posibilita el llenado de los cilindros. También puede ser canalizado por ductos para puntos de almacenaje, o aún conducido a grandes distancias para abastecimiento de redes de gas natural. El biometano puede también ser almacenado en gasómetros mayores para transporte en camiones o trenes (Souza & Schaeffer, 2013).

En la figura que se muestra a continuación se describe el proceso de biogás o biometano.

Figura 23. Diagrama de la planta de compresión y tratamiento del biogás



Fuente: Souza, Schaeffer (2013)

Teniendo en cuenta la figura anterior, los números significan lo siguiente:

1. Entrada de biogás en la planta
2. Medidor de flujo
3. Manómetro
4. Termómetro
5. Compresor de biogás
6. Sensor de presión
7. Reserva de biogás
8. Refrigerador
9. Filtro de H_2S
10. Secador
11. Filtro de CO_2
12. Compresor de biometano
13. Reserva de biometano

14. Equipo generador a biometano
15. Válvula de alivio
16. Refrigeración del agua a biogás
17. Bomba de agua a biogás.
18. Salida de biogás a baja presión (4-10 bar)
19. Salida de biometano a media presión (10-40 bar)
20. Salida de biometano a media y alta presión (10-90 bar).

10.3.3 Evaluación de la estrategia

Como se explicó anteriormente en la metodología, la evaluación de la estrategia se realiza mediante la aplicación de una matriz DOFA buscando identificar su eficiencia en caso de implementarse la estrategia.

	FORTALEZAS	DEBILIDADES
INTERNO	<ul style="list-style-type: none"> • El relleno cuenta con un alto porcentaje de materia orgánica para generar biogás • La venta de energía genera ingresos para el relleno • Favorece las condiciones del medio ambiente al no arrojarse metano a la atmósfera, ayudando de esta manera a mitigar el cambio climático • Se mejoran las condiciones sanitarias • Se eliminan olores ofensivos que afectan a los operadores del relleno y a las poblaciones aledañas • Se logra eliminar una gran cantidad de vectores • Reducción de riesgo de fuego y explosión dentro del relleno. • Posibilidad de establecer negocios con la comunidad y otros productores. 	<ul style="list-style-type: none"> • El relleno no cuenta con una planta para la generación de energía eléctrica. • Altos costos de los insumos necesarios, especialmente para aplicar tecnologías que conviertan el biogás en biometano • Falta de conocimiento del mercado de recolección y suministro de energía. • Problemas en la importación de la energía con la Electrificadora de Santander • La generación de energía a partir de residuos orgánicos es ligeramente costosa, en comparación con la quema de los residuos.

Tabla 36. Matriz DOFA aplicada al proyecto

	OPORTUNIDADES	AMENAZAS
EXTERNO	<ul style="list-style-type: none"> Ahorro de energía para las poblaciones Reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera Este tipo de estrategias puede ser implementada en cualquier industria que produzca residuos orgánicos como ganadería, agricultura, forestal, industrial La energía puede ser suministrada a las viviendas aledañas al relleno La población afectada se beneficiará de este proyecto por la disminución de enfermedades y el suministro de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> El proyecto no se encuentra dentro de los lineamientos del mercado energético Legislación insuficiente Posibles emanaciones de gas metano al ambiente por pérdidas. Indisposición de la institución para llevar a cabo el proyecto.

Fuente: Autores, 2019 basados en Humphrey, 2004

Matriz D.O.F.A. Cruzada con el proyecto	FORTALEZAS	DEBILIDADES
OPORTUNIDADES	<p>Estrategias F.O.</p> <ul style="list-style-type: none"> Fomentar el reciclaje desde los municipios en el cual se disminuya el porcentaje de plásticos en el relleno Atender a las comunidades afectadas por los olores ofensivos Incursionar en el mercado verde. 	<p>Estrategias D.O.</p> <ul style="list-style-type: none"> Fomentar el uso de la energía que es producida en el relleno Promover la instalación y operación de una planta de electricidad con el biogás de un relleno sanitario Atender a la población que se ha visto afectada por enfermedades respiratorias.

Tabla 37. Matriz DOFA cruzada con el proyecto

AMENAZAS	<p>Estrategias F.A.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vender la energía para aumentar los ingresos al relleno sanitario • Aumentar la calidad de vida de las personas aledañas al relleno por disminución de vectores • Mejorar las operaciones y actividades técnicas dentro del relleno para así disminuir el riesgo de incendios y deslizamientos • Acercamiento por parte del relleno hacia la comunidad para crear canales de comunicación donde las dos partes sean beneficiadas con la generación de energía. 	<p>Estrategias D.A.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Incentivar conciencia dentro de la institución encargada del relleno para mitigar los impactos que ha tenido la operación del relleno el carrasco • Realizar una captación óptima de gas metano para garantizar la menor pérdida posible al ambiente • Buscar ayuda en entes gubernamentales para realizar proyectos de mercados verdes
-----------------	--	--

Fuente: Autores, 2019 basados en Humphrey, 2004

11. Análisis de resultados

11.1 Análisis objetivo 1 “Establecer las variables que determinan el cálculo del biogás, a través de un diagnóstico ambiental del relleno sanitario”.

De acuerdo con los resultados se puede analizar que el relleno sanitario El Carrasco ha estado sobrellevando las diferentes problemáticas técnicas que se han presentado a lo largo de la vida útil. En la actualidad el relleno está disponiendo sus residuos en la zona de contingencia, la cual hace parte de la celda 1 y contigua a la zona ZEM (zona de extracción de material).

La producción de residuos sólidos para el municipio de Bucaramanga demuestra una disminución desde la implementación del relleno sanitario hasta el año 2011, condición que no se muestra de este periodo en adelante cuando se evidencia una producción que duplica las cifras antecedentes, dado no sólo por el incremento poblacional sino también por el consumismo y la exigua práctica de reutilización, reuso y reciclaje. Así mismo, la PPC para el municipio disminuyó, debido que su producción también sufrió este efecto. En contraparte para los años siguientes la PPC aumentó notablemente pasando en el 2011 de 0,48 a 1,74 en el 2017.

Aunado a esto, la producción de residuos de diferentes municipios que disponen en El Carrasco presenta una relación directa entre la población y la PPC, ya que si una aumenta por consecuencia la otra también, evidenciado principalmente en las ciudades. En contraparte los municipios que se encuentran alejados del casco urbano se denotan una conducta de decrecimiento pues los habitantes migran hacia las grandes ciudades.

Por consiguiente, durante la investigación se pudo evidenciar que algunas prácticas como la cobertura de los residuos no cumple con una frecuencia diaria y esto sumado a condiciones meteorológicas (vientos y lluvias) tienen como consecuencia deslizamientos y producción de lixiviados. Teniendo en cuenta lo anterior, la producción de lixiviados es de gran preocupación para el relleno dado que existe un represamiento de estos por la poca eficiencia de los sistemas de subdrenaje y recolección, generando problemas graves de inestabilidad, lo cual de no ser tratado con la debida importancia podría ocasionar una catástrofe ambiental.

Para tal efecto, el vertimiento generado de la PTLX cumple satisfactoriamente con la norma de vertimientos Resolución 0631 de 2015, al obtenerse un efluente de buena calidad en términos fisicoquímicos, por cuanto los parámetros evaluados se encuentran por debajo de los valores máximos permisibles en ella establecidos.

Según el registro diario del caudal afluente de la PTLX para determinar el lixiviado generado por el relleno sanitario el Carrasco, el caudal de operación de la planta en febrero de 2019 osciló en un rango de 2,44 a 2,7 L/s, siendo el caudal promedio aproximadamente 2,517 l/s. Teniendo en cuenta estos valores, el volumen total de lixiviado tratado en este periodo en la planta fue de aproximadamente 6.666 m³, lo cual en términos de caudal representa un alto contenido de lixiviados (EMAB, 2019).

Por otra parte, los gases emanados del relleno presentan valores entre 6.374 y 5.644 dscf por hora, además, para el ducto 1 y 2 de la celda 1 los valores oscilan alrededor de 5.800 dscf/h, mientras que para los ductos 4, 6 de la celda 1 y el ducto 3 de la celda 2 oscilan entre 6.000 dscf/h y 6.200 dscf/h a diferencia del ducto 11 de la celda 2 que representa el más alto con un valor de

aproximadamente de 6.400 dscf/h, mientras que los ductos 11 y 13 de la celda 4 registran los valores más bajos, siendo el ducto 13 el valor más bajo con un valor de 5,600 dscf/h. En promedio la celda que presenta el menor caudal es la celda número 4, mientras que los caudales más altos, se presentaron en la celda 2.

De las evidencias anteriores, existe poca o ninguna información sobre las concentraciones máximas permisibles en cuanto al caudal del biogás, además para mantener riesgos aceptables en las personas y demás expuestos a este.

Ahora bien, los resultados del estudio de caracterización realizado en el 2016 que se encuentra en el PGIRS y los resultados que se encuentran en el estudio realizado por la EMAB para el año 2017, se denota que los residuos orgánicos (comida, poda, jardinería), han aumentado en un 4,3%.

Se puede evidenciar que los residuos de plástico han incrementado con respecto a los datos registrados en el PGIRS en un 13% aproximadamente, los residuos de papel y cartón han incrementado en un 7% con respecto al PGIRS, a diferencia del vidrio que para el año 2017 disminuye en un 0,5 % y lo mismo ocurre en el caso de los textiles que disminuye 1,7 % con respecto a los datos registrados en el 2016 por el PGIRS. En cuanto a la madera también se evidencia una reducción del 5% teniendo en cuenta que en esta categoría se encuentra residuos de madera, caucho, cuero, entre otros y para el caso de residuos de metales el porcentaje no presenta variación.

Con base en esta información, se puede evidenciar que el principal residuo que se dispone en el relleno sanitario son orgánicos dado a que Colombia es un país en vía de desarrollo siendo ésta una característica propia, lo cual hace que la producción de biogás aumente debido a su degradación, seguido por los residuos de plástico puesto que este país tiende al consumo excesivo de productos que contienen este residuo, sumado a que Colombia no asume la importancia del reciclaje.

Vinculado al concepto de las condiciones meteorológicas, la rosa de vientos en el área de influencia del relleno marca generalmente una tendencia de sur-occidente a sur-oriente, es decir, los olores más fuertes se perciben hacia Floridablanca, barrios El Porvenir, Dangond, Tejares y Manuela Beltrán, siendo los más afectados por la operación del relleno sanitario, reduciendo su calidad de vida pues, con la producción de estos olores ofensivos se producen enfermedades respiratorias especialmente en niños, además, las poblaciones más afectadas son aquellas de bajos recursos que se encuentran en estado de vulnerabilidad.

11.2 Análisis objetivo 2 “Estimar la generación y recuperación del gas metano en el relleno sanitario mediante la herramienta automatizada “Modelo colombiano de biogás”.

Con base a los resultados obtenidos por el modelo la eficiencia de captura para el relleno sanitario El Carrasco es del 52%, estando dentro de los lineamientos establecidos por la EPA, la cual establece eficiencias de captura del 50% con un muy buen sistema instalado.

De acuerdo con la tabla de resultados arrojados por el modelo colombiano de biogás, se puede mostrar que la *generación de biogás* desciende a medida que no hay más disposición de residuos pasando de 555 m³/hr en el año 2019 a 186 m³/hr en el 2030.

La recuperación de biogás es la fracción de la generación de biogás que puede ser atrapada por el sistema de captura y que puede ser recuperado para combustión o uso benéfico utilizando la capacidad de la planta de electricidad. Así mismo, en el año 2020 alcanza la mayor cantidad de biogás de 551 m³/hr que significa una capacidad máxima de la planta de electricidad de 0,9 MW y al 2030 se demuestra una disminución en un 78 %, tomando la capacidad máximo (0,9 MW) como el 100%.

De acuerdo a lo anterior, para el año 2020, se estima reducir una cantidad de 1.727 toneladas de CH₄/año y 36.257 de CO₂eq/año, lo cual ayudaría a la meta establecida dentro de la Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC) de reducción del 20% de los GEI al año 2030.

La gráfica obedece a la fase del comportamiento de la composición en un relleno, en la medida en que se descompone la materia orgánica, igual el metano deja de producirse llegando al 2030 a 186 m³/hr. Esto verifica que teoría se cumple en la práctica puesto que el comportamiento del biogás en un relleno sanitario va disminuyendo con el tiempo y luego en la fase de cierre se mantiene constante por un determinado tiempo hasta que el relleno cumple su vida útil y deja de emanar gases y lixiviados.

Igualmente, al prolongar los años en la gráfica hasta el 2077 que es el año máximo mostrado por el modelo, se evidencia que tanto la generación como la recuperación de biogás se mantiene constante con una generación de 7 m³/hr, lo cual no se podría recuperar en energía.

11.3 Análisis objetivo 3 “Establecer los lineamientos que permitan medir el funcionamiento de la estrategia de manejo ambiental sobre el biogás”.

De acuerdo a la estrategia 1, el relleno sanitario genera un biogás que puede ir hasta el año 2030, es decir 10 años en que el relleno puede ofrecer energía a los barrios aledaños como lo son El Porvenir, Dangond, Tejares y Manuela Beltrán, lo anterior significa que con una capacidad de 0,9 MW se podría iluminar 6.667 viviendas hasta 1.481 viviendas con una capacidad de 0,2 MW.

Dado lo anterior, se establece que la población que no cuenta con energía eléctrica es alrededor de 6.608 habitantes, encontrándose en estado de vulnerabilidad; por tanto se apunta a este tipo de estrategias con el fin de mejorar la calidad de vida.

Para la estrategia dos se hacen indispensable la compra de una tecnología que convierte el biogás producido por el relleno a biometano con la capacidad de producir energía o utilizarse como gas, con el fin de conseguir un impacto positivo en las poblaciones aledañas, tomando como base el año en el que se evidencia mayor producción de biometano (2020), puesto que tiene el valor mayor de generación de biogás y su recuperación.

Dentro del funcionamiento de las estrategias, se analiza que la estrategia 1 puede ser implementada en los barrios aledaños al relleno sanitario lo cual beneficiaría a esta población, en cuanto al ahorro de energía y la disminución de enfermedades por la captura del biogás. Teniendo en cuenta, el mercado de electricidad y la disposición por parte de la EMAB de hacer parte del proyecto.

12. Conclusiones

Es pos concluir en primer lugar, que el objetivo general se cumplió a cabalidad al presentar las estrategias de manejo ambiental, con base en los resultados obtenidos en los objetivos específicos, con el fin de mitigar los impactos planteados en el trabajo de investigación.

De acuerdo con el diagnóstico ambiental realizado, es posible afirmar que el relleno no ha avanzado con el paso de los años en términos ambientales, en el que se destaca su enfoque en la contribución a la producción de GEI. Sin embargo, el relleno ha dejado de lado aspectos relevantes que han limitado su crecimiento, al no dedicar mayores esfuerzos en evaluar alternativas viables que impliquen un mejoramiento ambiental, el cual es un aspecto fundamental para tener en cuenta por el amplio marco normativo colombiano y lo que podría suponer su incumplimiento.

Con base en lo anterior, se afirma que gracias al uso de herramientas elaboradas por la EPA (LandGEM, modelo colombiano de biogás), pueden presentar estimaciones de las cantidades de biogás que se recuperan a partir de la producción de energía, siendo el modelo un aporte metodológico con la determinación de actividades específicas en un tiempo estimado, obteniendo resultados periódicos para establecer oportunidades de mejora.

Por último, ha sido posible la identificación de 2 estrategias enfocadas al cumplimiento de los objetivos propuestos con el fin de mitigar el impacto socioambiental que ha tenido la producción de biogás a lo largo de los años, en relación con la población vulnerable.

13. Recomendaciones

- ✓ Realizar estudios más profundos para poder establecer la viabilidad de la estrategia 2, teniendo en cuenta el costo de dicha tecnología y si es necesario la separación del biogás para darle un mayor aprovechamiento.
- ✓ El municipio en la estrategia 1 deberá tener en cuenta recursos que involucre la adquisición de maquinaria y equipo de captura y conversión del biogás en energía.
- ✓ Para efecto del uso del modelo, se debe tener en cuenta información primaria de la disposición histórica de los residuos para dar mayor precisión al modelo.
- ✓ La metodología aplicada en el presente trabajo puede ser replicada para la formulación de estrategias de manejo ambiental en otros sectores como ganadería, forestal e industrial, interesados en producir energía a partir del biogás.
- ✓ Se recomienda tomar en consideración la creación de convenios estratégicos con empresas de energía para profundizar en la temática y aumentar los ingresos del proyecto.

14. Referencias bibliográficas

- Agencia de Protección Ambiental (EPA). (1996). *Turning a Liability into an asset: A Landfill Gas-to-energy Project Development Handbook*. USA Environmental Protection Agency-EPA.
- Aguilar, Q., Taboada, P., & Ojeda, S. (2011). Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás. *Ingeniería*, 15(1), 37-45.
- Agencia de Protección Ambiental (EPA). (2009). *Manual del usuario Modelo Colombiano de Biogás*. Obtenido de <https://globalmethane.org/documents/models/pdfs/ManualdeUsuarioModeloColombiano.pdf>
- Alcaldía Municipal de California. (2016). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos-PGIRS-California-Santander*. Obtenido de https://californiasantander.micolombiadigital.gov.co/sites/californiasantander/content/files/00042/2092_pgirscalifornia2016actualizacinmontarapagina.pdf
- Alcaldía Municipal de Betulia. (2017). *Ajuste y Actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Municipio de Betulia Santander*. Obtenido de PGIRS 2017-2027: http://betuliasantander.micolombiadigital.gov.co/sites/betuliasantander/content/files/000045/2226_pgirs-betulia.pdf
- Alcaldía Municipal de Charta. (2012). *Plan de Desarrollo Municipal "Credibilidad y Compromiso" 2012-2015*. Obtenido de <http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/chartasantanderpd20122015.pdf>
- Alcaldía de Matanza. (2016). *Plan de Desarrollo Municipal "Alianza para el progreso social"*. Obtenido de https://matanzasantander.micolombiadigital.gov.co/sites/matanzasantander/content/files/000083/4149_plandedesarrollomatanza20162019.pdf
- Alcaldía Municipal de Lebrija. (Julio de 2016). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Municipio de Lebrija*. Obtenido de <http://www.lebrija-santander.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionyControl/Actualizaci%C3%B3n%20Plan%20de%20Gesti%C3%B3n%20Integral%20de%20Residuos%20S%C3%B3lidos.pdf>
- Alcaldía Municipal de Suratá. (2012). *Suratá globalizado con equidad y sostenibilidad. Plan de desarrollo del municipio de Suratá 2012-2015*. Obtenido de <http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/surat%C3%A1santanderpd2012015.pdf>
- Alcaldía Municipal de Tona. (2016). *Actualización del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) Municipio de Tona Santander*. Obtenido de http://tonasantander.micolombiadigital.gov.co/sites/tonasantander/content/files/000066/3263_tonalpgirs.pdf
- Alcaldía de Bucaramanga. (2016). *Plan de gestión integral de residuos sólidos PGIRS 2016-2027*. Obtenido de <http://www.bucaramanga.gov.co/la->

ruta/download/plan_integral_de_residuos_solidos/PLAN_DE_GeSTION_INTEGRAL_DE_RESIDUOS_SOLIDOS_BUCARAMANGA_2016-2027_2.pdf.

Andrade, A., Restrepo, A., & Tibaquirá, J. (2018). Estimación de biogás de relleno sanitarios, caso de estudio: Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 12(23).

Aronica, S., Bonanno, A., Piazza, V., Pignato, L., & Trapani, S. (2009). Estimation of biogas produced by the landfill of Palermo, applying a Gaussian model. *Waste Management*, 29(1), 233-239.

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2017). Auto N° 03734 de 2017. Obtenido de http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/auto_3734_28082017_ct_2283.pdf

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2018). Resolución N° 00297 de 2018. Obtenido de http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/res_0297_02032018_ct_2501.pdf

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2019). Resolución 153 de 2019.

Beaufort, F. (2008). Escala de viento Beaufort. Obtenido de <https://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/beaufort.html>

Borda, C. (2016). Biogás: una alternativa energética para los rellenos sanitarios urbanos y un beneficio mitigador de cambio climático. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/15271/BordaPerezCarlosGeovanny2016.pdf?sequence=1>

Camargo, Y., & Vélez, A. (2009). Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. Obtenido de *In II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Colombia.

Cadena, J., Mora, J., & Pérez, S. (2012). Análisis de viabilidad financiera de una central de generación de energía eléctrica a partir del biogás de vertedero. *Scientia et Technica*, 2(51), 1-7.

Carmona, E., & Magán, A. (2008). La estrategia ambiental: definición y tipologías. *Universidad, sociedad y mercados globales*, 541-554.

Carrascal, K., & Carrascal, S. (2012). Sitio de disposición final de residuos sólidos el Carrasco y la afectación a derechos fundamentales y colectivos. Obtenido de https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2086/digital_24593.pdf?sequence=1

Centro de Estudios en Planificación, Políticas Públicas e Investigación Ambiental (CEPPIA). (Enero de 2004). Manual "Introducción a la Gestión Ambiental Municipal". Obtenido de: <http://www.ceppia.com.co/Herramientas/PLANIFICACION-Y-GESTION%20AMBIENTAL/Manual-de-Introduccion-a-la-Gestion-Ambiental-Municipal.pdf>

Concejo Municipal de Bucaramanga. (2012). Respuesta proposición N° 43 de fecha 03-07-2013. Radicado 2042. Obtenido de http://www.concejodebucaramanga.gov.co/descargas/RESPUESTAS_2_PROPOSICION0000000000043_%202013.pdf

- Contreras, L. (2012). Evaluación ambiental ex-post del sitio de disposición final de residuos sólidos El Carrasco en el municipio de Bucaramanga-Santander. Obtenido de <http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/bitstream/123456789/753/1/27886.pdf>
- Collazos, H. (1988). Residuos sólidos. Bogotá: FUNPIRS.
- Colmenares, W., & Santos, K. (2007). Generación y manejo de gases en sitios de disposición final. Obtenido de <http://www.ingenieriaquimica.org/system/files/relleno-sanitario.pdf>.
- Corena, M. d. (2008). Sistemas de tratamiento para lixiviados generados en rellenos sanitarios. Obtenido de Universidad de Sucre. Departamento de ingeniería civil: <https://repositorio.unisucre.edu.co/bitstream/001/304/2/628.44564C797.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2005). Proyecciones de población municipales por área. Obtenido de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- Díaz, L., Buenrostro, O., Mañón, M., & Hernández, M. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero en dos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 18(2), 149-159.
- Echeverri, C. (2006). Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero en el municipio de Montería (Córdoba, Colombia). Obtenido de <file:///D:/Usuario/Downloads/236-Texto%20del%20art%C3%ADculo-887-1-10-20110823.pdf>
- Empresa de Aseo de Bucaramanga (EMAB). (2018). Informe de Actividades No.36. Bucaramanga: Disposición final consorcio.
- Empresa de Aseo de Bucaramanga (EMAB). (2019). Informe N°. 37 de operación y mantenimiento de la PTLX. Bucaramanga.
- Flórez, J. (2018). Monitoreo de biogás –sitio de disposición final “El Carrasco” en la ciudad de Bucaramanga –Santander- octubre de 2018.
- Franco, L., Meza, M., & Almeida, J. (2018). Situación de la disposición final de residuos sólidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga: caso relleno sanitario El Carrasco (revisión). *Avances: Investigación en ingeniería*, 15(1), 180-193.
- Gómez, R., & Filigrana, P. (2008). Descripción de la calidad del aire en el área de influencia del Botadero de Navarro, Cali, Colombia. *Colombia Médica*, 39(3), 245-252.
- González, J. (2014). Alternativas de captación y tratamiento del biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba, Argentina (Bachelor's thesis, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Obtenido de: <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/1635/Alternativas%20de%20captaci%C3%B3n%20y%20tratamiento%20del%20biogas%20en%20el%20vertedero%20de%20Piedras%20Blancas.pdf?sequence=1>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). Metodología de la investigación (Vol. 3). México, McGraw-Hill.

- Humphrey, A., & Lie, B. (2004). Análisis de matriz DOFA.
- IDEAM; PNUD; MADS; DNP; CANCELACIÓN. (2017). Resumen ejecutivo Tercera Comunicación Nacional De Colombia a La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. . Obtenido de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023732/RESUMEN_EJECUTIVO_T_CNCC_COLOMBIA.pdf
- Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Colombia: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (ops/cepis). Obtenido de: <http://redrrss.minam.gob.pe/material/20090128200240.pdf>
- K2 INGENIERIA S.A.S. (2018). Monitoreo de sulfuro de hidrógeno (H₂S) y amoníaco (NH₃) en el área de influencia del sitio de disposición final el carrasco ubicado en el municipio de bucaramanga, departamento de santander para la Empresa de Aseo de Bucaramanga S.A E.S.P. Bucaramanga.
- Libera, B. (2007). Impacto, impacto social y evaluación del impacto. *Acimed*, 15(3), 0-0.
- López, I., & García, R. (2006). Valoración económica de la contaminación por olores en el área de influencia del relleno sanitario El Carrasco: una aplicación de la metodología de precios hedónicos. Obtenido de <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2006/121827.pdf>
- López, D. (2016). Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/138545/Modelo-para-el-diseno-de-sistemas-de-captacion-y-aprovechamiento-de-biogas-producido.pdf?sequence=1>
- Ministerio de Vivienda Colombia. (2003). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). Obtenido de Definición del nivel de complejidad y evaluación de la población, la dotación y la demanda de agua: <http://www.minvivienda.gov.co/GuiasRAS/RAS%20-%200002.pdf>.
- Niño, L., Ramón, J., & Ramón, J. (2016). Contaminación fisicoquímica de acuíferos por los lixiviados generados del relleno sanitario El Carrasco, de Bucaramanga. *Producción+ Limpia*, 11(1), 66-74.
- Obando, T. (2009). Breves anotaciones conceptuales sobre el ambiente, su tipología y métodos de estudio. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/conceptos-ambiente-tipologia/conceptos-ambiente-tipologia.pdf>
- Ordoñez, M. (2011). Evaluación de la generación de biogás en relleno sanitarios en Colombia en el marco del Protocolo de Kyoto. (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Química Industrial). Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/71396529.pdf>
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (1990-1992). Preface to the IPCC Overview. Obtenido de: https://www.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC_1990_and_1992_Assessments/English/ipcc_90_92_assessments_far_overview.pdf
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). (1996). Revised IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Workbook, 6, 1-22. Obtenido de <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch6ref1.pdf>

- Pinzón, L. (s.f.). Influencia de los rellenos sanitarios en el cambio climático. Obtenido de http://www.umng.edu.co/documents/10162/745277/V2N1_8.pdf
- Quispe, A., Núñez, M., & Sánchez, W. (2018). Propuesta de mejora del Plan Integral de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos de la Provincia de San Miguel - Cajamarca. Obtenido de <http://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/13433/Quispe%20Yeckle%20Alberto%20Rub%20C3%A9n%20-%20N%20C3%BA%20C3%B1ez%20V%20C3%A1squez%20Manuel%20-%20S%20C3%A1nchez%20Balc%20C3%A1zar%20Wilmer.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sánchez, J. (2016). Evaluación del uso de biogás en rellenos sanitarios. Obtenido de El caso de Mallasa. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, 9(27), 26.
- Secretaría de Salud de Santander. (2014). Análisis de situación de salud con el modelo de los determinantes sociales de salud. Ministerio de Salud. Obtenido de http://web.observatorio.co/publicaciones/Bucaramanga_dg.pdf.
- Singep . (2017). Anexo 1. Caracterización de residuos sólidos urbanos relleno sanitario El Carrasco Bucaramanga. Recuperado de información suministrada por la Empresa de Aseo de Bucaramanga.
- Souza, J., & Shaeffer, L. (2013). Sistema de compresión de biogás y biometano. *Información tecnológica*, 24(6), 03-08.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2015). Informe Nacional - Disposición final de residuos sólidos. Obtenido de <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Oct/informedisposicionfinalano2015-sspd1.pdf>
- Torrado, L., & Rondón, J. (s.f). Diseño de vertederos y relleno sanitarios. Obtenido de <https://ingeassas.com/diapositivas/RELLENOS-SANITARIOS-CASO-CARRASCO.pdf>
- Vera, I., Estrada, M., Martínez, J., & Ortiz, A. (2015). Potential of Power Generation from Biogas. Part II: Municipal Solid Waste. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(3), 471-478.

Estrategia de manejo ambiental sobre el biogás en la fase de cierre del relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga (Santander).

*Valeria Gutiérrez Rincón
Elissa Marcela Verjel Quintero*