

**Definición de un plan para el aprovechamiento y valorización del biogás que genera el
relleno sanitario de la ciudad de Villavicencio, en el marco de la economía circular**

Ludy Tatiana Piraban Gutiérrez

Melvin Felipe Tabaco Vivas

Asesor

Juan Alejandro Chica García

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería

ECBTI

Maestría en Gerencia de Proyectos

2025

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo de grado a nuestras familias, por su amor incondicional, apoyo constante y sacrificios que hicieron para que pudiéramos llegar hasta aquí. A nuestros amigos, por su ánimo y complicidad en cada etapa de este camino. A nuestros profesores, por su guía, conocimiento y paciencia. A todas las personas que de alguna manera contribuyeron a nuestra formación académica, profesional y personal, este logro también es de ustedes. ¡Gracias!

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la culminación de la maestría en Gerencia de Proyectos. En primer lugar, agradecemos a nuestras familias por su inquebrantable apoyo, comprensión y motivación durante este exigente, pero gratificante proceso. A nuestros profesores y tutores, por compartir su conocimiento, experiencia y orientación, contribuyendo significativamente a nuestro crecimiento académico y profesional. A nuestros compañeros del programa de Maestría, por el intercambio de ideas, colaboración y amistad que enriquecieron esta etapa de aprendizaje. A todas las personas que de alguna manera brindaron su ayuda y aliento, nuestro más profundo agradecimiento. ¡Este logro es también de ustedes!

Resumen

Las problemáticas ambientales, se pueden solucionar o mitigar buscando en el problema una oportunidad que siempre sea sostenible, como en el caso de la presencia del biogás que se genera por la operación del relleno sanitario regional ubicado en el área rural del municipio de Villavicencio - Meta, donde evidentemente, existe un impacto ambiental y social, por la generación de este subproducto, como lo es el biogás; por lo tanto se pretende estudiar alternativas de aprovechamiento, tratamiento y valorización debidamente validadas en campo, mediante implementación a escala piloto, enmarcados en la siguiente temática:

Inicialmente, se pretende realizar una revisión del estado actual de las instalaciones del relleno sanitario, con el fin de determinar sus condiciones técnicas, especialmente en el sistema de ductos de desgasificación de gases, con el fin de generar un informe técnico que permita dimensionar el contexto de la operación del sitio de disposición final de residuos sólidos ordinarios.

Posteriormente se gestionará la realización de un estudio de caracterización (cromatografía) del gas que se está produciendo, con el fin de conocer su caracterización y estudiar su potencial de tratamiento, aprovechamiento y uso en marco de la economía circular l.

Igualmente, se determinan los caudales actuales y futuros de gases, mediante la aplicación de métodos estandarizados de cálculo teórico de volúmenes de biogás, con el fin de obtener datos confiables para la toma oportuna de decisiones.

Así mismo, se realiza la revisión del estado de arte de las tecnologías de tratamiento, aprovechamiento y uso de gases empleadas en el mundo, se realiza una selección de alternativas con el propósito de llevar a cabo su implementación a escala piloto.

Se lleva a cabo la implementación a escala piloto del proceso de captación, conducción, tratamiento, limpieza y aprovechamiento del biogás enfocado en la economía circular. Como resultado final, se hace una presentación de la implementación a nivel teórico de la alternativa con mejor desempeño, con el fin de determinar la factibilidad y viabilidad de implementación del sistema de aprovechamiento de biogás en el relleno sanitario.

Palabras clave: Biogás, Tratamiento, Economía circular.

Abstract

The environmental issues can be solved or mitigated by seeking in the problem an opportunity that is always sustainable, as in the case of the presence of biogas generated by the operation of the regional landfill located in the rural area of the municipality of Villavicencio - Meta, where evidently, there is an environmental and social impact due to the generation of this by-product, such as biogas; therefore, the intention is to study alternatives for its use, treatment, and valorization duly validated in the field, through implementation on a pilot scale, framed in the following thematic context:

Initially, the aim is to carry out a review of the current state of the landfill facilities, in order to determine their technical conditions, especially in the gas degassing duct system, with the purpose of generating a technical report that allows to assess the context of the operation of the site for the final disposal of ordinary solid waste.

Subsequently, the characterization study (chromatography) of the gas being produced will be managed to understand its composition and assess its potential for treatment, utilization, and application within the framework of the circular economy.

Additionally, the current and future gas flow rates will be determined by applying standardized methods for the theoretical calculation of biogas volumes, aiming to obtain reliable data for timely decision-making.

Furthermore, a review of state-of-the-art gas treatment, utilization, and application technologies used worldwide is conducted, followed by the selection of alternatives for pilot-scale implementation.

The pilot-scale implementation of the biogas collection, conveyance, treatment, purification, and utilization process is carried out with a focus on the circular economy.

As an outcome, a theoretical implementation presentation of the alternative with the best performance is conducted to determine the feasibility and viability of implementing the biogas utilization system in the landfill.

Keywords: Biogas, Treatment, Circular Economy.

Tabla de Contenido

Introducción	14
Planteamiento del Problema o Fundamentación.....	16
Definición del Problema	16
Justificación	17
Objetivos	18
Objetivo General.....	18
Objetivos Específicos.....	18
Estado del Arte	19
Métodos de estimación de la generación de biogás en rellenos sanitarios.....	24
Marco Referencial.....	26
Marco Teórico.....	26
Marco Conceptual.....	27
Marco Histórico	29
Marco Legal.....	32
Metodología.....	37
Etapa 1	37
Observación Directa en Campo	37
Instrumento	37
Etapa 2.....	37
Estudio de Caracterización de Gases	37
Instrumento	37
Etapa 3	38
Cuantificación de Volúmenes	38
Instrumento	38
Etapa 4	38

	9
Revisión del Estado de Arte.....	38
Instrumento	38
Etapa 5	38
Selección de Técnicas	38
Instrumento	39
Etapa 6	39
Implementación de Técnicas.....	39
Instrumento	39
Etapa 7	39
Implementación Teórica	39
Instrumento	39
Análisis de Resultados: Visita de Campo al Relleno Sanitario de la Ciudad de Villavicencio - Meta	40
Histórico de Toneladas Dispuestas - PER	42
Reporte de Toneladas Dispuestas Año 2024	44
Reporte de Toneladas Dispuestas de la Ciudad de Villavicencio.....	46
Ductos de Desgasificación	48
Cierre de Zonas de Disposición Final.....	51
Cobertura de Residuos Dispuestos	52
Estudio Geofísico.....	54
Monitoreo Geotécnico con Topografía.....	56
Monitoreo de la Vida Útil Remanente.....	56
Análisis de Resultados: Estudio de Caracterización de Gases del Relleno Sanitario de Villavicencio	58
Análisis de Resultados: Cuantificación de Volúmenes y Producción de Gases del Relleno Sanitario de Villavicencio.....	60

Biodegradabilidad de los Residuos Sólidos.....	62
Análisis de Resultados: Evaluación de Tecnologías para el Tratamiento, Aprovechamiento y Valorización del Biogás del Relleno Sanitario de Villavicencio	70
Análisis de Resultados: Selección de Técnicas para llevar a cabo el Tratamiento, Aprovechamiento y Valorización del Biogás del Relleno Sanitario de Villavicencio.....	72
Análisis de Resultados: de Factibilidad y Viabilidad para el Tratamiento, Aprovechamiento y Valorización del Biogás del Relleno Sanitario de Villavicencio	74
Descripción General de funcionamiento de la planta purificadora de biogás a biometano ..	80
Dimensionamiento Básico de las Condiciones de Oferta del Relleno Sanitario y la Planta de Biogás	83
Conclusiones	85
Recomendaciones y Comentarios.....	86
Referencias Bibliográficas	87

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Relación Disposición Final - PER</i>	43
Tabla 2 <i>Comparativo total Residuos Dispuestos en el PER</i>	45
Tabla 3 <i>Comparativo Residuos Dispuestos de Villavicencio</i>	46
Tabla 4 <i>Caracterización Física de los Residuos del Relleno Sanitario de Villavicencio</i>	61
Tabla 5 <i>Producción de Biogás del Relleno Sanitario de Villavicencio (m³/año)</i>	66

Lista de Figuras

Figura 1 Informe de Disposición Final De Residuos Sólidos	20
Figura 2 Composición Porcentual del Tipo de Materiales que Conforman los Residuos Sólidos.....	22
Figura 3 Visita de Campo al Relleno Sanitario se la Ciudad ae Villavicencio.....	40
Figura 4 Relleno Sanitario Parque Ecológico Reciclante - PER.....	42
Figura 5 Residuos Dispuestos en el PER.....	44
Figura 6 Disposición de Residuos	46
Figura 7 Patio de Descargue	47
Figura 8 Sistema de Evacuación de Gases	48
Figura 9 Ductos Desgasificación.....	49
Figura 10 Ductos Desgasificación.....	50
Figura 11 Zona 1 Clausurada.....	52
Figura 12 Cobertura de los residuos dispuestos	53
Figura 13 Cobertura de los Residuos Dispuestos	54
Figura 14 Monitoreo Geofísico.....	55
Figura 15 Primer estudio de Caracterización del Biogás.....	58
Figura 16 Segundo Estudio de Caracterización del Biogás.....	59
Figura 17 Plano del Relleno Sanitario De Villavicencio	60
Figura 18 Producción de Biogás Zona l.....	63
Figura 19 Producción de Biogás Zona ll.....	64
Figura 20 Producción de Biogás Zona lll.....	64
Figura 21 Producción de Biogás Zona IV	65
Figura 22 Producción de Biogás Zona V	65

Figura 23 <i>Producción de Biogás Zona VI</i>	66
Figura 24 <i>Calculo Producción de Biogás - Relleno Sanitario</i>	68
Figura 25 <i>Sistema de Evacuación de Gases</i>	74
Figura 26 <i>Imagen - Áreas de Operación</i>	75
Figura 27 <i>Estación de Succión y Bombeo</i>	76
Figura 28 <i>Estaciones de Succión y Bombeo de Biogás</i>	77
Figura 29 <i>Planta purificadora de biogás a biometano</i>	78
Figura 30 <i>Planta purificadora de Biogás A Biometano</i>	79
Figura 31 <i>Planta purificadora de Biogás A Biometano</i>	80
Figura 32 <i>Planta purificadora de Biogás A Biometano</i>	83

Introducción

En Colombia, la disposición final de residuos sólidos ordinarios es un tema de gran importancia en el ámbito de la gestión ambiental, social y salud pública. De acuerdo al último informe nacional de disposición final generado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios SSPD (2023), cerca de 12 millones de toneladas anuales de residuos sólidos ordinarios van a procesos de disposición final; por lo tanto el 1,72% del total de los residuos dispuestos a nivel nacional, son recibidos en el Parque Ecológico Reciclante PER, brindando una solución ambiental y sanitaria a aproximadamente a un millón de habitantes, correspondientes a la ciudad de Villavicencio y 19 municipios adicionales.

En el país se cuenta con 66 rellenos sanitarios de carácter regional, donde se dispone más del 98% del total de los residuos sólidos no aprovechables generados, para el caso del Parque Ecológico Reciclante - PER, se encuentra dentro de los 13 rellenos sanitarios con mayor tasa de disposición y corresponde al sitio con mayor vida útil aprobada a nivel nacional; dada esta condición, se está garantizando a la región una adecuada gestión de los residuos a mediano y largo plazo.

De acuerdo con lo estipulado en el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 Colombia potencia mundial de la vida (Congreso de la república, 2023), el artículo 227 hace referencia al programa de basura cero, “Implementación de parques tecnológicos y ambientales, de tratamiento y valorización de residuos, promoción del desarrollo tecnológico, conservación del ambiente y mitigación del cambio climático, promoviendo soluciones que prioricen el tratamiento y aprovechamiento de residuos”.

Una de las iniciativas a nivel mundial, que permite analizar las necesidades globales del planeta y plantear metas concretas en la búsqueda de un equilibrio entre la interacción humana

con el uso adecuado de los recursos naturales principalmente, son los Objetivos de Desarrollo Sostenible – ODS (Naciones Unidas, s.f); por lo tanto las actividades operativas desarrolladas por Bioagropecuaria del Llano, juegan un papel muy importante, debido a que en el ámbito de la gestión integral de los residuos sólidos, se forma un eje transversal impactando el 70% de las dimensiones establecidas en los ODS.

Así mismo, existe un compromiso de país para desacelerar la emergencia climática, constituyendo la Estrategia Climática a Largo Plazo de Colombia E2050, que permitirá una transformación paulatina hacia la sostenibilidad, cimentando bases firmes en cuanto a la resiliencia social, económica y ambiental; donde uno de los pilares a los que le apuesta Bioagropecuaria del Llano es a la producción y consumo sostenible para una economía innovadora e incluyente y la economía circular.

Es importante resaltar que uno de los subproductos principales de la disposición final de residuos en el relleno sanitario, es el biogás que se genera producto de la degradación de la fracción orgánica de los residuos que se depositan en los respectivos vasos de los sitios destinados para acumular residuos sólidos. Es por esta razón que dentro del presente proyecto de investigación se evalúa la posibilidad de realizar un proceso de valorización mediante el aprovechamiento del biogás y de esta manera mitigar la emisión de gases de efecto invernadero.

Planteamiento del Problema o Fundamentación

Definición del Problema

La ausencia de estudios y datos concretos en la implementación de sistemas para transformación y aprovechamiento de biogás en los rellenos sanitarios ubicados en Colombia es un común denominador, debido principalmente a la carencia de estudios que determinen las alternativas viables técnica y financiera a ser implementadas, al igual que el desconocimiento generalizado con relación al tema del tratamiento y transformación sostenible de dicho gas, que es muy nocivo para el ambiente y sociedad.

Debido a lo anterior, el relleno sanitario de la ciudad de Villavicencio presenta una deficiencia en la gestión del biogás que se genera, donde actualmente no se está aprovechando, solo se realiza una quema controlada, generando un impacto pasivo ambiental, sin embargo se puede realizar el debido tratamiento y aprovechamiento del mismo en búsqueda de alternativas sostenibles en el equilibrio de la relación hombre – naturaleza y evitar de esta manera el impacto negativo que genera los gases de efecto invernadero, como es el caso del gas metano generado en el proceso de descomposición de la materia orgánica que contiene los residuos dispuestos en rellenos sanitarios.

Con base en lo expuesto, dentro del presente ejercicio se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Desde la maestría en gerencia de proyectos, se podrá permitir la sustentación del estudio de factibilidad y viabilidad de alternativas de tratamiento, aprovechamiento y valorización del biogás que genera el relleno sanitario de la Ciudad de Villavicencio, como aporte a la economía circular en la región?

Justificación

Actualmente, no se está realizando aprovechamiento del biogás producido por la disposición final de los residuos sólidos domiciliarios, mediante la técnica de relleno sanitario en la ciudad de Villavicencio – Meta, por lo tanto, se están generando emisiones de gases de efecto invernadero, por falta de una gestión adecuada de dichos gases. Principalmente el gas metano está generando a nivel mundial una problemática de deterioro ambiental, es por esta razón que se torna importante abordar y estudiar los focos donde se evidencian impactos negativos, con el propósito de evaluar y proponer soluciones alternativas de aprovechamiento de biogás viabilizadas de forma local y de esta manera generar un impacto positivo a nivel global.

Debido a lo anterior, se va a realizar un estudio de posibles alternativas de aprovechamiento y valorización del biogás que se produce en el relleno sanitario, con el fin de mostrar las mejoras que se podrán implementar a corto y mediano plazo en búsqueda de mejorar la calidad del ambiente, reducir los riesgos para la salud pública y buscar una oportunidad de negocio.

Con la implementación de alternativas de transformación y aprovechamiento del biogás que se produce en el relleno sanitario, se estaría brindando un beneficio al componente social, ambiental, político y económico, como marco en la búsqueda del equilibrio y sostenibilidad en todas las interacciones del ser humano. La estructuración de este proyecto será una herramienta valiosa como hoja de ruta para convertir los gases de los rellenos sanitarios en una oportunidad de negocio y no en un problema, como el escenario que se está viviendo actualmente en Colombia.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar el estudio de factibilidad y viabilidad de alternativas de tratamiento y valorización de biogás que se genera en el relleno sanitario de la Ciudad de Villavicencio, con el propósito de la implementación de procesos de transformación a escala piloto, para el aprovechamiento del gas y rentabilidad para su implementación, en el marco de la economía circular.

Objetivos Específicos

Diagnosticar el estado del relleno sanitario de la ciudad de Villavicencio, en cuanto al manejo actual de los gases, a través de inspecciones, estudio de cromatografía y cuantificación de los volúmenes de gases generados, para determinar su potencial de aprovechamiento.

Analizar técnicas de tratamiento y aprovechamiento de biogás, a través de la implementación de alternativas a escala piloto, para identificar la factibilidad, según la caracterización y volumen potencial del gas generado en el relleno sanitario.

Implementar a nivel teórico la alternativa que mejor se adapte a las condiciones del sitio, según resultados obtenidos, con el fin de determinar la factibilidad y viabilidad para su implementación a escala real, brindando un aporte regional a la economía circular y la gestión integral de los residuos sólidos.

Estado del Arte

El estado actual de la disposición final en Colombia, teniendo en cuenta que los sistemas para la extracción, captura y quema del biogás generado en los rellenos sanitarios corresponden a la actividad complementaria de disposición final en el servicio público de aseo.

En el país, en el documento CONPES 3874 se promovió la disposición final de los residuos sólidos en los rellenos sanitarios por ser la técnica que presenta el menor costo por tonelada (Departamento Nacional de Planeación, 2016). (excepto el compostaje). Debido a lo anterior, de acuerdo con la información del reporte de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios - SSPD (2018), de los 1320 sitios de disposición final que existen en el país, 1035 corresponden a rellenos sanitarios, en los que se dispuso en 2017, el 95,99% del total de residuos dispuestos en todos los sitios de disposición final, lo que corresponde a un total de 29.814,24 ton/día para dicha tecnología, de un total de 31.056,72 ton/día.

Los demás sitios de disposición final adecuados corresponden a 11 celdas de contingencia y 17 plantas de tratamiento; frente a los sistemas inadecuados de disposición de residuos, se cuenta con 45 botaderos a cielo abierto, 19 celdas transitorias y 3 sitios de enterramientos.

Es importante considerar que los sistemas de disposición final entendidos como autorizados o adecuados son: relleno sanitario, planta de tratamiento integral y celda de contingencia. Por su parte, los sistemas contabilizados como no autorizados corresponden a: celda transitoria, botaderos, enterramiento, vertimiento a cuerpos de agua, quema de los residuos sólidos y todo aquel que no cumpla con las definiciones y autorizaciones establecidas y requeridas por la normativa vigente (Decreto 1784 de 2017, Decreto 2041 de 2014 y Resolución 1890 de 2011).

La Disposición final en rellenos sanitarios, según la información reportada en el documento de la SSPD titulado “Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2017” elaborado en el año 2018, las toneladas/día dispuestas en los rellenos sanitarios de Colombia son las siguientes:

Figura 1

Informe de disposición final de residuos sólidos

Nombre Del Sitio	Promedio Ton/día	Categoría
Relleno Sanitario Doña Juana	6279,48*	IV
Relleno Sanitario La Pradera	2685*	III
Colomba El Guabal	2426,29*	
Parque Ambiental Los Pocitos	1936,5*	
Parque Ambiental Loma De Los Cocos	1520,28*	
Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo	1364,51*	
Sitio De Disposición Final De Residuos Sólidos El Carrasco	1030,61*	
Guayabal	842,09*	
Relleno Sanitario Regional Presidente (*)	831,84*	
El Clavo	821,41	
Relleno Sanitario La Esmeralda	642*	
Relleno Sanitario Loma Grande	566,08*	
Parque Ecológico Reciclante	536,94*	
Sin Información	534,25	
Parque Ambiental Palangana	526,53*	

Fuente. SSPD (2018)

En la anterior tabla se puede apreciar que el único relleno sanitario que pertenece a la categoría IV en Colombia es el Relleno Sanitario Doña Juana con un total de 6279,48 ton/día. En la categoría III se encuentra un total de 14 rellenos sanitarios que representan la disposición de 16264,33 ton/día.

En la Categoría II se encuentran 28 rellenos sanitarios que disponen 6.422,7 ton/día del total de residuos sólidos del país lo que representa el 21,5%. Es importante destacar que seis de

los rellenos sanitarios de esta categoría presentaron proyectos de MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio).

Finalmente, en la categoría I se encuentran un total de 100 rellenos sanitarios que disponen 847,66 ton/día de residuos sólidos, lo cual representa solamente el 2,8% del total dispuesto en Colombia que son 29814,2 ton/día.

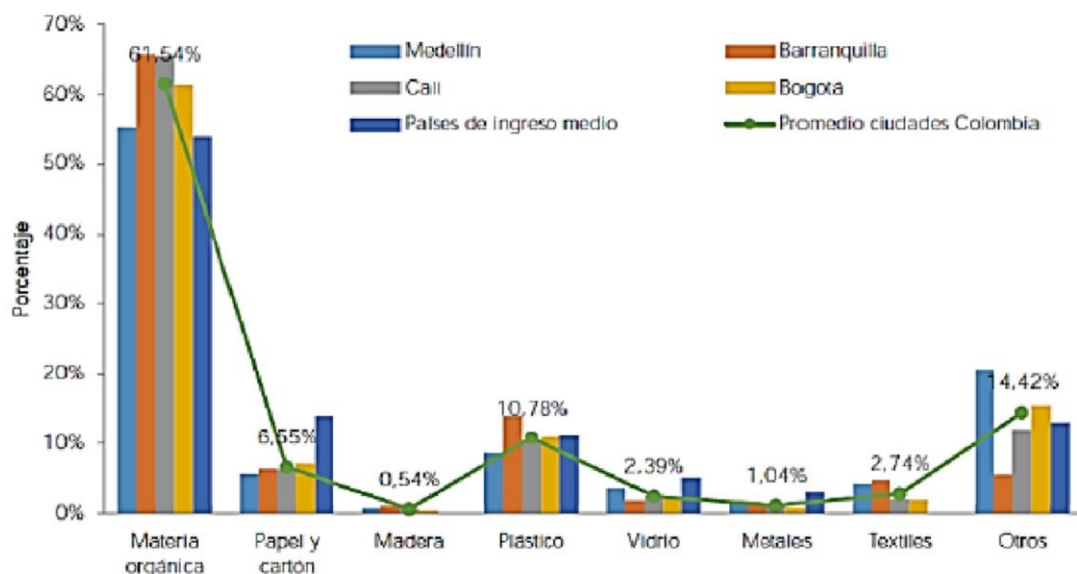
Por otra parte, Colombia ha logrado un alto nivel de regionalización de los rellenos sanitarios, toda vez que 51 rellenos atienden 885 municipios según las categorías establecidas por el MVCT (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio) en el Decreto 1077 de 2015, modificado por el Decreto 1784 de 2017. Asimismo, de los rellenos sanitarios con información disponible, diez (10) reciben el 70% del total de los residuos dispuestos.

La composición de los residuos dispuestos en los rellenos sanitarios, al respecto de la composición y tipificación de los materiales que conforman los residuos sólidos en Colombia, el CONPES 3874 de 2016 explica que, en las grandes ciudades del país, el 61,5% de los residuos llevados a disposición final corresponden a residuos orgánicos.

En la siguiente gráfica se muestra la composición porcentual del tipo de materiales que conforman los residuos sólidos dispuestos en 4 ciudades principales del país.

Figura 2

Composición Porcentual Del Tipo de Materiales que Conforman los Residuos Sólidos



Nota. CONPES 3874 de 2016

La fracción orgánica de los residuos sólidos ordinarios está fundamentalmente constituida por restos de comida, restos vegetales o animales, que son susceptibles de degradación biológica mediante la acción de microorganismos que los utilizan dentro de sus procesos metabólicos para generación de nueva biomasa.

Debido a la importancia de los GEI (Gases de Efecto Invernadero) y los efectos que traen consigo las emisiones antropógenas, a nivel mundial, en el contexto del Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático se acordó, que las partes deben actualizar periódicamente los inventarios nacionales de las emisiones de GEI. En Colombia, el último inventario nacional fue realizado en el año 2014.

En el estudio ‘‘Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático’’ de 2018, del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM-

, se hizo una caracterización de los GEI por sectores productivos y de servicios. En lo

relacionado con el sector de los servicios públicos, los residuos generan un 6% de los GEI a nivel nacional.

De acuerdo con el estudio mencionado, el servicio público de aseo en la actividad de eliminación de los residuos sólidos genera 6.547 Gg CO₂ equivalentes. Los rellenos sanitarios regionales generan 5.011 Gg CO₂ equivalentes, los rellenos locales, celdas de contingencias y plantas integrales generan 1.085 Gg CO₂ equivalentes. Además, se establece que:

Las emisiones estimadas a lo largo de la serie temporal 1990-2014 para el módulo presentan un comportamiento ascendente con una tasa de crecimiento anual compuesta de 3,6%. Las emisiones se incrementaron 131% entre 1990 y 2014. A lo largo de la serie temporal, el metano es el principal GEI emitido (debido a la descomposición de la materia orgánica presente en los residuos sólidos y aguas residuales), con una participación del 91% en promedio para el módulo, seguido del N₂O con 6% y, finalmente, el CO₂ con 3%. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018, p.100)

Todo lo anterior según el segundo reporte bienal de actualización de Colombia ante la cmnucc (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático).

Para el aprovechamiento del biogás generado en los rellenos sanitarios existen cinco aspectos principales que deben ser analizados en la fase de diseño de un proyecto, los cuales proporcionan la base teórica de los pasos que se deben realizar para un aprovechamiento exitoso de este combustible:

Métodos de estimación de la generación de biogás

Métodos de colección de biogás

Tratamiento y purificación de metano

Métodos de caracterización que permitan identificar en tiempo real el grado de purificación del metano.

Técnicas y procesos de aprovechamiento para el metano

A continuación, se presentan los elementos fundamentales de cada uno de los aspectos mencionados.

Métodos de Estimación de la Generación de Biogás en Rellenos Sanitarios

Modelo colombiano de biogás La proyección de generación de biogás proveniente de un relleno sanitario puede ser modelado mediante un software especializado para su predicción, tomando todas las características propias del relleno, como condiciones ambientales y caracterización de residuos. Se puede llegar a la proyección por medio del uso del “Modelo Colombiano de Biogás -MCB-”. Este modelo ha sido aplicado por (Betancourth 2011), para la evaluación del proyecto de combustión de biogás en el relleno La Esmeralda, según resultados previamente obtenidos en el relleno sanitario de Antanas (Pasto, Nariño).

El MCB proporciona valores pre calculados para el índice de generación de metano (k) y la generación potencial de metano, los cuales fueron desarrollados usando datos específicos del clima, datos de la caracterización de residuos y datos específicos sobre el biogás de sitios representativos en Colombia. Estos datos permiten que los usuarios puedan generar índices de generación y recuperación de biogás para rellenos sanitarios localizados en diversas regiones de Colombia (EPA, 2014).

El método colombiano es una hoja de Excel, a la cual cualquier usuario puede tener acceso. El MCB está basado en la ecuación de degradación de primer grado la cual fue tomada de US EPA (Modelo LandGEM versión 3.02) en el 2005 (Stege & Dávila, 2009). El modelo colombiano de estimación de producción de biogás tiene la gran ventaja de ser un sistema de fácil acceso, ya que este se puede descargar de manera gratuita en la página de la agencia de

protección ambiental de los estados unidos, (EPA, United States Environmental Protection Agency).

Modelo estadístico: Una forma de realizar una estimación de producción de biogás generado en el relleno sanitario es el promedio estadístico, ya que nos permite evaluar el valor medio de una base de datos de mediciones de caudales obtenidos en un periodo de tiempo determinado, y así tomar decisiones teóricas sobre la ocurrencia de un fenómeno que puede tener muchas variables que influyen en el resultado final (Morales, 2015).

Métodos de aprovechamiento del biogás: El aprovechamiento del biogás generado en los rellenos sanitarios tiene relación directa con la utilización de otras energías alternativas con características similares como el gas natural. El gas natural es una mezcla de compuestos de hidrógeno y carbono y pequeñas cantidades de compuestos no hidrocarburos en fase gaseosa o en solución con el petróleo crudo que hay en los yacimientos (Shell, s.f.). El poder calorífico del gas natural y del metano es comparable, lo que permite hacer comparaciones y adecuaciones a los sistemas de aprovechamiento que actualmente usan gas natural.

Combustible para producción de energía eléctrica: Uno de los principales usos para el aprovechamiento de gas metano es la generación de energía eléctrica. Se reconoció el potencial calorífico que presentan los gases provenientes de los rellenos sanitarios, los cuales después de pasar por procesos de purificación anteriormente mencionados, adquieren condiciones óptimas para surtir un sistema generador de energía que pueda cumplir las demandas de energía de las comunidades locales cercanas al relleno sanitario intervenido (Reporte Sobre Biomasa, 2017).

Marco Referencial

En el presente marco de referencia se consolidan todos los antecedentes relacionados al tratamiento, aprovechamiento, uso y valorización del biogás producido en los rellenos sanitarios, brindando de esta manera una debida sustentación del desarrollo del presente trabajo de investigación.

Marco Teórico

“El metano (CH₄), el segundo gas de efecto invernadero (GHG) más importante producido por el hombre después del dióxido de carbono (CO₂), es responsable de más de un tercio del forzamiento del cambio climático antropogénico” (Global Methane Initiative, 2011, p.1). “Durante el año 2018 se dispusieron un promedio de 30.973 toneladas por día de residuos sólidos generados en 1.102 municipios de Colombia” (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019, p. 20).

En el relleno sanitario Parque Ecológico Reciclante – PER, ubicado en la Ciudad de Villavicencio, “ingresa un promedio de 800 toneladas por día, provenientes de Villavicencio y 30 municipios adicionales” (Bioagricola del Llano, 2025). “Una tonelada de basura orgánica produce 40 metros cúbicos de biogás, 65% metano y 35% dióxido de carbono” (Fundación Vida Sostenible, 2010 p.1). Según Ingeplanet, “el 70,91% de los residuos que ingresan al Relleno Sanitario de Villavicencio, son orgánicos” (2017, p. 24). Por lo anterior, se puede concluir que en el Relleno Sanitario de Villavicencio ingresa un promedio de 567,28 toneladas de residuos orgánicos diarios, generando de esta manera un pasivo ambiental de 12.691,2 metros cúbicos de gas metano.

“El metano que se libera a la atmósfera antes de que se quemé es perjudicial para el ambiente... el metano contribuye al cambio climático” (SoCalGas, 2018, p.1). “El metano es el

segundo mayor contribuyente al calentamiento global entre los gases de efecto invernadero, después del dióxido de carbono; 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).

Marco Conceptual

Los rellenos sanitarios representan una fuente significativa de biogás debido a la descomposición de los residuos sólidos orgánicos. Este biogás está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), junto con pequeñas concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (COV). Su composición varía según distintos factores, tales como el tipo y cantidad de residuos, la humedad, el grado de compactación y el tiempo de antigüedad del relleno. Asimismo, la producción de biogás fluctúa con el tiempo y en función de las condiciones ambientales, lo que hace necesario un análisis detallado de estos procesos para comprender la degradación de los residuos (Camargo & Vélez, 2009).

El metano generado a partir del biogás tiene múltiples aplicaciones industriales, destacándose su uso como materia prima en la producción de productos sintéticos. En los últimos años, ha demostrado ser una fuente energética alternativa eficaz, especialmente en el aprovechamiento de residuos orgánicos de origen agrícola. Su composición química varía, con valores aproximados del 55 al 70% de metano, entre un 30 y 45% de dióxido de carbono y un 1 a 3% de otros gases. En términos energéticos, su poder calorífico es de alrededor de 5.500 Kcal/m³ (Melendi, 2018).

La reducción de las emisiones de metano a corto plazo se ha convertido en una prioridad debido a su impacto en el efecto invernadero. Un aumento en su concentración atmosférica puede contribuir a problemas ambientales adicionales, como la generación de ozono troposférico y la prolongación del tiempo de residencia de algunos compuestos orgánicos volátiles, lo que puede afectar el equilibrio químico de la atmósfera (Talyan, 2007; Mosher, 1996).

Diferentes investigaciones han analizado el impacto de factores ambientales, como la velocidad del viento y la presión atmosférica, en la dispersión del biogás proveniente de los rellenos sanitarios. Estos estudios han evidenciado que las emisiones pueden presentar una alta variabilidad espacial, influenciada por aspectos como la composición de los residuos, el tipo de material de cobertura y la antigüedad de los desechos depositados (Barbaro, et al., 2008; Manosalva, 2005). Asimismo, se han identificado concentraciones elevadas de metano y otros contaminantes en zonas pobladas ubicadas en un radio de hasta 3 km de distancia de estos sitios de disposición final, lo que sugiere que estos lugares son la fuente de dichas emisiones (Gómez et al., 2008).

Para mitigar estos impactos, iniciativas internacionales como *Metano para Mercados (M2M)* han impulsado la captura y aprovechamiento del metano como fuente de energía limpia y sostenible. Esta estrategia busca reducir las emisiones globales de metano, al mismo tiempo que fomenta el desarrollo económico, mejora la calidad del aire y fortalece la seguridad energética.

Actualmente, más de 20 países y múltiples entidades colaboran en el desarrollo de proyectos de captura y uso del metano (Incremie, 2018).

En la última década, el número de rellenos sanitarios que han implementado sistemas de recolección de biogás para su conversión en energía se ha duplicado a nivel mundial. Esto refleja un creciente interés por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en estos sitios de

disposición final. El biogás puede ser aprovechado de diversas maneras: su uso directo como combustible, la generación de electricidad o su procesamiento para obtener un gas con calidad similar al gas natural. Para mejorar su gestión, se han desarrollado modelos matemáticos como *LandGEM* y *MICROGEN*, aunque estos presentan limitaciones debido a la dificultad de ajustar sus estimaciones a las condiciones reales de producción y captura de biogás en los rellenos sanitarios. Por ello, es necesario seguir investigando y desarrollando modelos más precisos que integren diversos parámetros y reflejen mejor la complejidad de estos procesos. Además, una adecuada caracterización de las emisiones del biogás permitirá establecer normas de calidad del aire y evaluar su impacto ambiental, promoviendo así una mejor gestión de los rellenos sanitarios y reduciendo su impacto en la salud pública y el medioambiente (Vélez, 2009).

Marco Histórico

Estudio de casos internacionales, específicamente en la comunidad europea, el biogás es considerado como una energía procedente de fuentes renovables, en conjunto con la energía eólica, solar, geotérmica, entre otras, Según las definiciones de la directiva del Parlamento Europeo. Adicionalmente, a nivel internacional los proyectos de captación y utilización del biogás han sido clasificados como mecanismos de desarrollo limpio (MDL).

La recolección del biogás para darle una utilización es una forma de evitar expulsar a la atmósfera los gases que se producen como resultado del proceso de descomposición anaeróbica de las basuras y residuos orgánicos que se depositan en rellenos sanitarios. Como se sabe, el metano libre se encuentra clasificado dentro de los gases de efecto invernadero (incluso con mayor poder que el CO₂) al incrementar las concentraciones de estos gases en la atmósfera y contribuyendo al calentamiento global.

Lo que se observa de este energético, compuesto principalmente (40-60%) por metano (CH₄), es que contiene además otros elementos que pueden ser clasificados como tóxicos o que pueden afectar la integridad de las tuberías de acero por donde se transporte o de los equipos o motores donde se consume.

Como lo identificó la Comisión en el Documento soporte de la propuesta inicial, el biogás contiene amoniaco y siloxanos elementos que han sido clasificados como compuestos con riesgos cancerígenos con el potencial de generar corrosión en motores de combustión interna o turbinas de generación de electricidad.

No obstante, en algunos países se han desarrollado técnicas para purificar el biogás; eliminar estos componentes no deseados, con el fin de convertirlo en un gas equivalente con el gas natural y de esta forma mezclarlo en las redes de transporte y distribución para su posterior utilización a nivel residencial, industrial y en el sector transporte.

Los proyectos que se han explorado a la fecha en Colombia (Medellín y Bogotá, según el Documento CREG 056 de 2009) corresponden a producción de gas a partir de rellenos sanitarios. También existe una iniciativa de la Empresa de Acueducto de Bogotá para aprovechar el biogás producido en la planta de tratamiento de aguas residuales del Salitre.

En Latinoamérica, tal vez solamente en Chile existe, desde el año 2008, una experiencia de utilización del biogás generado en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Farfana, el cual se inyecta al sistema de distribución de gas natural de la ciudad de Santiago.

Según Landfill Methane Outreach Program (LMOP), en los Estados Unidos, la Agencia para la Protección del Ambiente (EPA), estableció en 1994 un programa nacional voluntario para gestionar las emisiones de los rellenos sanitarios. El programa promueve la utilización del biogás como una fuente de energía renovable.

A julio de 2011, se encontraban en operación 558 proyectos operativos que utilizan el gas de rellenos sanitarios (landfill gas - LFG). Entre los usos que le dan estos proyectos al biogás, se encuentran los siguientes: - Calefacción de invernaderos. Producción de electricidad y calor en aplicaciones de cogeneración. Hornos de cocción de ladrillos. Suministro de gas de alta calidad (alto contenido de energía) a redes de gasoductos. - Combustible para flota de camiones de basura. - Suministro de combustible para la fabricación de productos químicos y automóviles.

En la comunidad europea existe “Biogasmax”, como un proyecto financiado por la Comisión Europea con el fin de ayudar a los países miembros a reducir la dependencia en el petróleo y disminuir las emisiones de efecto invernadero, a través de la utilización del biometano como combustible para el transporte.

Adicionalmente, y como medida de promoción, el Parlamento Europeo emitió el 23 de abril de 2009 la directiva 2009/28/CE sobre el uso de energía procedente de fuente renovables, incluyó al biogás por sus beneficios en materia de emisiones y sus ventajas medioambientales al utilizar dicho producto para la producción de calor, de electricidad y como carburante en vehículos.

El caso de Europa es de interés en la medida que años atrás prohibieron la inyección del biogás en las redes de transporte y distribución; no obstante, recientemente muchos países han eliminado esta prohibición, y en la actualidad se tienen las siguientes referencias de inyección del biogás en sistemas de distribución; Goteborg (Suecia), desde 2007, Bern (Suiza), desde 2008 y Lille (Francia), desde 2011.

En el caso de Francia, en el año 2008, la Agencia Nacional de Salud (AFSSET) publicó los resultados de un estudio realizado en conjunto con la industria en que se encontró que la

utilización del biometano (biogás mejorado o purificado) no implica mayores riesgos para la salud que los que se enfrentan con el gas natural.

Marco Legal

Decreto 2811 de 1974. “Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”.

Ley 99 de 1993. “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”; y donde reza se en el numeral 32 del artículo 5 específicamente.

Ley 164 de 1994. “Por medio de la cual se aprueba la “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, hecha en Nueva York el 9 de mayo de 1992, entrando en vigor el 21 de marzo de 1994.

Ley 629 de 2000. “Mediante el cual se Ratifica el protocolo de Kyoto por parte del Congreso de la República de Colombia”.

Ley 812 de 2003. “Mediante la cual se adopta el Plan Nacional de Desarrollo particularmente en lo pertinente a energía”.

Ley 697 de 2001. “Mediante el cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve el uso de energías alternativas y se dictan otras disposiciones”.

Decreto 1713 del 6 de agosto del 2002. “Establece las leyes 142 de 1994, 632 del 2000, y 689 del 2001, para prestar 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 generales, y los sistemas para la utilización y disposición final, dentro de otras cosas”.

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 84. El relleno sanitario manual es recomendado para municipios con centros urbanos con población menor a ocho mil (8,000) usuarios.

Artículo 90. Determina parámetros básicos en el diseño de rellenos, favoreciendo la estimación potencial de metano y facilitando la construcción de la línea base y el plan de monitoreo.

Artículo 93. Manejo y Monitoreo de gases. Los operadores de los rellenos sanitarios son responsables del manejo de los gases generados de acuerdo con lo que está establecido en los permisos, autorizaciones y planes de operación.

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.

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.

Ley 788 de 2002. Introduce modificaciones al Estatuto Tributario, entre ellas dos incentivos para proyectos de reducción de gases de efecto invernadero.

Artículo 18. Establece que está exenta de renta por 15 años, “la venta de energía con base en los recursos eólicos, biomasa o residuos agrícolas, realizada únicamente por las empresas

generadoras”, siempre y cuando el proyecto genere y venda certificados de reducción de GEI y destine a obras de beneficio social el 50% de los recursos obtenidos por este concepto.

Artículo 95. Determina que la importación de maquinaria y equipos destinados a proyectos que generen certificados de reducción de GEI estará exenta de IVA.

Se puede articular con otras exenciones tributarias asociadas al componente de mejoramiento ambiental (Ley 424 y Ley 6)

En Colombia existen interesantes incentivos tributarios para estimular la inversión ambiental en la adopción de tecnologías limpias.

Exención sobre Impuesto a las ventas: Inversiones en control ambiental (Art. 424 – 5 y Art. 428 del Estatuto Tributario, Ley 223 de 1995).

Uso del gas y generación de energía limpia (Art. 468 del Estatuto Tributario).

Exención sobre Impuesto a la renta y complementarios: Incentivos para inversiones en control y mejoramiento ambiental (Art.158 – 2 del Estatuto Tributario, Ley 6 de 1992).

Decreto 1505 de 2003. “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”.

Estatuto Tributario: “Incentivos tributarios para proyectos de venta de reducciones de emisiones verificadas”.

Decreto 2755 (30 de septiembre del 2003). “Describe las normas para la aplicación del anterior incentivo. Este incentivo es válido solamente si el desarrollador del proyecto puede obtener Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE’s) bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) e invierta por lo menos 50 por ciento de las ganancias obtenidas por la venta de RCE’s en obras de beneficio social en la región donde el generador está localizado”.

Decreto Reglamentario 3683 de 2003. “Junto con todas las disposiciones asociadas a la regulación (técnica y jurídica) sobre generación (en cualquiera de sus acepciones), transporte, comercialización de energéticos y energía, cuando sea pertinente”.

Resolución 0453 de abril 27 de 2004. “Por la cual se adoptan los principios, requisitos y criterios 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”.

Resolución 0454 de abril 27 de 2004. “Por medio de la cual se regula el funcionamiento del Comité Técnico Intersectorial de Mitigación del Cambio Climático del Consejo Nacional Ambiental”.

Resolución No 2.6.07.0982 del 21 de diciembre de 2007 emitida por la corporación ambiental CORMACARENA, quien otorgó la Licencia Ambiental requerida para el funcionamiento del relleno sanitario - Parque Ecológico Reciclante - PER, para un periodo de operación de aprox. 33 años.

Decreto 1076 de mayo de 2015: "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible."

Decreto 1077 de mayo de 2015: "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio."

Resolución 0330 de junio de 2017: “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005 y 2320 de 2009”.

Decreto 1784 de noviembre de 2017: “Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1077 de 2015 en lo relativo con actividades complementarias de tratamiento y disposición final de residuos sólidos en el servicio público de aseo”.

Resolución 0938 de diciembre 2019: “Por la cual se reglamenta el Decreto 1784 del 2 de noviembre de 2017 en lo relativo a las actividades complementarias de tratamiento y disposición final de residuos sólidos en el servicio público de aseo”.

Ley 2294 de 2023, Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 Colombia potencia mundial de la vida, el artículo 227 hace referencia al programa de basura cero.

Metodología

La información necesaria para llevar a cabo el desarrollo de la presente propuesta de investigación se tomará en campo principalmente, así mismo, apoyado con referencias, estudios previos y de la empresa de servicios públicos domiciliario de aseo de la ciudad de Villavicencio, quien es el ente encargado de la operación del relleno sanitario regional, a continuación, se describen las etapas de la metodología a llevar a cabo:

Etapas 1

Observación Directa en Campo

Recopilación de información sobre el estado actual de la infraestructura, operación y controles del relleno sanitario de la ciudad de Villavicencio, enfocados en la identificación de los elementos e instalaciones del sistema de captación de gases.

Instrumento

Reglamento operativo del sitio de disposición final, donde se extraerá la información de mayor relevancia relacionada al manejo de los gases.

Etapas 2

Estudio de Caracterización de Gases

Se realiza mediante un laboratorio especializado la toma de muestras del biogás generado en el relleno sanitario y análisis de cromatografía, para determinar su composición física química.

Instrumento

Datos y análisis reportados por el laboratorio del estudio de cromatografía, para determinación del potencial de aprovechamiento.

Etapa 3

Cuantificación de Volúmenes

Se realiza mediante estudios e implementación de modelos de proyección de producción de gases en rellenos sanitarios, donde se debe identificar la metodología que se pueda adaptar a las condiciones, características e información existente del relleno sanitario.

Instrumento

Modelo de cuantificación y predicción de biogás, donde se obtendrá la curva de producción de gases en el tiempo.

Etapa 4

Revisión del Estado de Arte

En esta etapa, se procederá a realizar la evaluación de las tecnologías disponibles en el mercado nacional y mundial para el sistema de aprovechamiento del biogás.

Instrumento

Mediante este ejercicio se busca proponer como mínimo tres alternativas que puedan ser potenciales para su implementación en el relleno sanitario de Villavicencio.

Etapa 5

Selección de Técnicas

De las tecnologías propuesta por la etapa anterior, se procederá a tener en cuenta los criterios para la selección de las tecnologías más adecuadas para el aprovechamiento del biogás, tales como: Costos de inversión y operación, complejidad de la operación, reglamentación normativa, demanda del producto final, adaptabilidad a los volúmenes y caracterización del biogás existente y proyectado, tiempo de implementación de la tecnología en el mundo y subproductos que genera.

Instrumento

En esta etapa se busca seleccionar como mínimo dos tecnologías viables, para su implementación.

Etapa 6***Implementación de Técnicas***

Realizar a nivel de escala piloto la implementación de al menos dos alternativas de aprovechamiento de biogás generado en el relleno sanitario de Villavicencio, donde se debe realizar estudios de ingeniería para determinar cuál es la tecnología que obtuvo mejor comportamiento en cuanto a funcionalidad y economía.

Instrumento

Estudios a escala piloto de las tecnologías implementadas para el aprovechamiento de biogás, donde se obtendrán resultados valiosos para determinar cuál técnica es la más viable. **Etapa 7**

Implementación Teórica

Con los resultados obtenidos en las etapas anteriores de la presente metodología, se realiza a nivel de ingeniería conceptual el análisis de las alternativas estudiadas, con el fin de determinar la factibilidad y viabilidad de la tecnología que mejor se adapte a las condiciones técnicas y financieras.

Instrumento

Informe de la alternativa de aprovechamiento de biogás, como resultado de la implementación de metodologías donde se pueda evaluar las técnicas estudiadas.

Análisis de Resultados: Visita de Campo al Relleno Sanitario de la Ciudad de Villavicencio - Meta

Se realizaron visitas de campo en el relleno sanitario denominado Parque Ecológico Reciclante PER, donde obtuvimos información sobre cifras de toneladas dispuestas, procedimientos constructivos y de operación, entrevistas con los técnicos operadores, datos estadísticos, descripción de los controles técnicos y ambientales que se realizan al interior del parque, información sobre la licencia ambiental e igualmente se llevó a cabo la evaluación del estado de la infraestructura actual, en relación al manejo de los gases que se generan en dicho relleno sanitario.

Figura 3

Visita de Campo Al Relleno Sanitario de la Ciudad De Villavicencio



Nota. Autoría Propia

El Relleno Sanitario Parque Ecológico Reciclante - PER, está ubicado en la vereda San Juan Bosco en el municipio de Villavicencio del departamento del Meta y es operado por Bioagricola del Llano S.A. ESP BIC, quien se encarga de prestar el servicio público domiciliario de aseo en la ciudad de Villavicencio en las actividades de barrido y limpieza de áreas públicas, recolección y transporte, corte de césped, poda de árboles y lavado de áreas públicas, y disposición final mediante la técnica de relleno sanitario; es de resaltar que ésta última actividad también se presta a otros municipios.

El Relleno Sanitario Parque Ecológico Reciclante - PER, inició operaciones en el mes de enero de 2008, bajo la Licencia Ambiental No. 2.6.07.0982 del 21 de diciembre de 2007, emitida por la Corporación Ambiental CORMACARENA, para llevar a cabo la disposición final de los residuos sólidos ordinarios, que se generan en la Ciudad de Villavicencio y aprox. 30 municipios adicionales, pertenecientes al departamento del Meta, Cundinamarca y Boyacá, respectivamente.

De acuerdo con la categorización de los Rellenos Sanitarios en Colombia, descrita en el decreto 1784 de 2017 “Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1077 de 2015 en lo relativo con las actividades complementarias de tratamiento. y disposición final de residuos, sólidos en el servicio público de aseo”, donde se contemplan tres categorías de sitios de disposición final de acuerdo con la tasa de disposición diaria, teniendo en cuenta el promedio diario de la vigencia del último año de las toneladas recibidas en el Parque Ecológico Reciclante PER que corresponde a 655 ton/día, dicho relleno sanitario se cataloga categoría III.

Figura 4

Relleno Sanitario Parque Ecológico Reciclante - PER



Nota Autoría Propia

Histórico de Toneladas Dispuestas - PER

A corte del 31 de diciembre de 2024, se ha logrado un tiempo operacional de 17 años, donde se ha prestado el servicio de disposición final de manera ininterrumpida para la ciudad de Villavicencio y los demás municipios provenientes del departamento del Meta, Cundinamarca y Boyacá, se han gestionado 3.014.154 toneladas de residuos sólidos ordinarios, bajo la licencia ambiental resolución No 2.6.07.0982 del 21 de diciembre de 2007, que está establecida para una vida útil de 33 años, de acuerdo al último informe anual de disposición final, expedido por la

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) El Parque Ecológico

Reciclante (PER) es uno de los rellenos sanitarios regionales con mayor vida útil en

Colombia.

El 24% del total de los residuos dispuestos en el PER desde el año 2008 hasta la fecha corresponden a otros municipios y el 76% respectivamente provienen de la ciudad de Villavicencio.

Tabla 1

Relación Disposición Final - PER

Relación Disposición Final - PER			
Año	Otros Municipios	Villavicencio	Total
2008	13.278	95.702	108.980
2009	13.036	102.695	115.731
2010	18.488	110.490	128.979
2011	21.096	117.051	138.147
2012	21.810	129.819	151.630
2013	24.912	139.333	164.246
2014	53.961	140.277	194.238
2015	37.463	139.809	177.273
2016	42.821	138.375	181.196
2017	49.612	143.476	193.088
2018	54.146	144.385	198.531
2019	57.726	146.775	204.501
2020	60.413	151.025	211.438
2021	63.980	152.209	216.190
2022	62.965	142.791	205.756
2023	64.175	140.878	205.053
2024	75.943	143.236	219.179
Total	735.826	2.278.328	3.014.154

Nota. La tabla muestra el comportamiento en la disposición final de residuos entre 2008 y

2024, con Villavicencio como el principal generador. *Fuente.* Autor

Figura 5

Residuos Dispuestos en el PER



Nota. Autoría Propia

Reporte de Toneladas Dispuestas Año 2024

En el periodo comprendido de enero a diciembre de 2024, se dispusieron 219.179 toneladas de residuos sólidos mediante la técnica de relleno sanitario, en comparación con el mismo periodo del año anterior, se evidencia un incremento del 6,89%, equivalente a 14.126 toneladas adicionales para el año 2024.

Tabla 2*Comparativo Total Residuos Dispuestos en el PER*

Comparativo Total Residuos Dispuestos en el PER

Mes	Año 2023	Año 2024	Variación %
Enero	17.292	17.723	2,49%
Febrero	14.287	16.207	13,44%
Marzo	16.548	16.656	0,65%
Abril	16.288	17.131	5,18%
Mayo	17.896	18.538	3,59%
Junio	17.136	17.272	0,79%
Julio	17.229	18.133	4,99%
Agosto	17.749	17.883	0,75%
Septiembre	16.701	17.491	4,52%
Octubre	17.291	20.920	17,34%
Noviembre	18.014	19.930	9,62%
Diciembre	18.623	21.295	2,55%
Total (Ton)	205.053	219.179	6,89%

Nota. La tabla compara la disposición total de residuos en el PER entre 2023 y 2024, mostrando un incremento del 6,89%. Se observa un aumento mensual en casi todos los meses, destacando octubre con un 17,34% y febrero con un 13,44%. *Fuente.* Autor

Figura 6*Disposición de Residuos*

Nota. Autoría Propia

Reporte de Toneladas Dispuestas de la Ciudad de Villavicencio

En relación con los residuos dispuestos de la ciudad de Villavicencio, para la vigencia del año 2024, se dispusieron 143.236 toneladas, mostrando un incremento del 1,67% frente al año anterior y equivalente al 65,35% del total de los residuos recibidos.

Tabla 3*Comparativo Residuos Dispuestos de Villavicencio*

Comparativo Residuos Dispuestos de Villavicencio			
Mes	Año 2023	Año 2024	Variación %
Enero	11.837	11.900	0,54%
Febrero	9.856	11.103	12,65%
Marzo	11.417	11.514	0,85%
Abril	11.269	11.412	1,27%
Mayo	12.224	12.585	2,95%
Junio	11.759	11.749	-0,09%
Julio	11.827	12.294	3,80%

Agosto	12.090	11.959	-1,10%
Septiembre	11.472	11.355	-1,03%
Octubre	11.829	12.312	3,92%
Noviembre	12.346	12.104	-1,99%
Diciembre	12.952	12.949	-0,02%
Total (Ton)	140.878	143.236	1,67%

Nota. La tabla muestra un incremento del 1,67% en los residuos dispuestos en

Villavicencio entre 2023 y 2024. Aunque algunos meses presentan reducciones, como

junio -0,09%, agosto - 1,10% y noviembre -1,99%, febrero destaca con un aumento del

12,65%. Autor

Figura 7

Patio de Descargue



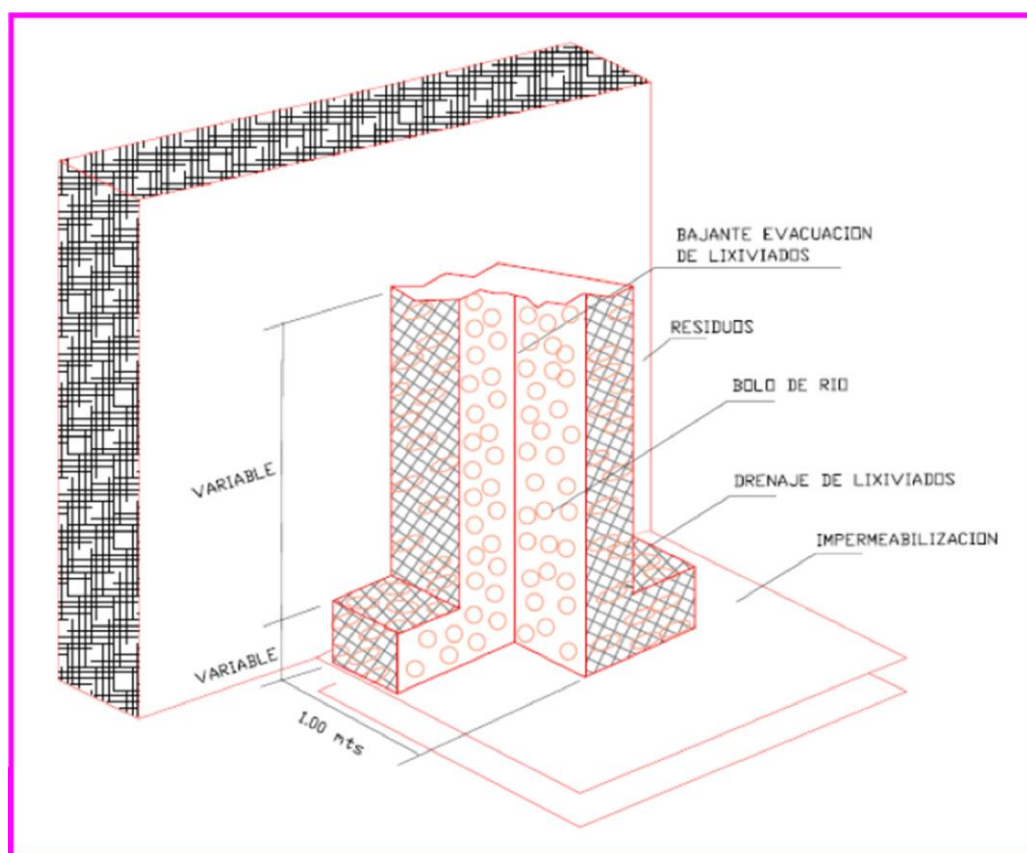
Nota. Autoría Propia

Ductos de Desgasificación

De acuerdo con la licencia ambiental que avala la operación del relleno sanitario en el Artículo 4.5-1.4.1. contempla la construcción de chimeneas de drenaje de gases a través de perforaciones en HDPE 6”.

Figura 8

Sistema de Evacuación de Gases



Nota. Autoría Propia

El sistema de evacuación de gases corresponde a una extracción pasiva, que consiste en construir un gavión de un metro de ancho (1 m) y longitud vertical necesaria para superar la altura de la masa de residuos, con un tubo sanitario de seis pulgadas (6”), debidamente perforado cada 0,10 m. La construcción de los ductos inicia desde la base del área conectándose al drenaje principal para lixiviados “espina de pescado”, este ducto se va construyendo paralelo a la

disposición de residuos en el área. Un metro antes de salir a la superficie del domo, se deja de perforar la tubería y se reemplaza el gavión por un relleno de arcilla compactada que funciona como sello para evitar el ingreso de oxígeno a la chimenea, igualmente se construye un cuello en geomembrana para garantizar hermeticidad. El radio de acción establecido para la ubicación de los ductos de desgasificación contempla una distancia aproximada de 35 m.

Figura 9

Ductos Desgasificación



Nota. Autoría Propia

Durante la operación de la zona de disposición final, se construyen drenes horizontales internos en gavión, de 1m ancho por 0,5 m de alto y con la longitud necesaria para conectarse con los drenes verticales de desgasificación, estos permiten la evacuación de los gases y lixiviados generados en las capas intermedias de los residuos que se van disponiendo.

De igual manera cuando los residuos dispuestos alcanzan el nivel de la corona del dique, se debe construir un filtro perimetral entre el dique y los residuos, con el propósito de confinar el área y conducir los lixiviados hacia el sistema de drenaje principal de la base del área de disposición. Como medida de contingencia para posibles taponamientos o averías de la válvula de evacuación, antes de la salida del sistema de drenaje de lixiviados, se van instalando tubos vibrados de 36 pulgadas en concreto reforzado de 3000 psi, lo que constituye un pozo de inspección, que permite verificar el nivel de lixiviado al interior del área y a su vez realizar bombeo directo en caso de que sea necesario.

Figura 10

Ductos Desgasificación



Nota. Autoría Propia

Para llevar a cabo una adecuada gestión de los gases producidos dentro de la masa de los residuos, es necesario desarrollar adecuadamente el proceso constructivo de los ductos de desgasificación, dicha estructura se encarga de facilitar la extracción del biogás que se genera en las diferentes capas de los residuos dispuestos, disminuyendo considerablemente el riesgo del índice de explosividad dentro del domo de residuos.

Dichos filtros contienen una malla electrosoldada 15x15 calibre 5 mm, se llena con roca de río y se instala un tubo en polietileno alta densidad de 200 mm de diámetro (8 pulgadas) debidamente perforado. Con la construcción de estos ductos, se garantiza la evacuación pasiva del biogás que se produce por la descomposición de la fracción orgánica que contiene los residuos sólidos dispuestos.

Cierre de Zonas de Disposición Final

Según la resolución de la licencia ambiental del relleno sanitario, estipulada en el artículo 4.5-1.8-1. Al finalizar cada nivel de disposición se colocará una cobertura con material pétreo, polietileno de alta densidad de 20 mils, aplicación de arcilla en 0,3 metros y siembra de gramíneas.

Durante las visitas de campo realizadas se identificó la zona denominada número I, con su respectivo proceso de cierre y clausura, se determinó que dicha zona I inició operación en el mes de enero de 2008 hasta junio de 2013, posteriormente se dio inicio de la disposición final en la zona II, donde actualmente se sigue disponiendo los residuos, debido a que posee una vida útil de 13 años.

Se realizan de manera rutinaria, actividades enfocadas al mantenimiento del área clausurada, donde se realizan los respectivos controles técnicos y ambientales, a su vez el control de vegetación, mediante corte del pasto.

Figura 11*Zona 1 Clausurada*

Nota. Autoría Propia

Cobertura de Residuos Dispuestos

La cobertura de los residuos dispuestos en el relleno sanitario se realiza empleando geomembrana alta densidad 1,5mm, con el fin de impedir la percolación de las aguas lluvias a la masa de los residuos, igualmente la cobertura hace parte del control de mitigación de olores y proliferación de vectores en la zona sanitaria.

Figura 12

Cobertura de los Residuos Dispuestos



Nota. Autoría Propia

Según la resolución 0938 de 2019, establece que el área máxima descubierta como frente de trabajo operativo debe ser de 3.000 metros cuadrados, es por esta razón que desde la supervisión en el relleno sanitario se controla este aspecto técnico.

La actividad de cobertura de residuos es muy importante dentro de las labores operativas del relleno sanitario, debido a que mitiga la proliferación de olores, ayuda al control en la presencia de aves y vectores, igualmente disminuye de manera significativa los volúmenes de lixiviados producto de las precipitaciones.

Figura 13

Cobertura de los Residuos Dispuestos



Nota. Autoría Propia

Estudio Geofísico

Con el propósito de identificar posibles zonas de acumulación de biogás y lixiviados dentro de la masa de residuos del Relleno Sanitario - Parque Ecológico Reciclante (PER), se realiza el monitoreo geoelectrico en la zona II, donde actualmente se está realizando la disposición final de los de residuos, el resultado del mismo concluyó que la zona II no posee acumulación de gases ni lixiviados, debido a que se cuenta con sistemas de drenajes óptimos, garantizando de esta manera estabilidad en el domo del relleno sanitario, de igual forma este monitoreo se realiza de forma semestral tal como lo establece la resolución 0938 de 2019.

Figura 14

Monitoreo Geofísico



Nota. Autoría Propia

Este monitoreo es realizado de forma semestral establecido para los meses de abril y octubre, respectivamente; se realizan 5 tomografías eléctricas o imágenes de resistividad en la zona de operación del relleno sanitario, donde permite conocer el comportamiento dentro de la masa de los residuos en relación a la generación y manejo del biogás y lixiviados que se producen, de igual modo genera información relevante de alertas tempranas en caso de existir acumulaciones de dichos subproductos en el domo de residuos.

En la validación y revisión de los informes de monitoreos históricos no se han presentado resultados atípicos en cuanto acumulaciones de biogás y lixiviados en la zona II, donde se concluye que el sistema de evacuación de gases y drenaje de lixiviados han funcionado correctamente, sin generar riesgo de inestabilidad a la infraestructura del relleno sanitario.

Monitoreo Geotécnico con Topografía

Con el propósito de conocer el comportamiento en asentamiento, elevación, taludes y desplazamiento del domo que conforma los residuos dispuestos en la zona II y los diques perimetrales de contención que hacen parte de la infraestructura del Relleno Sanitario, se lleva a cabo de manera mensual un seguimiento topográfico con el propósito de identificar alertas tempranas de posibles comportamientos atípicos o movimientos que se encuentren por fuera de los rangos admisibles, para tomar las medidas preventivas y correctivas necesarias para garantizar la estabilidad general del Relleno Sanitario. Como resultado de los respectivos estudios geotécnicos mensuales no se evidenciaron datos que se encuentren por fuera del rango permitido.

Monitoreo de la Vida Útil Remanente

En el presente informe se calcula la vida útil remanente, que corresponde a la capacidad del Relleno Sanitario, expresada en unidad de tiempo, cuyo resultado es obtenido de la relación entre el volumen remanente y la tasa de disposición promedio de los últimos seis meses, así como el promedio de la densidad de compactación de los residuos dispuestos. Dicho cálculo es realizado teniendo en cuenta la capacidad total del Relleno Sanitario y la capacidad de la zona II, respectivamente.

De acuerdo a la Resolución No 20201000014555 del 19 de Mayo de 2020 expedida por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios - SSPD, establece el reporte semestral de la vida útil del sitio de disposición final, donde tiene en cuenta los siguientes aspectos: Promedio mensual de toneladas dispuestas (Ton/mes). Corresponde al promedio mensual de la cantidad de toneladas dispuestas en el sitio de disposición final en el semestre de reporte.

Volumen remanente (m³). Es el espacio disponible en el sitio de disposición medido en metros cúbicos, para la disposición de los residuos sólidos en el sitio de disposición final con corte al

último día del semestre de reporte. Índice de compactación (Ton/m³). Índice de compactación efectivamente utilizado, que corresponde al promedio de la relación entre masa y volumen ocupado por los residuos que ingresaron al sitio de disposición final en el semestre de reporte. Vida útil remanente (meses). Es la capacidad del sitio de disposición final, expresada en unidad de tiempo, resultado de la relación entre el volumen remanente y la tasa de disposición, de conformidad con lo establecido en el Decreto 1784 de 2017. Debe ser estimada teniendo en cuenta los tres campos anteriores. Volumen remanente del frente de trabajo operativo (m³). Es el espacio disponible en el frente de disposición final actual (celda y/o vaso operativo) medido en metros cúbicos, para la disposición de los residuos sólidos en el sitio de disposición final con corte al último día del semestre de reporte. Vida útil remanente frente de trabajo operativo (meses). Es la capacidad del frente de disposición final actual (celda y/o vaso operativo), expresada en unidad de tiempo, resultado de la relación entre el volumen remanente y la tasa de disposición. Debe ser estimada teniendo en cuenta los campos: Promedio mensual de toneladas dispuestas, índice de compactación y volumen remanente del frente de trabajo operativo.

Debido a lo anterior, y teniendo en cuenta la forma de cálculo establecida por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios - SSPD, a corte del 30 de junio de 2024 se cuenta con una vida útil remanente en la zona II donde actualmente se hace la disposición final de 20,01 meses; con relación a la capacidad total del Relleno Sanitario se obtiene una vida útil remanente de 268,56 meses.

Análisis de Resultados: Estudio de Caracterización de Gases del Relleno Sanitario de Villavicencio

El estudio de cromatografía del biogás que se genera en el relleno sanitario es fundamental, con el fin de conocer la concentración del gas metano, dado que es un punto de partida muy importante para definir el potencial de aprovechamiento y valorización de este subproducto que se genera en una buena proporción en el sitio de disposición final de los residuos de la región.

Se realizaron dos estudios de caracterización del biogás, dicho monitoreo estuvo a cargo de la Empresa Texas Oiltech Laboratories Colombia, experta en análisis fisicoquímicos de la industria del gas, petróleo y termoeléctricas.

Figura 15

Primer Estudio de Caracterización del Biogás

<i>Parameter</i>	Units	Result
Hydrogen	% Mol	0.0000
Oxygen	% Mol	0.0000
Nitrogen	% Mol	17.3783
Carbon Dioxide	% Mol	36.1164
Methane	% Mol	45.8585
Ethane	% Mol	0.0000
Propane	% Mol	0.6468
iso-Butane	% Mol	0.0000
n-Butane	% Mol	0.0000
Neo-Pentane	% Mol	0.0000
iso-Pentane	% Mol	0.0000
n-Pentane	% Mol	0.0000
Hexane	% Mol	0.0000
Heptane	% Mol	0.0000
Octane	% Mol	0.0000
Nonane	% Mol	0.0000
Decane	% Mol	0.0000
Undecane	% Mol	0.0000
Dodecane	% Mol	0.0000
TOTAL	% Mol	100.0000

Nota. Texas Oiltech Laboratories

En el primer análisis de resultados del estudio de cromatografía del biogás del relleno sanitario de Villavicencio, posee una concentración de gas metano del 45,86%, el dióxido de carbono en un 36,12% y el parámetro de nitrógeno contiene un 17,38%; lo anterior se enmarca en una caracterización típica del biogás que se producen en los rellenos sanitarios.

Figura 16

Segundo Estudio de Caracterización del Biogás



Desde 1985
Calidad controlada a través de análisis

Analysis Certificate

CALLE 15 No. 34-40, BARRIO PUENTE ARANDA
CODIGO POSTAL: 111611, BOGOTÁ D.C., COLOMBIA

TEL: (+57) 1 745-6485
TEL: (+57) 5 671-0860
CEL: (350) 619 - 8084

Composition of Natural Gas by Gas Chromatography, ASTM D1945

Parameter	Units	Result
Hydrogen	% Mol	0.0000
Oxygen	% Mol	0.0000
Nitrogen	% Mol	15.3343
Carbon Dioxide	% Mol	33.0983
Methane	% Mol	50.6686
Ethane	% Mol	0.0044
Propane	% Mol	0.3767
iso-Butane	% Mol	0.1944
n-Butane	% Mol	0.0002
Neo-Pentane	% Mol	0.0000
iso-Pentane	% Mol	0.0005
n-Pentane	% Mol	0.0006
Hexane	% Mol	0.1111
Heptane	% Mol	0.1048
Octane	% Mol	0.0568
Nonane	% Mol	0.0480
Decane	% Mol	0.0013
Undecane	% Mol	0.0000
Dodecane	% Mol	0.0000
TOTAL	% Mol	100.0000

Nota. Texas Oiltech Laboratories.

En la segunda medición en relación con la caracterización del biogás del relleno sanitario de Villavicencio, se evidencia una concentración mayor en relación al primer monitoreo en cuanto al parámetro de la concentración del metano alcanzado un 50,67%, dióxido de carbono presenta una disminución quedando en el 33,10% y el nitrógeno en el 15,33%, respectivamente.

Al tener en cuenta los dos análisis realizados, se concluye que se cuenta con un potencial en gas metano del 48,26%, es de resaltar que dicho gas es el que aporta un mayor poder calorífico, que permite viabilizar la posibilidad de generar un proceso de valorización y aprovechamiento del mismo.

Análisis de Resultados: Cuantificación de Volúmenes y Producción de Gases del Relleno Sanitario de Villavicencio

Para determinar la producción de biogás actual y potencial del relleno sanitario, se debe llevar a cabo un análisis por cada una de las seis zonas de disposición final definidas en la Licencia Ambiental y de acuerdo con el diseño general del sitio de disposición final, dicha estimación se realizó bajo la metodología contemplada en la publicación Gestión integral de residuos sólidos, volumen 1 de George Tchobanoglous, Hilary Theisen, Samuel A. Vigil - Editado por Mc Graw Hill, 1994.

Figura 17

Plano del Relleno Sanitario de Villavicencio.



Nota. Bioagrícola

Con el propósito de conocer la producción del biogás para cada una de las seis zonas contempladas en el diseño del relleno sanitario, se debe tener en cuenta el estudio de caracterización física de los residuos sólidos realizado dentro de las instalaciones del relleno sanitario, la cual se presenta a continuación.

Tabla 4

Caracterización Física de los Residuos del Relleno Sanitario de Villavicencio

Caracterización Física de los Residuos del Relleno Sanitario de Villavicencio	
Componente	Fracción %
Residuo Orgánico de Plaza	13,90%
Residuo de Comida	38,06%
Residuo de Jardín	5,46%
Papel de Oficina	1,49%
Papel Periódico	2,11%
Cartón	3,56%
Recipientes y Frascos Plásticos	1,51%
Bolsas Plásticas	8,11%
Textiles	2,52%
Caucho	0,30%
Cuero	0,80%
Madera	1,41%
Vidrio Plano	0,29%
Vidrio Frascos y Otros	1,59%
Hojalata	0,30%
Aluminio	0,15%
Chatarra	0,54%
Platos y Envases Desechables	1,36%
Papel Higiénico	2,45%
Pañales Desechables	3,54%
Icopor	0,10%
Bateria Carros	0,11%

Pilas	0,04%
Esmaltes	0,01%
Medicamentos	0,12%
Tarro de Pintura	0,10%
Tarros de Aceite	0,03%
Huesos	0,10%
Residuos Hospitalarios	0,79%
Otros no Clasificados	6,03%
Empaques	0,37%
Escombros y Tierra	2,07%
Vasijas de Pasta y Loza	0,07%
Fibras Sintéticas	0,37%
Cenizas	0,06%
Aserrín	0,05%
Radiografías	0,01%
Residuos de Taller	0,11%
Alambre	0,01%
Total	100,00%

Nota. La tabla muestra la caracterización física de los residuos en el relleno sanitario de Villavicencio. Los residuos más representativos son los de comida (38,06%) y los orgánicos de plaza (13,90%), seguidos por bolsas plásticas (8,11%) y residuos de jardín (5,46%). Otros materiales, como papel, cartón y pañales desechables, tienen una menor presencia. Autor

Biodegradabilidad de los Residuos Sólidos

Para lograr estimar la producción del biogás para un relleno sanitario, según Tchobanoglous se requiere tener en cuenta la clasificación de los residuos de origen orgánico que se pueden degradar rápida y lentamente, teniendo en cuenta la tabla de resultados del estudio de caracterización física de los residuos del relleno sanitario.

Igualmente, con base a la composición física de los residuos, se determina el grado de humedad de estos, así como su peso. Se tiene en cuenta los componentes biodegradables con

degradación rápida y lenta, igualmente se considera el cálculo de la fracción seca de los residuos, al igual que la fracción de origen orgánico con su respectiva distribución porcentual que caracteriza los residuos sólidos que ingresan al relleno sanitario de Villavicencio, es importante para el cálculo de volúmenes medir la composición molar de los elementos basados en la rápida o lenta degradación.

Tomando las variables enunciadas anteriormente, se inicia con el proceso del cálculo de producción del biogás, por cada una de las zonas de disposición final que conforman el relleno sanitario de Villavicencio. Por lo tanto, se determina la producción de biogás con una frecuencia anual.

Figura 18

Producción de Biogás Zona I



Autor. Autoría Propia

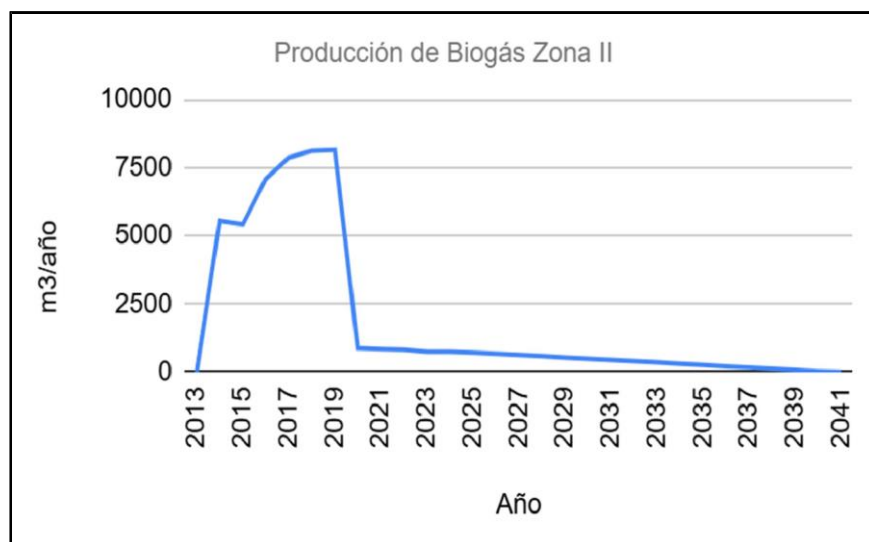
Figura 19*Producción de biogás Zona II**Nota. Autoría Propia***Figura 20***Producción de Biogás Zona III**Nota. Autoría Propia*

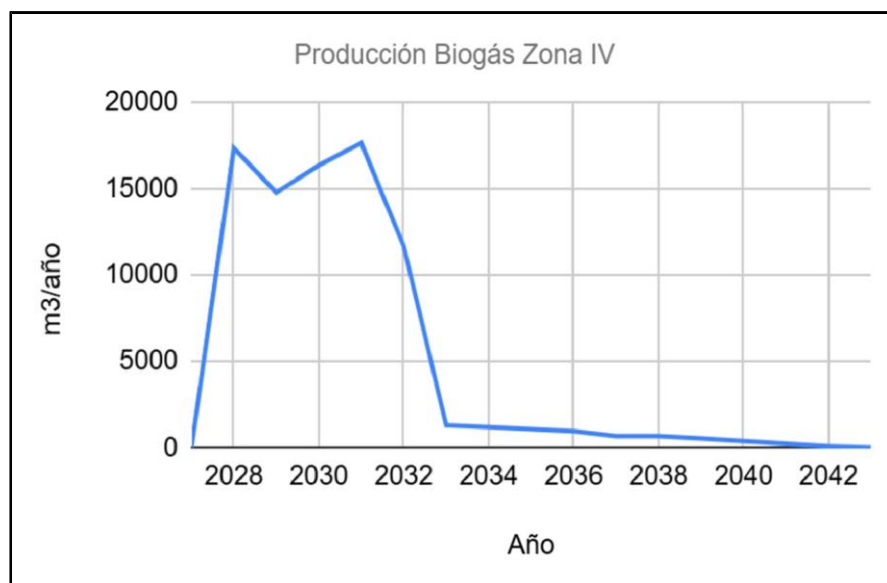
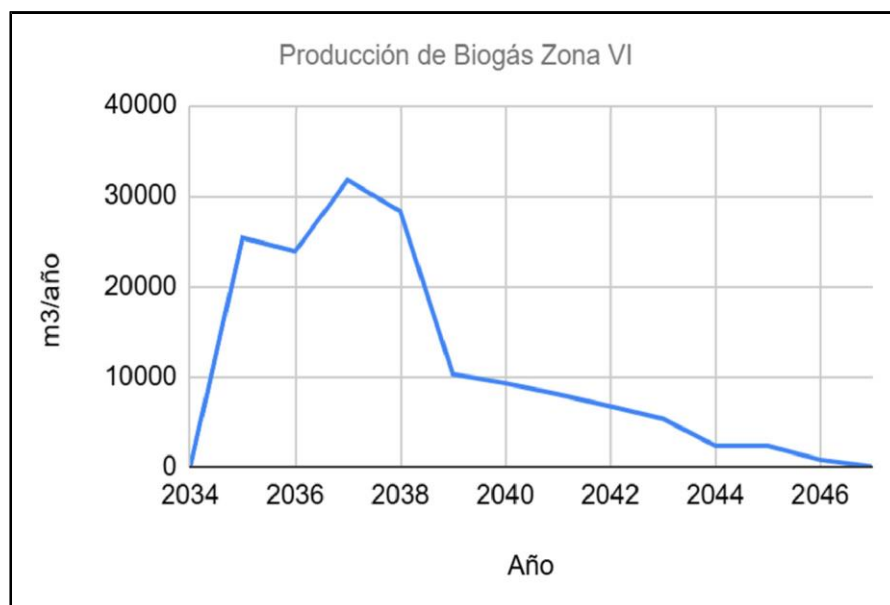
Figura 21*Producción de Biogás Zona IV**Nota. Autoría Propia***Figura 22***Producción de BIOgás Zona V**Nota. Autoría Propia*

Figura 23*Producción de Biogás Zona VI**Nota. Autoría Propia***Tabla 5***Producción de Biogás del Relleno Sanitario de Villavicencio (m³/año)*

Producción de Biogás del Relleno Sanitario de Villavicencio (m³/año)						
Año	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Zona V	Zona VI
2008	20.136					
2009	17.135					
2010	18.843					
2011	20.929					
2012	13.355					
2013	1.293					
2014	1.188	5.540				
2015	1.072	5.419				
2016	941	7.069				
2017	668	7.852				
2018	668	8.099				

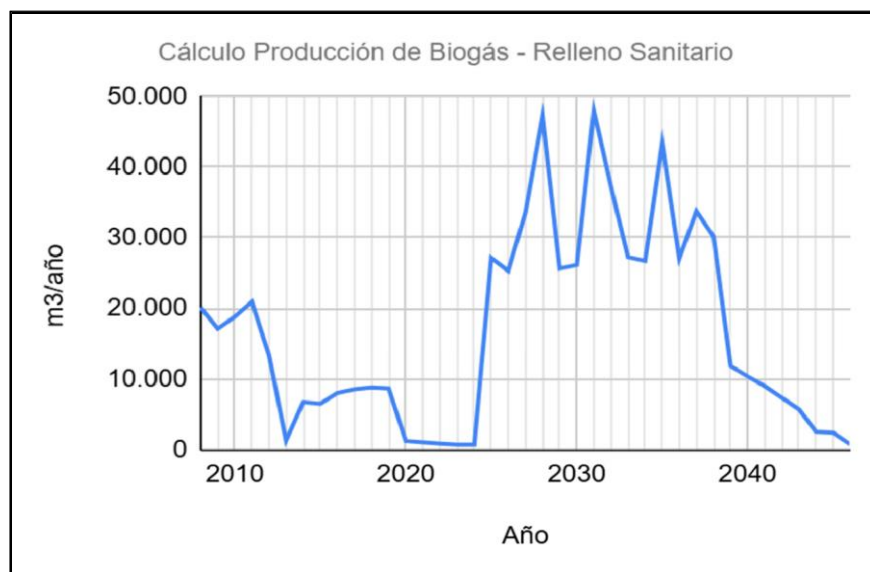
2019	526	8.126				
2020	378	867				
2021	226	841				
2022	74	815				
2023		741				
2024		741				
2025		704	26.411			
2026		662	24.619			
2027		620	32.987			
2028		578	29.113	17.361		
2029		531	10.270	14.817		
2030		489	9.272	16.372		
2031		442	8.068	17.671	21.723	
2032		399	6.738	11.684	18.454	
2033		352	5.324	1.293	20.251	
2034		305	2.334	1.188	22.869	
2035		258	2.334	1.072	14.307	25.339
2036		210	783	941	1.293	23.820
2037		168		668	1.188	31.762
2038		121		668	1.072	28.314
2039		74		526	941	10.270
2040		26		378	668	9.272
2041				226	668	8.068
2042				74	526	6.738
2043					378	5.324
2044					226	2.334
2045					74	2.334
2046						783

Nota. La tabla muestra la producción de biogás en el Relleno Sanitario de Villavicencio por zonas y años. Se observa que la producción en la Zona I disminuye significativamente con los

años, mientras que, a partir de 2025, la Zona III comienza a generar grandes volúmenes. La Zona VI también presenta incrementos significativos en los últimos años proyectados. Autor

Figura 24

Calculo Producción de Biogás - Relleno Sanitario



Autor. Autoría Propia.

Debido a lo anterior, se puede concluir que la producción de biogás en el Relleno Sanitario de Villavicencio, el pico más alto de producción se presentará en el año 2031 con un volumen de 47.903 m³/año, seguido por el año 2028 con 47.052 m³/año y el año 2035 registra un volumen de 43.309 m³/año.

Así mismo, los volúmenes de producción de biogás más bajos se presentaron para el año 2023 y 2024 con 741 m³/año, el año 2046 783 m³/año y el año 2022 con 888 m³/año.

En el cálculo realizado, se tuvo en cuenta el tiempo desde el inicio de operación del relleno sanitario, correspondiente al año 2008, generando volúmenes de biogás por un tiempo determinado de 39 años, lo que indica producción hasta el año 2046, por lo tanto, se estima un

volumen total a generar de 651.665 metros cúbicos de biogás, la cual posee un gran potencial de aprovechamiento.

Análisis de Resultados: Evaluación de Tecnologías para el Tratamiento, Aprovechamiento y Valorización del Biogás del Relleno Sanitario de Villavicencio

En el mercado internacional encontramos una gran variedad de tecnologías que se pueden acondicionar a las características del biogás que se produce en el Parque Ecológico Reciclante (PER), para su respectiva valorización como fuente de calor, generación de energía eléctrica y combustible para vehículos con combustión a gas. Es importante resaltar que a nivel nacional el desarrollo de este tipo de proyectos enfocados al tratamiento y aprovechamiento del biogás producto de los rellenos sanitarios ha sido muy limitado, debido principalmente a la falta de regulación en el sector del servicio público de aseo.

Cada una de éstas alternativas de aprovechamiento y transformación del biogás presenta sus ventajas y desventajas, en relación a la posibilidad de emplearla como fuente de calor, encontramos un potencial interesante para ser valorizado dentro de las instalaciones del Parque Ecológico Reciclante (PER) en procesos de tratamiento de residuos sólidos, con el fin de disminuir la humedad de los mismos o generar madera plástica y todos sus subproductos; sin embargo, la viabilización de este método de aprovechamiento del biogás dependerá de otros proyectos enfocados al tratamiento de residuos sólidos que se reciben en el Parque. Igualmente, se limita al uso de la fuente de calor únicamente dentro de las instalaciones del predio de la empresa de aseo, dado que a sus alrededores no se existe industria, lo que imposibilita la comercialización externa de dicha fuente.

El biogás posee un gran potencial para la generación de energía eléctrica, por lo tanto existe una gran posibilidad de negocio, para el desarrollo de este tipo de proyecto encontramos en el mercado equipos compactos que brindan una solución rápida y eficaz, obteniendo como producto final energía eléctrica, éste tipo de tecnologías tienen un coste importante lo que en

muchas ocasiones impide la implementación de proyectos de biogás en los rellenos sanitarios en Colombia, debido a la riqueza en el recurso hídrico en nuestra nación, aprox. el 70% de la energía utilizada proviene de fuentes hídricas, por lo tanto comercialmente la generación de energía eléctrica a través del proceso de aprovechamiento del biogás puede tener alguna dificultad financiera, debido a las altas tasas de inversión a capital por concepto de adquisición de equipos especializados amigables ambientalmente para hacer la respectiva generación de la energía a base del biogás, que se produce en los rellenos sanitarios.

Otra alternativa de aprovechamiento del biogás corresponde a la generación de combustible para vehículos, al realizar la investigación respecto a esta tecnología nos encontramos algunos aspectos claves a tener en cuenta, el proceso de purificación y limpieza del biogás debe ser muy riguroso, debido a la características especiales de los vehículos, dado que cualquier partícula no deseada podrá generar graves daños al automotor, por otro lado se debe comprimir el gas ya tratado, actividad que se torna costosa, debido a la implementación de equipos especializados.

Análisis de Resultados: Selección de Técnicas para llevar a cabo el Tratamiento, Aprovechamiento y Valorización del Biogás del Relleno Sanitario de Villavicencio

Dado el contexto de ubicación geográfica del Parque Ecológico Reciclante (PER) y debido a la características de infraestructura y operación del relleno sanitario regional ubicado a 18 kilómetros del casco urbano de la ciudad de Villavicencio, adicionalmente teniendo en cuenta el análisis de las tecnologías accesibles para ser implementada en el sitio de disposición final y de esta manera generar un proceso de transformación, aprovechamiento y valorización del biogás que se genera en las respectivas celdas de disposición final.

Se debe llevar a cabo un proceso de unificación de los ductos verticales de desgasificación que se encuentran en las celdas de disposición final cada 33 metros, para ello es necesario contemplar algunas subestaciones de bombeo del biogás extraído, dado que el sistema de extracción del biogás pasaría de pasivo a un proceso activo.

Posteriormente, se debe conducir el biogás a un solo punto, para realizar los procesos de decantación de líquidos, disminuyendo considerablemente la humedad, monitoreo del caudal, limpieza, purificación y retiro del dióxido de carbono con el fin de lograr obtener un biometano, con una concentración superior al 80% de presencia de metano; el dióxido de carbono separado se podrá someter a un proceso de biorreactor con el fin de realizar un proceso de fotosíntesis, mediante un cultivo de microalgas y de esta manera liberar oxígeno.

Logrando todo el proceso anterior, el biogás se podrá utilizar en dos vías, la primera como fuente de calor para la implementación del proyecto de obtención de combustible derivado de residuos (CDR) que se encuentra en ejecución dentro de las instalaciones del Parque Ecológico Reciclante (PER) y la segunda opción es la generación de energía eléctrica para la comercialización y uso dentro del parque, para la implementación de proyectos tecnológicos que

requiera garantizar la estabilidad de la generación de energía y adicional que sea amigable ambientalmente.

Las anteriores recomendaciones, se fundamentan en todo el proceso de investigación realizado a lo largo del desarrollo del presente proyecto de grado, con el firme propósito de generar una hoja de ruta para los demás sitios de disposición final en Colombia y que esté tipo de proyectos se conviertan en una alternativa para industrializar los rellenos sanitarios y lograr mayor desempeño financiero para garantizar el debido proceso de infraestructura y operación de éstos lugares que generan una solución sanitaria al manejo de los residuos sólidos no aprovechables que se producen diariamente por la humanidad.

**Análisis de Resultados: de Factibilidad y Viabilidad para el Tratamiento,
Aprovechamiento y Valorización del Biogás del Relleno Sanitario de Villavicencio**

El sistema de evacuación de gases corresponde a una extracción activa a través de un ducto de desgasificación, el cual consiste en la construcción de un gavión de un metro cuadrado de base con una longitud vertical necesaria para superar la altura de la masa de residuos, empleando tubería en polietileno de alta densidad de 200 mm, debidamente perforado cada 0,10 m y con un diámetro de una pulgada.

Figura 25

Sistema de Evacuación de Gases



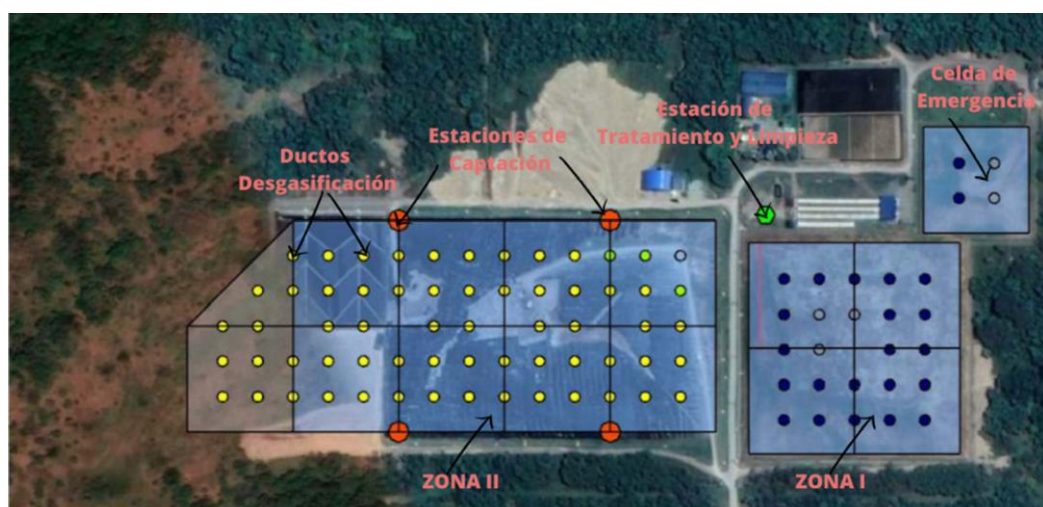
Nota. Autoría Propia

Durante la etapa de operación, dichos ductos serán conectados temporalmente a colectores en tubería en polietileno de alta densidad de una pulgada, que van a su vez interconectados a una estación de bombeo y por medio de un equipo de succión, permite extraer el biogás presente en la masa de los residuos.

Posteriormente, es conducido por medio de tubería en polietileno de alta densidad de 50 mm de diámetro, hasta la estación de tratamiento del biogás, para su posterior aprovechamiento y/o quema controlada en la respectiva tea.

Figura 26

Imagen - Áreas de Operación



Nota. Google maps.

Actualmente el Relleno Sanitario Parque Ecológico Reciclante - PER está compuesto por 3 áreas; la celda de emergencia consta de una extensión de una (1) hectárea, allí se dispusieron 102 mil toneladas de residuos en la vigencia del año 2007, donde actualmente existen 2 ductos de desgasificación.

La zona I posee un área de 4 hectáreas, la cual estuvo en operación desde el año 2008 hasta el mes de junio de 2013. En esta zona, se dispusieron 720 mil toneladas de residuos y se cuenta con 21 ductos de desgasificación.

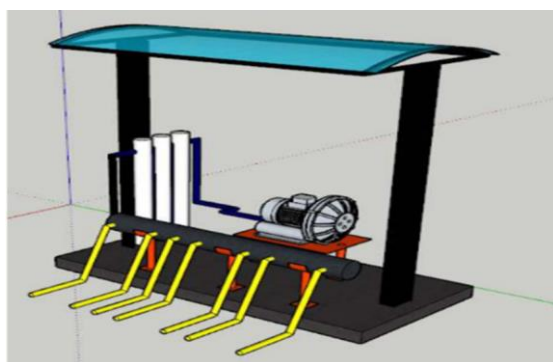
Desde el mes de julio de 2013 a la fecha, se tiene en operación la zona II, en la cual se han construido 8 de 10 celdas proyectadas, permitiendo la disposición de 2,29 millones de toneladas de residuos. Asimismo, se han construido 52 ductos de desgasificación y, se

proyecta un total de 59 ductos para la zona II. En los laterales de dicha zona, se cuenta con 4 estaciones de succión y bombeo de biogás, cada una de ellas tiene una capacidad de conexión para 15 ductos de desgasificación y desde allí se conduce el biogás a la Estación de Tratamiento y Limpieza.

Se desarrolló dentro del Parque Ecológico Reciclante - PER, el proyecto de gestión del biogás, que consiste básicamente en el proceso de captación, conducción, tratamiento y aprovechamiento del biogás que se genera en la etapa de operación y en las zonas clausuradas del Relleno Sanitario. Se espera seguir trabajando en función de lograr una valorización de dicho subproducto en el marco de la economía circular.

Figura 27

Estación de Succión Y Bombeo



Nota. Autoría Propia

Figura 28*Estaciones de Succión y Bombeo de Biogás**Nota. Autoría Propia.*

Como parte del control interno, se realiza el seguimiento de los resultados obtenidos con el fin de establecer el período activo de cada una de las zonas usadas para la disposición final de los residuos para el respectivo estudio y aprovechamiento del biogás. El sistema de captación activa se realiza por medio de la unificación de los ductos de desgasificación que confluye a su vez a la estación donde se realiza un tratamiento previo con un sistema de limpieza para la retención de gases y trazas contaminantes, con el propósito de obtener un biogás de mayor concentración de metano.

Con el fin de seguir fortaleciendo el proyecto de aprovechamiento de biogás que se ha venido implementando al interior del Parque Ecológico Reciclante - PER y con miras a emplearlo como fuente de calor en el proceso de tratamiento de residuos sólidos ordinarios, con el fin de obtener combustible derivado de residuos (CDR), se realizaron conexiones de ductos de desgasificación correspondientes a la zona II al actual sistema de captación,

conducción y recolección de biogás, incrementando así el caudal de biogás, el cual será sometido al proceso de limpieza y purificación para su posterior aprovechamiento.

Figura 29

Planta Purificadora de Biogás a Biometano



Nota. Autoría Propia

Actualmente, el proyecto de gestión de Biogás en el PER, se encuentra en la fase de acondicionamiento de la infraestructura, con el fin de conectar el 100% de los ductos de desgasificación existentes en la zona II, los ductos de la zona I y de la celda de emergencia ya se encuentran conectados (con estas dos áreas se hizo la prueba piloto).

De igual manera, se sigue buscando alternativas para el aprovechamiento del biogás; inicialmente se tiene establecido aprovecharlo como fuente de calor para un proceso tratamiento de residuos sólidos en el PER, con el propósito de obtener un combustible derivado de residuos (CDR) y de esta manera aportar al cumplimiento de los ODS.

Figura 30

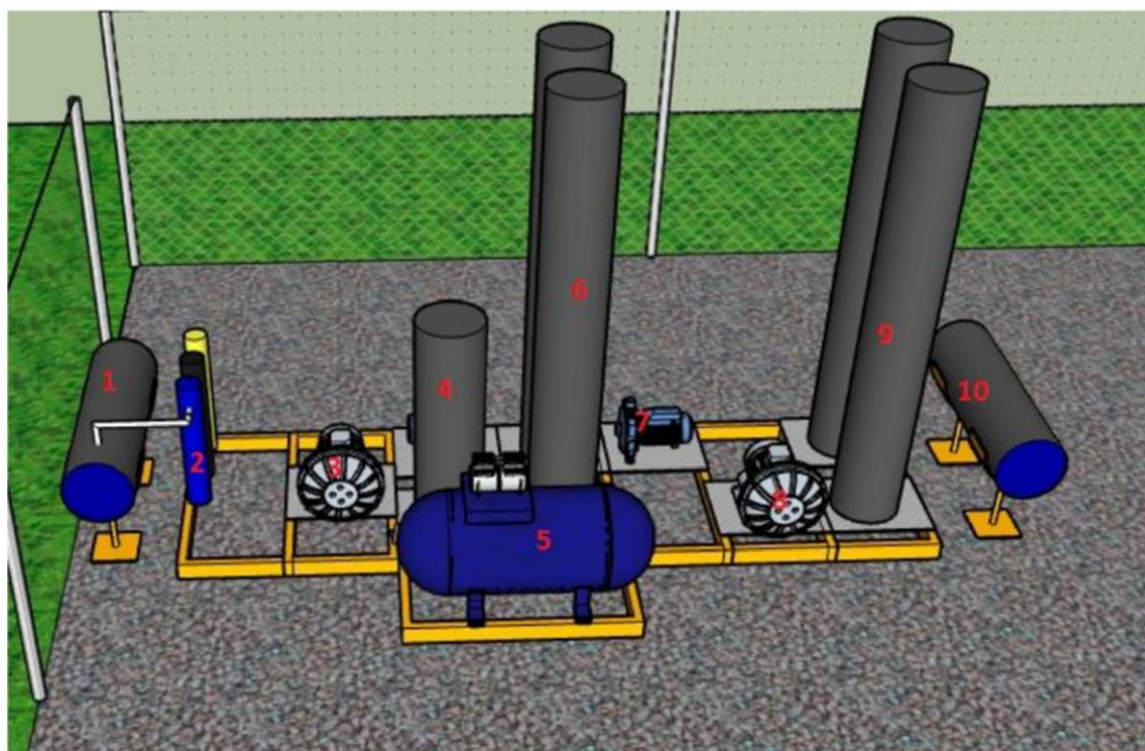
Planta Purificadora de Biogás a Biometano



Nota. Autoría Propia

Descripción General de funcionamiento de la planta purificadora de biogás a biometano Figura 31

Planta Purificadora de Biogás a Biometano



Nota. Autoría Propia.

Parte 1 Tanque colector, este tanque recibe los ductos provenientes de las celdas de disposición final, conduciendo el biogás y reteniendo partículas de condensado, hace conexión con los prefiltros.

Parte 2 Prefiltros, este conjunto de contenedores permiten retener el ácido Sulfhídrico siendo tamizados a través de Zeolita, carbón activado y agua, que a su vez cumple la función de arrestallamas, hace conexión con el blower (turbina).

Parte 3 Blower (turbina), este dispositivo hace presión negativa (succión), aspirando el biogás desde las celdas de disposición final, hace conexión con el tanque Flash.

Parte 4 Tanque Flash, este tanque retiene temporalmente el biogás aspirado por el blower, con el fin de suministrar gas suficiente para la aspiración del compresor, además retiene condensados que hayan pasado en el proceso de aspiración, en caso de no hacer el proceso de purificación del biogás, se puede hacer la transferencia del biogás por un ducto hasta la Tea de quemado, hace conexión con el compresor y tea de quemado.

Parte 5 Tea de quemado, este dispositivo permite quemar el biogás mediante un quemador atmosférico, el biogás no purificado es quemado por condiciones de mantenimiento de la planta de purificación ó por excesos de biogás, el uso de esta tea es opcional y manual.

Parte 6 Compresor, este equipo comprime el biogás a presión máxima de 80 psi, este equipo es un compresor reciprocante de grado medicinal, es decir no está lubricado por aceite, lo que garantiza que el biogás no se contamine con aceites, hace conexión con el Scrubber (tanque de lavado de biogás).

Parte 7 Tanque de lavado de Biogás (Scrubber) este tanque está construido en polietileno de alta densidad, es un tubo de 12" RDE 11 con tapones de alta presión, soldados por el método de soldadura a tope, allí se hace el lavado del biogás, con el fin de remover el Co₂ presente, este proceso se hace permitiendo el ingreso del biogás a baja presión y en una segunda etapa se adiciona agua a alta presión, lo que permite arrastrar el Co₂ contenido en el Biogás al agua, en este momento el Biogás se transforma en Biometano, el cual es transferido al tanque de secado, por otra parte el agua enriquecida con Co₂ es transferida al tanque desgasificador, hace conexión con el tanque desgasificador de Co₂ y tanque de secado.

Parte 8 Tanque desgasificador de Co₂, este tanque está construido en polietileno de alta densidad, es un tubo de 12" RDE 11 con tapones de alta presión, soldados por el método de soldadura a tope, allí se recibe la transferencia de agua enriquecida con Co₂, que mediante el

ingreso a alta presión asperjado por la bomba de transferencia desprende el CO_2 del agua, la cual se reutiliza en un nuevo ciclo de lavado, el CO_2 retirado se conduce al fotobiorreactor con el fin de alimentar las microalgas allí presentes.

Parte 9 Tanque de secado, este tanque está construido en polietileno de alta densidad, es un tubo de 12" RDE 11 con tapones de alta presión, soldados por el método de soldadura a tope, allí se hace el secado de biometano con el fin de eliminar la humedad resultante de su lavado, este proceso se hace pasando el Biometano a presión a través de Zeolita la cual luego de varios ciclos de secado, se regenera haciendo pasar aire caliente, hace conexión con el tanque contenedor final.

Parte 10 Tanque contenedor final, este tanque está construido en polietileno de alta densidad, es un tubo de 12" RDE 11 con tapones de alta presión, soldados por el método de soldadura a tope, allí se hace el almacenamiento del Biometano purificado contenido a presión máxima de 60 Psi, hace conexión con el medidor de vórtice (Caudalímetro).

Parte 11 Medidor de vórtice (Caudalímetro). Este es un equipo de alta precisión, que permite medir el volumen en m^3 del Biometano suministrado para uso final.

Parte 12 Tablero de control, este tablero está contenido en un cofre de ABS de 600 mm 50mm x 22 mm, de uso intemperie IP65, allí se aloja el procesador, actuadores y elementos de protección, que permiten el control de las electroválvulas, motores, ingreso de las señales de presión.

Figura 32*Planta Purificadora de Biogás a Biometano**Nota. Autoría Propia*

Dimensionamiento Básico de las Condiciones de Oferta del Relleno Sanitario y la Planta de Biogás

Es importante resaltar que el modelo implementado para la valorización del biogás que se produce en el Relleno Sanitario Parque Ecológico Reciclante - PER, se encuentra adaptado a las condiciones propias del entorno, caudales de biogás generados, caracterización física y química de residuos dispuestos, tasa de disposición diaria, temperatura, humedad, tipo del relleno sanitario, modo de operación del sitio de disposición final y régimen de lluvias.

Todo concluye en una proyección de generación de biogás y su respectiva cromatografía y la definición de la forma de aprovechamiento y valorización del biogás se procede a realizar el respectivo dimensionamiento de las tecnologías y métodos a emplear con el fin de lograr el máximo potencial del subproducto generado; información que se tuvo en cuenta en el respectivo dimensionamiento del sistema de tratamiento de biogás implementado.

El Parque Ecológico Reciclante (PER), para la vigencia del año 2025 está recibiendo en promedio 800 toneladas por día procedentes de la ciudad de Villavicencio y 30 municipios adicionales, teniendo en cuenta la caracterización física de los residuos, que corresponde a 57,42% de fracción orgánica y de acuerdo a la metodología seleccionada para determinar el cálculo del biogás, se puede concluir que se cuenta con una producción anual de 27.155 m³; por lo tanto, para hacer una analogía en cuanto a producción de energía, podríamos suplir las necesidades energéticas de aprox. 300 viviendas.

Conclusiones

El biogás que se produce en el relleno sanitario Parque Ecológico Reciclante (PER), posee un importante potencial de tratamiento, aprovechamiento y valorización.

Las tecnologías para la gestión del biogás enfocadas en el tratamiento y purificación del mismo poseen un alto costo de implementación, por esta razón hay muy pocos proyectos de esta índole implementados en Colombia.

Los proyectos de aprovechamiento de biogás deben tener una mirada holística, con el fin de lograr beneficios económicos en incentivos de bonos de carbono y mercados verdes a nivel mundial y de esta manera lograr una viabilización financiera.

Se espera que se reglamente a nivel nacional la implementación de proyectos para gestionar adecuadamente el biogás en los rellenos sanitarios, con lineamientos claros en cuanto al reconocimiento vía tarifa para este tipo de iniciativas.

En el desarrollo del presente proyecto de grado se muestra una línea de ruta que podrá emplear cualquier relleno sanitario, para mejorar la gestión del biogás enfocada en oportunidad de negocio y mitigación de pasivos ambientales.

Mediante el desarrollo del programa de la maestría adquirimos elementos fundamentales en gerencia de proyectos, lo cual permite obtener un mejor análisis de riesgos y oportunidades en las problemáticas reales de la sociedad.

A lo largo del desarrollo del proyecto de grado pudimos aplicar lo aprendido en el proceso de la maestría en gerencia de proyectos, logrando excelentes resultados para la comunidad y empresas de servicios públicos de aseo.

Recomendaciones y Comentarios

Tras culminar este trabajo de investigación enfocado a la gestión del biogás que se produce en el relleno sanitario Parque Ecológico Reciclante (PER), se muestra una ruta clara a seguir los sitios de disposición final, para lograr la valorización de dicho subproducto.

Desde el gobierno nacional se debe incentivar la ejecución de este tipo de proyectos enfocados a la mitigación ambiental y a mejorar los esquemas de disposición final de residuos sólidos no aprovechables en Colombia.

La regionalización de los rellenos sanitarios permite la implementación de proyectos a mayor escala de aprovechamiento, transformación y valorización del biogás, dado que las tecnologías tienen un costo considerable, lo que no permite lograr una viabilización de este tipo iniciativas.

Lo que se busca desde la academia es contribuir al desarrollo regional del país, con este tipo de proyectos que sean ejecutables por empresas públicas y privadas, permitiendo generar soluciones ambientales y técnicas a beneficio de las regiones.

Referencias Bibliográficas

Barbaro, S., Bonanno, A., Boscia, M. L., Rizzo, G., & Aronica, S. (2009). *El impacto de los rellenos sanitarios en la calidad del aire de las ciudades: un modelo heurístico simple para la ciudad de Palermo*. *International Journal of Environment and Pollution*, 36(1-3), 287-304. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2009.021833>

Bioagropecuaria del Llano SA ESP. (2025). *Informe de Disposición Final*. Villavicencio - Meta:

Bio. Camargo, Y., & Vélez, A. (2009). *Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios*.

Presentado en el II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Barranquilla, Colombia. Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/276062721_EMISIONES_DE_BIOGAS_PRODUCIDAS_EN_RELLENOS_SANITARIOS

Congreso de Colombia. (2023). *Ley 2294 de 2023*.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=209510>

Constitución Política de Colombia de 1991. (1991). *Constitución Política de Colombia*.

Diario Oficial No. 109.584.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4125>

Decreto 1713 de 2002. Presidencia de la República de Colombia. (2002). *Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo y se dictan otras disposiciones*.

Diario Oficial No. 44.893.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5542>

Decreto 1505 de 2003. Presidencia de la República de Colombia. (2003). *Por el cual se*

reglamenta la elaboración de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 45.231.

https://archivo.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemas/pdf/Normativa/Decretos/dec_1505_060603.pdf

Decreto 838 de 2005. Presidencia de la República de Colombia. (2005). *Por el cual se establecen disposiciones sobre el manejo de los residuos generados en la atención en salud y otras actividades*. Diario Oficial No. 45.936. Decreto 838 de 2005 - Gestor Normativo - Función Pública

Decreto 4741 de 2005. Presidencia de la República de Colombia. (2005). *Por el cual se reglamenta la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral*. Diario Oficial No. 46.080. Decreto 4741 de 2005 - Gestor Normativo - Función Pública

Decreto 2981 de 2013. Presidencia de la República de Colombia. (2013). *Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 48.978.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=56035>

Departamento Nacional de Planeación. (2016). *Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos* (Documento CONPES 3874).

<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>

Global Methane Initiative. (s.f.). *Captura y uso del metano en la agricultura*. Global Methane Initiative. https://www.globalmethane.org/documents/ag_fs_spa.pdf

Gómez, RM, Filigrana, PA y Méndez, F. (2008). Descripción de la calidad del aire en el área de influencia del Botadero de Navarro, Cali, Colombia. *Colombia Médica*, 39 (3), 245-252.

Incremie. (2018). *Estudio de Factibilidad para el Aprovechamiento del Metano en el Relleno Sanitario Municipal Saltillo, Coahuila*. Saltillo: Incremie

Ingeplanet & Bioagropecuaria. (2017). Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos. Villavicencio

- Meta: Bioagropecuaria del Llano SA ESP.

IPCC. (1996). Revised IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Workbook,

22. Ley 99 de 1993. Congreso de la República de Colombia. (1993). *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.* Diario Oficial No. 41.146.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297> Ley 2811 de 1974. Congreso de la República de Colombia. (1974). *Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.* Diario Oficial No. 34.243.

<https://cvc.gov.co/sites/default/files/Normatividad/Nacional/Leyes/Decreto-Ley2811-74-Codigo-Recursos-Naturales-Renovables-y-Proteccion-Medio-Ambiente.pdf>

Ley 142 de 1994. Congreso de la República de Colombia. (1994). *Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.* Diario Oficial No. 41.433.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>

Ley 632 de 2000. Congreso de la República de Colombia. (2000). *Por la cual se aprueba el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación.* Diario Oficial No. 44.275.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=640>

Ley 697 de 2001. Congreso de la República de Colombia. (2001). *Por la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve el uso de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.* Diario Oficial No. 44.593.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4449>

Ley 788 de 2002. Congreso de la República de Colombia. (2002). *Por la cual se expiden normas en materia tributaria y penal del orden nacional y territorial, y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 45.046.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=7260>

Ley 1259 de 2008. Congreso de la República de Colombia. (2008). *Por la cual se establece el Comparendo Ambiental como instrumento de control para la protección del medio ambiente y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 47.202.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=34388>

Manosalva M.P. (2005). Estimación del flujo superficial de metano (CH₄) en las emisiones del biogás desde la zona VII del relleno sanitario de Doña Juana. Bogotá.

MCB. (20 de 10 de 2014). MODELO COLOMBIANO DE BIOGAS.

Melendi, D. (15 de enero de 2018). Mendoza.conicet.

<https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Metano.htm>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2011). *Resolución 1890 de 2011*.

https://normas.cra.gov.co/gestor/docs/resolucion_minambientevdt_1890_2011.htm

Mosher B.W., C. P. (1996). Mitigation of methane emissions at landfill sites in New England, USA. USA: Mgmt.

Morales, A. E. (2015). Estadística y Probabilidades . CHILE : Universidad Católica de la Santísima Concepción .

- Naciones Unidas. (s.f.). Objetivos de desarrollo sostenible. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Presidencia de la República de Colombia. (2017). *Decreto 1784 de 2017*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=84140>
- Presidencia de la República de Colombia. (2014). *Decreto 2041 de 2014*. https://archivo.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/7b-decreto_2041_oct_2014.pdf
- Recio, P. (2014, 29 de abril). ¿Por qué no estamos generando electricidad con la basura que se genera en Chile? *FIMA*. <https://www.fima.cl/2014/04/29/por-que-no-estamos-generando-electricidad-con-la-basura-que-se-genera-en-chile/>
- Resolución 1045 de 2003. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2003). *Por la cual se establecen los criterios ambientales para el manejo de residuos peligrosos en el país*. <https://www.minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-1045-2003>
- Resolución 1390 de 2005. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). *Por la cual se reglamenta el Registro de Generadores de Residuos o Desechos Peligrosos*. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/1390%20-%202005.pdf>
- Stege, G. A., & Dávila, J. L. (2009). *Manual del usuario: Modelo Mexicano de Biogás (Versión 2.0)*. Washington, D.C., Estados Unidos.
- Shell. (s.f.). *Gas natural: ¿Qué es y de dónde proviene?* Shell Colombia. <https://www.shell.com.co/energia-e-innovacion/gas-natural.html>

Southern California Gas Company. (s.f.). Methane and the environment. *SoCalGas*.

<https://www.socalgas.com/es/safety/methane-emissions/methane-and-the-environment>

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2018). Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos. Bogota DC: Superservicios.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2023). Informe nacional de disposición final de residuos sólidos 2022.

<https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Nacional-de-Disposicion-Final-de-Residuos-Solidos-2022.pdf>

Talyan, D. A. (2007). Quantification of methane emission from municipal solid waste disposal in Delhi. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol 50.

Vélez, C. &. (2009). II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Barranquilla: Universidad del Norte.