

Aprovechamiento y Valorización Energética del Biogás en un Relleno Sanitario |
Aprovechamiento y Valorización Energética del Biogás en el Relleno Sanitario del Parque de
Tecnología Ambiental Guayabal

Diana Marcela Chávez Ramírez

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Maestría en Ingeniería Ambiental
Pamplona, Colombia

2019

Aprovechamiento y Valorización Energética del Biogás en el Relleno Sanitario del Parque de
Tecnología Ambiental Guayabal

Director:

Jacipt Ramón Valencia

Dr. Ingeniería Química

Codirector:

Ángel Uriel García Torres

Ingeniero Mecánico

Diana Marcela Chávez Ramírez

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de

Magister en Ingeniería Ambiental

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Pamplona, Colombia

2019

Dedicatoria

Doy gracias a Dios por la oportunidad que me da cada día de adquirir conocimientos, aplicarlos en el campo laboral y ponerlos al servicio en la construcción de un mundo mejor.

A mi esposo e hijos quienes han entendido que los sueños requieren sacrificios y quienes animan día a día mi vuelo para cumplirlos.

A mis padres quienes desde su formación me han enseñado la importancia de la perseverancia para cumplir metas.

A mis hermanas, cómplices de aventuras, pero también de buenos retos.

Agradecimientos

A la Universidad de Pamplona, por ser facilitadores de este proceso a través del programa de Maestría de Ingeniería Ambiental. Los conocimientos y las experiencias adquiridas en el desarrollo de las asignaturas y el desarrollo del trabajo de investigación me ayudaron al crecimiento profesional. Gracias al Doctor Jacipt Ramón por facilitar a través de su dirección el trabajo de investigación con orientaciones claras y aportes significativos para la culminación de este trabajo.

A la empresa ASEO URBANO SAS ESP y su gerente Ángel Uriel García Torres, quien una vez más me abrió sus puertas para demostrar como cumple su visión, permitiendo desarrollar nuevos horizontes como una empresa innovadora y pionera en los proyectos de sostenibilidad ambiental.

A Omar Duarte quien me acompañó en el trabajo de investigación reconociéndole sus capacidades y cualidades como investigador.

Resumen

La disposición final de residuos sólidos en rellenos sanitarios es una de las técnicas más utilizadas a nivel mundial y especialmente en los países en vía de desarrollo. En Colombia según la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios el 94% de los residuos son llevados a rellenos sanitarios.

En un relleno sanitario se busca confinar los residuos reduciendo el área a utilizar y los impactos al ambiente, producto de la descomposición anaerobia de los residuos se generan biogás. El biogás contiene metano y dióxido de carbono, los cuales son considerados gases de efecto invernadero GEI, que contribuyen al calentamiento global.

Colombia adquirió compromisos a nivel internacional que buscan reducir las emisiones de GEI. En la Agenda internacional de la Conferencia de las partes COP 21, Colombia se comprometió a reducir el 20% de las emisiones proyectadas al 2030 y en un relleno sanitario se puede contribuir a dicha reducción a través del aprovechamiento del Biogás.

En el Parque de Tecnología Ambiental Guayabal opera el relleno sanitario donde se disponen los residuos de Cúcuta y 18 municipios más del departamento Norte de Santander. Desde el inicio de operación hasta el 2019 se han dispuesto más de 3.900.000 toneladas de residuos.

En el presente trabajo de investigación se evaluó el aprovechamiento y la valorización energética del biogás del relleno sanitario de manera que se puedan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero GEI y aprovechar el potencial del biogás para proponer fuentes de energías alternativas.

Para el desarrollo de este trabajo se realizó una evaluación de las condiciones operativas y los factores que influyen en la generación del biogás. Se realizó la proyección de generación y con base a esta generación se proponen alternativas viables para el aprovechamiento del biogás.

Teniendo en cuenta las tecnologías existentes para la valorización energética del biogás y aplicables de acuerdo a la normatividad y condiciones del mercado, se realizó la evaluación técnica, económica y ambiental, encontrando que la utilización de motores internos para cogeneración de energía eléctrica se convierte en una alternativa factible para el desarrollo del proyecto.

Finalmente a través de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se realizó la evaluación de los impactos asociados a la generación de energía a partir del biogás, encontrando una reducción importante desde el punto de vista de calentamiento global.

Nomenclatura

ACV: Análisis de ciclo de vida por sus siglas en inglés (LCA).

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

COV: Compuestos orgánicos volátiles.

IDEAM: I Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

GIRS: Gestión Integral de Residuos Sólidos.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

NTC: Normas técnica colombiana.

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2016

PTAG: Parque de Tecnología Ambiental Guayabal.

SSPD: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios República de Colombia

US EPA: Agencia de Protección Nacional de los Estados Unidos.

Tabla de Contenido

Introducción.....	1
1. Marco Teórico.....	7
1.1 Generación de Residuos Sólidos	7
1.2 Disposición Final Controlada en Relleno Sanitario	9
1.2.1 Diseño, Construcción y Operación de un Relleno Sanitario.	9
1.2.2 Método de Disposición Final.	11
1.3 Biogás	18
1.3.1 El Metano.....	19
1.3.2 El Dióxido de Carbono.	20
1.3.3 El Oxígeno.	20
1.3.4 El Nitrógeno.....	21
1.3.5 El Hidrogeno y el Monóxido de Carbono.....	21
1.3.6 Vapor de Agua.	21
1.3.7 Compuestos Traza.	21
1.4 Curva de Generación de Biogás	22
1.5 Factores que Intervienen en la Generación del Biogás	25
1.5.1 Condiciones Climáticas.	25
1.5.2 Caracterización y Composición de los Residuos Sólidos Dispuestos.....	28

1.5.3 Disponibilidad de Nutrientes y Humedad Interna de los Residuos.....	30
1.5.4 Diseño y Operación del Relleno Sanitario.....	30
1.6 Modelo Colombiano de Generación de Biogás.....	35
1.7 Opciones Tecnológicas del Uso del Biogás	36
1.8 Cambio Climático	38
1.9 Gases de Efecto Invernadero GEI	38
1.9.1 Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC).	39
1.9.2 Compromisos de Colombia en la COP 21.....	39
1.10 Energías Alternativas en Colombia	40
1.11 Análisis de Ciclo de Vida.....	41
1.12 Marco Referencial.....	42
1.12.1 Parque de Tecnología Ambiental Guayabal.	42
1.13 Marco Legal	44
1.14 Antecedentes.....	48
1.14.1 Estudios Internacionales.	48
1.14.2 Estudios Nacionales.....	51
1.14.3 Estudios Locales.....	52
2. Objetivos.....	54
2.1 Objetivo General.....	54
2.2 Objetivos Específicos.....	54

3. Metodología	55
3.1 Comportamiento de las Variables que Influyen en la Generación de Biogás	55
3.1.1 Proyección de Toneladas de Disposición Final.	55
3.1.2 Caracterización de los Residuos Sólidos.	56
3.1.3 Evaluación de Condiciones Climáticas en el Relleno Sanitario.	57
3.1.4 Condiciones de Operación del Relleno Sanitario.....	58
3.1.5 Clausura y Post-clausura del Relleno Sanitario.	58
3.2 Aplicación del Modelo Colombiano de Biogás	58
3.3 Medición de Caudales y Composición de Biogás en Campo.....	60
3.4 Evaluación Técnico Ambiental y Económica de Técnicas de Valorización Energética de la Biomasa de PTAG.....	61
3.5 Propuesta de una alternativa para la Valorización Energética del biogás de la PTAG	63
3.6 Calculo de Reducciones de Gases de Efecto Invernadero GEI, con Metodología Análisis de Ciclo de Vida.....	63
3.6.1 Fase 1. Definición del Objetivo y Alcance.	65
3.5.2 Fase 2. Análisis de Inventario.	66
3.5.3 Fase 3. Evaluación del Impacto.	66
3.5.4 Fase 4. Interpretación.	67
4. Análisis y Discusión de Resultados	68
4.1 Comportamiento de las Variables que Influyen en la Generación del Biogás	68

4.1.1 Proyección de Toneladas de Disposición Final.	68
4.1.2 Caracterización de Residuos Sólidos.	71
4.1.3 Evaluación de las Condiciones Climáticas.	74
4.1.4 Condiciones de Operación del Relleno Sanitario.....	77
4.2 Aplicación de Modelo Colombiano de Generación de Biogás	89
4.3 Mediciones en Campo de Composición y Caudales.....	98
4.4 Evaluación de Alternativas de Aprovechamiento de Biogás	110
4.4.1 Evaluación Técnica.	122
4.4.2 Evaluación Ambiental.	131
4.4.3 Evaluación Económica de las Alternativas.....	135
4.5 Análisis de Ciclo de Vida.....	139
4.5.1 Definición del Objetivo y Alcance.....	139
4.5.2 Análisis de Inventario.....	140
4.5.3 Evaluación del Impacto.	144
4.5.4 Interpretación.	145
4.6 Selección de la Alternativa.....	145
5. Conclusiones	151
6. Referencias Bibliográficas.....	153
7. Apéndices	157

Lista de Tablas

Tabla 1.1. Composición Típica del Biogás.	18
Tabla 1.2. Composición de residuos PGIRS Cúcuta.	29
Tabla 3.1 Métodos de Cálculo de Población.	56
Tabla 3.2. Parámetros Meteorológicos Estación PTAG.	57
Tabla 3.3. Parámetros de control Biogás.....	60
Tabla 4.1. Disposición de residuos PTAG.	69
Tabla 4.2 Proyección de toneladas de disposición final.....	70
Tabla 4.3. Composición de residuos sólidos en el departamento Norte de Santander	71
Tabla 4.4. Caracterización de residuos 2015.....	72
Tabla 4.5. Composición de residuos 2016.....	72
Tabla 4.6. Composición de residuos en zonas de más de 2 años de disposición.....	73
Tabla 4.7. Parámetros de medición estación meteorológica PTAG.	75
Tabla 4.8. Validación cruzada datos de precipitación.....	76
Tabla 4.9. Ensayo de permeabilidad Vaso Norte.....	80
Tabla 4.10. Resultados de estudio de estabilidad geotécnica.	87
Tabla 4.11. Información Modelo Colombiano de Biogás.	90
Tabla 4.12. Eficiencia según aspectos operativos.....	92
Tabla 4.13. Caracterización de residuos.....	94
Tabla 4.14. Resultados obtenidos en la proyección del Biogás, con el escenario No. 1.	97
Tabla 4.15. Resultados obtenidos en la proyección del Biogás, con el escenario No. 1.	97
Tabla 4.16. Composición de Biogás 2016.....	99
Tabla 4.17. Composición porcentual del Biogás.	100

Tabla 4.18. Pozos para la extracción del biogás.	112
Tabla 4.19. Componentes contaminantes en los proyectos de aprovechamiento.	115
Tabla 4.20. Métodos de eliminación de agua.	115
Tabla 4.21. Métodos para eliminación de H ₂ S.	116
Tabla 4.22. Eliminación de CO ₂	119
Tabla 4.23. Eliminación de siloxanos.	120
Tabla 4.24. Especificaciones de calidad mínimas para redes aisladas.	126
Tabla 4.25. Especificaciones de calidad mínimas adicionales para biogás proveniente de residuos industriales o urbanos en redes aisladas.	126
Tabla 4.26. Especificaciones de calidad del Biometano.	127
Tabla 4.27. Motores de combustión interna.	129
Tabla 4.28. Análisis de motores para combustión interna para biogás.	130
Tabla 4.29. Elementos necesarios para ejecutar el proyecto de aprovechamiento de biogás con motores de combustión interna.	134
Tabla 4.30. Cálculo de inversiones proyecto de generación de electricidad.	135
Tabla 4.31. Resultados evaluación económica proyecto generación de electricidad.	137
Tabla 4.32. Evaluación económica.	139
Tabla 4.33. Análisis de Inventario LCA.	141
Tabla 4.34. Resultados del Escenario No. 1.	144
Tabla 4.35. Resultados en el Escenario No. 2.	145

Lista de Figuras

Figura 1.1. Diseño del sistema de evacuación de gases.	14
Figura 1.2. Rangos de explosividad del metano al mezclarse con oxígeno.	19
Figura 1.3. Evolución en la Composición del Biogás.	23
Figura 1.4. Composición de residuos sólidos principales ciudades de Colombia.	28
Figura 1.5. Foto aérea PTAG.	43
Figura 3.1. Modelo LanGEM, EPA 2005.	59
Figura 3.2. Diagrama de Evaluación Económica	62
Figura 3.3. Diagrama ACV ISO 14040.	64
Figura 3.4. Fases para el análisis de ciclo de vida.	65
Figura 4.1. Zonas de disposición relleno sanitario PTAG.	78
Figura 4.2. Generación de lixiviados 2017.	81
Figura 4.3. LandShark para evaporación de lixiviados.	82
Figura 4.4. Perforación de pozos proyecto MDL Biogás.	84
Figura 4.5. Equipos del proyecto de extracción y combustión de Biogás.	94
Figura 4.6. Curva de generación de Biogás con 73% de eficiencia.	98
Figura 4.7. Chimeneas de proyecto Bionersis.	99
Figura 4.8. Campana para captura de muestra de Biogás.	101
Figura 4.9. Campana y cabezal para análisis de biogás.	103
Figura 4.10 Pruebas de extracción.	107
Figura 4.11. Uso del biogás en el servicio público de gas combustible.	123

Figura 4.12. Resultados del modelo colombiano de biogás con mejora de la cobertura final de la celda de disposición final.129

Figura 4.13. Fases para la formulación de un proyecto de Biogás.....148

Lista de Apéndices

Apéndice 1. Datos de Precipitación	157
Apéndice 2. Mapa de Evaporación Multianual.	158
Apéndice 3. Evaluación Económica Alternativa 1.	159
Apéndice 4. Evaluación Económica Alternativa 2.	160
Apéndice 5. Evaluación Económica Alternativa 3.	161
Apéndice 6. Evaluación Económica Alternativa 4.	162

Introducción

Las mejoras en nuestro país en cuanto a la cobertura del servicio de aseo y en garantizar una disposición final adecuada de los residuos sólidos han sido sustanciales, el 94% de los residuos que son presentados al servicio de aseo, son dispuestos en rellenos sanitarios y el 6% restante son llevados a botaderos clandestinos. Los botaderos se presentan todavía en municipios donde por ubicación y estados de sus vías no tienen facilidades para llevar sus residuos hasta un relleno sanitario regional. (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [SSPD], 2015).

Según el Departamento Nacional de Planeación y el Banco Mundial (2015), la coberturas del servicio público de aseo en zona rural se encontraban para el año 2014 en el 80% y la cobertura del servicio en zona urbana durante el mismo año fue del 97.8%, los porcentajes restantes terminan como focos de contaminación en botaderos clandestinos, calles y las fuentes naturales, incluso existen algunos municipios que por el estado de sus vías no tienen facilidades para acceder a los rellenos sanitarios regionales. (Consejo Nacional de Política Económica y Social [CONPES], 2016).

La técnica de relleno sanitario para la disposición final es la más utilizada en países en vía de desarrollo y consiste en utilizar principios de ingeniería para confinar y asilar los residuos utilizando la menor área posible. Las actividades básicas que se desarrollan en un relleno sanitario, son la construcción de celdas para la disposición de los residuos, compactación de los residuos, control de gases, lixiviados y cobertura diaria. Esta técnica busca controlar la disposición de residuos, minimizando los daños al ambiente y afectación a la salud pública. (Ministerio de Ambiente, 2012).

De acuerdo a la Política Nacional para Gestión Integral de Residuos Sólidos CONPES 3874 de 2016, Colombia se ha impuesto nuevos desafíos en la gestión integral de residuos sólidos, encaminada a desarrollar estrategias que permitan el aprovechamiento de los residuos sólidos, teniendo en cuenta que hasta ahora se ha desarrollado un modelo económico y productivo lineal, donde se producen bienes, se consumen y se desechan como residuos, aumentando la demanda de recursos como materias primas, generando mayor cantidad de residuos.

Los residuos sólidos generados en países en vía de desarrollo son en su mayoría de origen orgánico, el efecto biorreactor que tiene un relleno sanitario sobre ellos ocasiona la generación de un proceso anaeróbico, los productos principales de este proceso son los líquidos lixiviados y los gases conocidos como biogás, ambos con características que podrían afectar la salud humana. (Colmenares y Santos, 2008).

El biogás está compuesto principalmente por metano (50-60%), dióxido de carbono (40-50%) y algunas trazas de compuestos orgánicos diferentes al metano, éstos gases son una significativa fuente de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Dávila, 2009).

De acuerdo a los estudios de gases de efecto invernadero, a pesar de que el metano (CH_4) se emite en menores cantidades que el Dióxido de Carbono (CO_2), éste se convirtió en el segundo GEI más importante, contribuyendo con un 18% al cambio climático global por su poder de atrapar calor en la atmósfera, teniendo una influencia 25 veces mayor que el CO_2 , por tal razón las reducciones de emisiones de metano pueden tener importantes beneficios en el cambio climático, especialmente a corto plazo. (Barros, Mambeli, Lúcio, Moreira, Fernandez, Rocha, 2018).

En la política Nacional de Residuos Sólidos se ha priorizado la necesidad de reducir los Gases de efecto invernadero (GEI) relacionados con la gestión de residuos. De acuerdo al inventario de

gases de efecto invernadero presentado por el IDEAM en el 2016, se estimó que el sector de residuos aporta un 8% de GEI del inventario nacional. (IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2016).

A nivel nacional e internacional se vienen adelantando una serie de acciones tendientes a mitigar la generación de GEI. El objetivo 13 de los objetivos de Desarrollo Sostenible, exige medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus repercusiones.

Para abordar este tema, Colombia se comprometió en la pasada Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), Conferencia de las Partes (COP21), a reducir el 20% de sus emisiones de GEI para el año 2030, respecto a un escenario tendencial proyectado a partir de los datos del inventario realizado por el IDEAM en el año 2012. Así mismo, la reducción contempla una serie de planes y programas que crean metas sectoriales con verificación en el año 2020 y 2025, que ayudarán a darle cumplimiento a este compromiso. (García, Vallejo, Lou, y Escobar, 2016).

En Colombia a través de la Política Nacional de Cambio Climático (PNCC) emitida por el Ministerio de Ambiente en el 2016, se busca avanzar en una senda de desarrollo resiliente al clima y baja en carbono, influyendo en las decisiones públicas y privadas más relevantes que consideren la adaptación y mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

La consolidación de esta meta de mitigación es producto del trabajo realizado por la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC), allí se construyeron 8 Planes de Acción Sectorial de Mitigación (PASm), que identificaron 100 acciones pertinentes para la reducción de GEI, una de las acciones iniciales de mitigación en el sector de residuos sólidos fue la captura y quema del biogás, sin embargo en el desarrollo de los PASm para aguas residuales y

residuos sólidos de Colombia, se estimó que esta solo era viable para rellenos con una disposición final de más de 100,000 toneladas de residuos sólidos por año. (García, Vallejo, Lou, Escobar, 2016).

Actualmente en la ciudad de Cúcuta, la empresa Aseo Urbano opera el Parque Tecnológico Ambiental Guayabal (PTAG) donde se encuentra el relleno sanitario que recibe residuos sólidos de Cúcuta y 18 municipios más del departamento Norte de Santander. En el 2018 se dispusieron en el relleno sanitario 315.863,4 toneladas de las cuales el 77% corresponden a Cúcuta, así mismo, se estima que el 85% de los residuos sólidos generados en el departamento Norte de Santander son dispuestos en este lugar. (Aseo Urbano S.A.S. E.S.P., 2018).

El PTAG desarrolló un proyecto de extracción y combustión de Biogás, el cual buscaba reducir las emisiones de GEI y negociar dichas reducciones en el mercado de los Bonos de Carbono.

Este proyecto operó durante 18 meses, entre los años 2010 y 2011, mientras estuvo vigente el Protocolo de Kioto; sin embargo, con la caída de los precios de los bonos de carbono, la empresa extranjera que operaba el sistema dejó de funcionar y quedó en el relleno toda la infraestructura instalada. Desde ese momento hasta la fecha, los gases nuevamente son emitidos de manera directa a la atmósfera.

Aseo Urbano S.A.S. E.S.P. en cumplimiento de las política de sostenibilidad ambiental y buscando cumplir con los lineamientos nacionales para la reducción de emisiones de GEI, incluyó dentro de sus líneas de proyectos específicos, el aprovechamiento del biogás producido en el relleno sanitario, por lo cual requiere adelantar el estudio de potencial aprovechamiento, determinando la cantidad y calidad del biogás mediante proyecciones y modelación, evaluando

diferentes alternativas de aprovechamiento que reduzcan las emisiones de GEI y garanticen la mejor opción en los aspectos técnicos, sociales, legales, económicos y ambientales.

De acuerdo a Kreith y Tchobanoglous (2002) los beneficios económicos y ambientales de la recuperación y aprovechamiento del Biogás son amplios y se pueden mencionar:

- Reducción indirecta del GEI, la producción de energía a partir del biogás reemplaza la utilización de recursos no renovables como el carbón, en el caso específico de Cúcuta se reduciría la carga energética de la Central Termoeléctrica “Termotasajero”.
- Reducción directa o indirecta de otros contaminantes del aire: La captura y combustión del biogás mejora la calidad local del aire, ejemplo las concentraciones de compuestos orgánicos no metanogénicos NMOC, del inglés Nonmethane Organic Compound, pueden ser tóxicos y generar riesgos para la salud, en este grupo encontramos los compuestos orgánicos volátiles COV. En los procesos de limpieza del biogás se atrapa gran parte de estos gases.
- En proyectos de generación de electricidad, evitar la combustión de combustibles fósiles en centrales eléctricas reduce contaminantes en el aire, incluido el dióxido de azufre (que contribuye a la lluvia ácida), material particulado y óxidos de nitrógeno.
- Otros beneficios ambientales es que la recolección y combustión del biogás reduce los olores generados en el relleno sanitario que son causados por los sulfatos y mejora la seguridad en las estructuras de conducción evitando riesgos de explosión.
- Se obtienen algunos beneficios económicos de los ingresos percibidos por la venta del combustible o la generación de electricidad.

En el desarrollo del proyecto se realizaron las siguientes etapas: Evaluación del comportamiento de las variables que influyen en la generación del biogás obteniendo recomendaciones técnicas que permitan maximizar la calidad y cantidad del biogás. Se realizó

las proyecciones del potencial de generación del Biogás con el modelo Colombiano creado por LMOP (Landfill Methane Outreach Program).

Luego se realizó la evaluación técnica, económica y ambiental de dos tecnologías que se vienen utilizando para el aprovechamiento del biogás como es la cogeneración y la utilización del biogás como combustible directo.

Con los resultados obtenidos se seleccionó la generación de energía eléctrica como la alternativa viable para desarrollar en el Parque de Tecnología Ambiental Guayabal y que puede ser aplicada en otros rellenos sanitarios del país. Finalmente, a través del Análisis de Ciclo de Vida se calcularon las reducciones de gases de efecto invernadero GEI como instrumento de evaluación ambiental del proyecto.

1. Marco Teórico

1.1 Generación de Residuos Sólidos

El crecimiento poblacional y los hábitos de consumo han conllevado al incremento exponencial en la generación de residuos a nivel mundial, durante años el desarrollo se ha cimentado en un modelo económico de producción y consumo lineal, donde se explotan los recursos para generar materias primas que son vendidas, transformadas, consumidas y finalmente desechadas como residuos, esto genera mayor cantidad de residuos que en el mejor de los casos llegan a plantas de tratamiento y sitios de disposición final. (CONPES, 2016).

De acuerdo al informe de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD, 2015), se estimó que en el año 2014 la generación de residuos sólidos urbanos y rurales alcanzó las 13,8 millones de toneladas anuales, es decir 283 kg por persona y se proyectó que para el año 2030 se tendrá la generación de 18,74 millones de toneladas de residuos, lo que significa un incremento del 13,4% en la producción per cápita de residuos sólidos, esto representa la necesidad de un esquema de gestión de residuos sólidos que permita atender estos cambios. (CONPES, 2016).

En Colombia se han logrado avances importantes en cuanto a la gestión de residuos, con la implementación de diferentes proyectos de ley, se han logrado mejoras como la cobertura de recolección en zonas rurales del 80%, y en la cobertura de zonas urbanas del 97.8%, así mismo, se ha logrado que se dispongan adecuadamente el 94% de los residuos generados en todo el país,

pasando de tener 92 sitios de disposición de residuos en 573 municipios en el año 2009 a tener tan solo 65 rellenos sanitarios regionales atendiendo 803 municipios del territorio nacional. (SSPD, 2015, como se citó en CONPES, 2016).

Es muy común encontrar que los residuos sólidos urbanos de países de América latina y el caribe se componen en su mayoría del orgánicos, según el Modelo Colombiano de Biogás V.1 el porcentaje de orgánicos en los residuos sólidos urbanos que se disponen en los rellenos sanitarios se aproximan al 60% (Ludwig, 2009) y un ejemplo claro es la caracterización de residuos realizada en el año 2016 en el Relleno Sanitarios del PTAG, en la cual se determinó que el porcentaje de los residuos sólidos orgánicos que llegan al relleno sanitario era igual al 63,6%. (Aseo Urbano S.A.S. E.S.P., 2016).

En Colombia los requisitos mínimos de recolección y transporte de los residuos se definieron mediante el decreto 2981 del año 2013, cumpliendo con la recolección separada, estableciendo sistemas de recolección diferencia según el área de atención (rural, suburbana y centros poblados urbanos), definiendo además macro rutas, micro rutas, horarios y frecuencia de recolección, divulgación de rutas y frecuencias, cumpliendo de las normativas vigentes de almacenamiento y las características de los vehículos recolectores, esto permitió mejoras constantes en el sistema de aseo. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2013).

El siguiente desafío es incluir el modelo de consumo circular en la economía nacional, en la cual se eliminan solo aquellos residuos cuya vida útil ha finalizado y no pueden tener una nueva forma de aprovechamiento. Se requiere la inclusión de sistemas de manejo integral de residuos donde se reduzca su generación, permitiendo el aumento de la vida útil de los rellenos sanitarios.

1.2 Disposición Final Controlada en Relleno Sanitario

Según el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2017 en su título F, el relleno sanitario es un sitio técnicamente seleccionado y diseñado para confinar y aislar los residuos sólidos, utilizando principios de ingeniería, de manera que ocupen la menor área posible, controlando los gases, lixiviados y mitigando los impactos ambientales que dicha actividad puedan generar. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2012).

1.2.1 Diseño, Construcción y Operación de un Relleno Sanitario.

El diseño, la construcción y operación del relleno sanitario depende de las condiciones topográficas, condiciones geológicas, hidrogeológicas, nivel freático, tipo de material de cobertura, condiciones climáticas, entre otras, los cuáles determinaran el tipo de relleno a construir y el sistema de llenado, por ende, actualmente también se incluyen instalaciones complementarias como los sistemas de extracción de biogás, por lo cual el arreglo geométrico del relleno cobra gran importancia a la hora de diseñar los sistemas de captura. (López, 2016).

El decreto 838 del 2005 y el Título F del Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico, presenta las recomendaciones técnicas que se deben tener en la planificación, construcción y operación de sistemas de disposición final de residuos sólidos, como actividad complementaria del servicio público de aseo, mediante la tecnología de relleno sanitario, igualmente, reglamentan el procedimiento a seguir por parte de las entidades territoriales para la definición de las áreas potenciales susceptibles para la ubicación de rellenos sanitarios, incluyendo los pasos que se deben desarrollar para incluir dichas zonas en los planes de ordenamiento territorial de los municipios y los planes de gestión integral de residuos.

Según el RAS (2017), existen diferentes tipos de rellenos sanitarios, los cuales se construirán dependiendo de las condiciones topográficas y la facilidad para obtener el material de cobertura.

Los tipos de rellenos sanitarios son:

- Relleno sanitario tipo zanja o trinchera: Recomendado en zonas planas donde es fácil excavar y el material de excavación es utilizado como material de cobertura.
- Relleno sanitario tipo área: Se construye en zonas donde el nivel freático es muy próximo y no se puede realizar excavaciones. Tiene la dificultad que el material de cobertura se debe traer de otras zonas.
- Relleno sanitario tipo rampa: Se construye en zonas de ladera con pendiente moderada, realizando escalones. El material de las excavaciones de la ladera se utiliza como material de cobertura.
- Relleno sanitario combinado: Se utilizan algunos de los métodos anteriores de manera que se puedan aprovechar las condiciones topográficas del terreno.

El RAS 2017, presenta recomendaciones técnicas para la construcción y operación de los rellenos sanitarios, con la finalidad de disminuir los efectos que estos podrían ocasionar sobre el medio ambiente y la salud humana, en él se establece que debe existir un sistema para la evacuación de los gases de la masa de residuos que disminuyan los riesgos por explosión, los movimientos en masa y la disminución de olores, además se establecen controles y monitoreos de la calidad del aire debido a su constante emisión a la atmosfera.

Actualmente los rellenos sanitarios se construyen aprovechando las depresiones naturales del terreno, este tipo de construcciones disminuyen la relación existente entre el volumen de residuos dispuestos y el área que estos ocupan, por lo cual se crean zonas profundas con residuos que favorecen la producción e biogás, siempre que el lugar haya sido adecuadamente

impermeabilizado, ya que un mal acondicionamiento del terreno podría provocar la contaminación del agua subterránea con lixiviados y la migración del biogás (Martín, 1997), por tanto, algunos de los siguientes factores pueden afectar la generación del biogás:

1.2.2 Método de Disposición Final.

Basado en las condiciones topográficas, hidrogeológicas y geotécnicas encontradas, se realiza la selección del lugar de disposición final, de acuerdo a los conceptos que establece la guía metodológica del RAS 2017, los métodos de disposición pueden ser: tipo área, tipo rampa, trinchera o combinado. En el PTAG se aprovecharon las depresiones naturales de terreno para diseñar dos grandes zonas de operación llamadas vaso norte y vaso sur y se construye el relleno sanitario con el método combinado entre trinchera y área. El relleno sanitario inició operaciones en el 2001 y actualmente disponen los residuos en el Vaso Norte donde a diciembre del 2018 se habían depositado más de 3'900.000 toneladas de residuos. (Aseo Urbano, 2018).

- Sistema de impermeabilización

En el fondo de todo relleno sanitario debe tener un sistema de impermeabilización, estos consisten en capas sucesivas de arcilla y/o material geosintético diseñado para evitar la migración del biogás y de los lixiviados que se generan, evitando que se infiltren y contaminen el subsuelo y aguas subterráneas. (Kreith y Tchobanoglous, 2002). Según lo establecido en el RAS 2017, este sistema de impermeabilización debe contener como mínimo dos capas consecutivas, una en arcilla y la otra en geomembrana sintética. La capa de arcilla debe tener unos requisitos de compactación y permeabilidad de 1×10^{-6} cm/sg de conductividad hidráulica y de humedad

de 2 al 3% y la geomembrana sintética debe tener las pruebas de calidad, de resistencia química, de juntas que garantice el funcionamiento de la misma.

Las celdas del relleno sanitario del PTAG se construyeron únicamente con terreno natural de fondo, ya que se contaba con arcillas con un gradiente de permeabilidad bajo, se han realizado algunas pruebas del terreno de fondo de las celdas encontrando que las constantes de permeabilidad tienen valores de $7,92 \times 10^{-8}$ cm/seg, el valor mínimo que dispuso la autoridad ambiental fue de 10×10^{-8} cm/seg, por lo cual el fondo de la celda garantiza el sellado adecuado. (Aseo Urbano SAS ESP, 2002).

- Sistemas de drenaje

En los rellenos sanitarios se construyen diversos sistemas de drenaje entre los que encontramos: un sistema de drenaje para la evacuación de aguas de escorrentía y un sistema para la conducción de los lixiviados, además se construyen los sistemas para evacuación de gases. (RAS, 2017).

- Aguas de escorrentía

El objetivo de los sistemas de drenaje de aguas escorrentía es impedir que el agua lluvia se infiltre y llegue a la zona de operación del relleno ya que al estar en contacto con los residuos se convierten en lixiviados, generalmente se usan canales perimetrales que evitan la entrada del agua de escorrentía, disminuyendo el caudal generado de lixiviados, además de evitar la contaminación de fuentes de agua superficial por la salida de lixiviados mezclados con esta agua. (Martín, 1997).

- Drenaje de lixiviados

En todo relleno sanitario se debe proyectar la cantidad de lixiviados a generar, teniendo en cuenta la cantidad de residuos a disponer, porcentaje de material biodegradable, humedad de los residuos, densidad, capacidad de campo, método de disposición final, cobertura intermedia, tipo de material de cobertura, condiciones climáticas de precipitación y evapotranspiración; de esta manera se realiza el diseño del sistema de drenaje de los líquidos lixiviados y del sistema de almacenamiento de los mismos, garantizando que no se generen impactos ambientales. (Aseo Urbano SAS ESP, 2002).

Generalmente se construyen los sistemas de recolección de lixiviados en conjunto con las chimeneas de evacuación de gases, debido a que esta construcción garantiza que los lixiviados puedan ser transportados por toda la masa de residuos, conduciendo los lixiviados entre celda y celda hasta llegar a los tubos que llegan a las piscinas de almacenamiento. Esta interconexión horizontal le permite al operador del relleno sanitario realizar la extracción selectiva de gases o lixiviados en cualquier nivel del relleno. En los límites del vaso de disposición se instalan filtros de lixiviados, que sirven de colectores perimetrales, estos evitan que puedan presentarse fugas o “lloraderos” fuera de la masa de residuos. (Martín, 1997).

- Drenaje de gases

Las chimeneas o pozos de venteo se construyen de manera que se permita la salida de los gases que se producen en el interior de la masa de residuos. Se construyen mínimo 4 por hectárea y van desde la base del relleno sanitario, ganando altura en la medida que avanza la disposición de los residuos. Estas estructuras se construyen dependiendo del sistema de manejo de biogás a implementar, si es un sistema de pasivo, se crea una estructura de 1mx1m construida en malla de

gavión y recubiertas en piedra de 4 a 6" de manera que facilite la salida del gas. (Colmenares y Santos, 2008).

En caso de ser un sistema de manejo activo, donde existe una extracción forzada con una presión negativa, se construye de forma radial, incorporando el uso de una tubería de polietileno de alta densidad perforada, un sello anular impermeable y un cabezal de pozo según Colmenares y Santos (2008), esto se puede observar en la Figura 1.1.

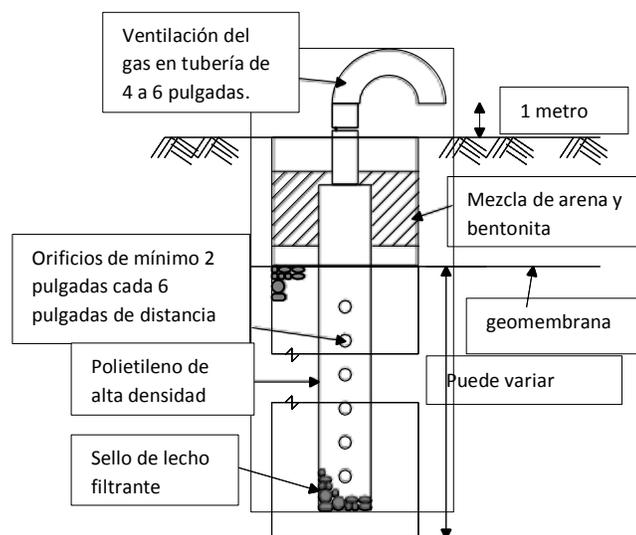


Figura 1.1. Diseño del sistema de evacuación de gases.
Fuente: Adaptado de Kreith y Tchobanoglous, 2002

La guía metodológica del RAS 2017 recomienda que para rellenos sanitarios de más de 200 Ton/día se deben construir sistemas de drenaje de gas con la infraestructura necesaria para que se pueda realizar la extracción activa del biogás sin que se generen sobre costos, existen diferentes estructuras para la evacuación de gases como lo son las chimeneas verticales, las chimeneas horizontales, y las chimeneas perimetrales. (Ministerio de vivienda ciudad y Desarrollo, 2012).

- Operación de las celdas

Las celdas generalmente se usan para describir el volumen de residuos depositados en un día de operación normal con su respectiva cobertura diaria, dicha cobertura es usada para prevenir la presencia de vectores y malos olores. Si se usan coberturas impermeables, éstas se remueven una vez se va a realizar la instalación de una terraza superior, por ende, la dimensión de las celdas depende de la cantidad de residuos a disponer, el método de disposición y el sistema de compactación. (Kreith y Tchobanoglous, 2002). Los rellenos sanitarios con compactación mecánica se recomienda que no tengan altura de celdas diarias mayores a 3,30m, y el esparcimiento de los mismos deberá realizarse en capas de máximo 0,5 metros (Ministerio de vivienda ciudad y Desarrollo, 2012).

- Compactación

Una vez los residuos sólidos son dispuestos en la celda diaria, la maquinaria pesada realiza la trituración y compactación de los residuos en capas de 0,45 m pasando de 3 a 4 veces en cada capa, hasta alcanzar la densidad de compactación mayor a 800 Kg/m³. El esparcimiento de los residuos y la compactación deben realizarse en pendiente, usualmente se realiza un estudio de estabilidad para determinar la pendiente adecuada, sin embargo, la más usada es de 1:3 (V:H), ya que se logra un mayor grado de compactación, mejor drenaje superficial y mayor estabilidad del terreno. (Ministerio de vivienda ciudad y Desarrollo, 2012).

La compactación de los residuos aumenta la vida útil del relleno sanitario, facilita el desplazamiento de vehículos sobre la masa de residuos, reduce los riesgos de movimientos en masa, evita la proliferación de vectores, disminuye la posibilidad de incendios y aumenta la

generación del biogás, sin embargo, es adecuado que se tenga un control de los niveles de compactación ya que una compactación de los residuos inferior a los 800kg/m³ podrían generar bolsas de lixiviados y de gases que desestabilizan la masa de residuos. (Martín, 1997).

- Material de cobertura intermedia

La cobertura diaria minimiza el arrastre de materiales fuera del frente de trabajo, posibilita el movimiento de vehículos, reduce olores, provoca el rápido inicio de la actividad metanogénica, reduce la entrada de agua de escorrentía y reduce el riesgo de incendios (Martín, 1997). Como mínimo el espesor de la cobertura intermedia para rellenos sanitarios con compactación debe ser de 0,3 metros, generalmente se debe usar material permeable como arena o un material pétreo, en los casos en los cuales se use un material sintético o impermeable como la arcilla, debe ser removida o adecuada antes de depositar más residuos sobre ella, permitiendo el movimiento de lixiviados y biogás de forma vertical entre los niveles de la masa de residuos. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Desarrollo, 2012).

- Cierre y uso final del relleno

Si bien los impactos ambientales durante el tiempo de operación del relleno sanitario son menores, estos se prolongan durante mucho tiempo una vez este ha sido clausurado, por lo cual es importante considerar en los costos económicos del control de lixiviados y gases durante al menos 30 años después de la clausura, sin embargo es muy común que las emisiones se prolonguen durante mucho más tiempo, la producción de metano y dióxido de carbono puede prolongarse por varias décadas. (Martín, 1997).

A continuación, se describen algunos de los aspectos más relevantes para el adecuado cierre y uso final de un relleno sanitario.

- Cobertura final

Esta es de gran importancia para la clausura y adecuación final del relleno sanitario, la calidad de la cobertura está condicionada por el uso final de la celda, consta de abajo hacia arriba de un sistema de drenaje del biogás, una zona impermeable al agua, una zona de drenaje de agua y una capa final de tierra fértil, en muchos casos se instala una doble capa impermeable. (Martín, 1997).

El grosor y material a usar en la cobertura final depende de la ubicación del relleno sanitario y la climatología local, esta cobertura debe asegurar la rápida evacuación de líquidos, evitando la formación de charcos en la superficie, contando con una pendiente mínima de entre 3 y 5%. (Kreith y Tchobanoglous, 2002).

Según el RAS 2017, este debe ser diseñado y construido de manera que cumpla con las siguientes indicaciones:

- Aislar del medio ambiente las zonas de disposición.
- Limitar la salida de gases y lixiviados evitando el ingreso de oxígeno y agua de escorrentía.
- Tener estabilidad suficiente frente a hundimientos, fisuras y deslizamientos.
- Soportar el crecimiento de la vegetación y soportar los proyectos de uso de las zonas clausuradas.

Como ya se mencionó, la cobertura final debe tener varias capas diferenciadas por su función: control de infiltración, control de erosión y control de drenaje. El relleno sanitario de la PTAG al

tener una disposición superior a las 200 toneladas de residuos, debe incluir el sistema de recolección de gases en el perfil de la cobertura final de los residuos, así mismo, se deben realizar monitoreos que garanticen la vigilancia de la estabilidad de los residuos, y la permanencia en el tiempo de los mismos sin causar futuros impactos ambientales graves. (Ministerio de Vivienda Ciudad y Desarrollo, 2012).

1.3 Biogás

El biogás está compuesto por varios gases, siendo los más representativos el metano (CH_4) y el dióxido de Carbono (CO_2), también se encuentran cantidades pequeñas de amoníaco (NH_3), hidrógeno (H_2), Nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y el ácido Sulfhídrico (H_2S), se encuentran menos del 1% de compuestos metánicos y trazas de inorgánicas (Blanco, Santaella, Verónica, y Levy, 2017).

En la tabla 1.1 se presentan las distribuciones porcentuales típicas de estos gases y las principales características; el metano y el dióxido de carbono son los gases que se encuentran en mayor porcentaje (Tchobanoglous y Kreith, 2002).

Tabla 1.1. *Composición Típica del Biogás.*

Componente	Porcentaje (base volumen seco)
Metano	45 – 60
Dióxido de carbono	40 – 60
Nitrógeno	2 – 5
Oxígeno	0,1 – 1,0
Amoníaco	0,1 – 1,0
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, etc.	0 – 1,0
Hidrógeno	0 – 0,2
Monóxido de carbono	0 – 0,2
Cantidades traza	0,01 – 0,6
Características	Valor
Contenido de humedad	Saturado

Densidad específica 1,02 – 1,06

Fuente: Tchobanoglous y Kreith, 2002.

1.3.1 El Metano.

Es el gas más importante dentro del biogás pues define su poder calorífico, es inflamable y además explosivo cuando se mezcla con oxígeno en determinadas proporciones, en teoría no deberían encontrarse trazas de oxígeno en la mezcla, pero se presentan debido a las infiltraciones ocurridas al momento de la medición o la extracción, normalmente se filtra más oxígeno a la muestra cuando se realiza extracción activa del biogás de la masa de residuos, es importante controlar el ingreso de oxígeno a la mezcla ya que se pueden producir atmósferas peligrosas. (Martín, 1997).

$$\%CH_4 = (60/21) * (21 - \%O_2)$$

La reacción del metano por presencia de oxígeno suponiendo que no se produce la oxidación del metano con el dióxido de carbono se da según la ecuación anterior y existe una recta dada por dicha ecuación la cual atraviesa la zona donde es probable que se presente explosividad, en la

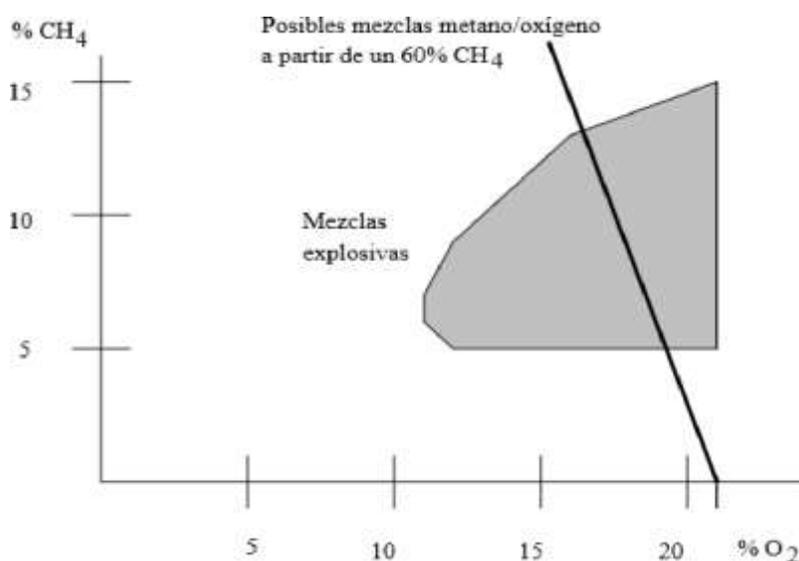


Figura 1.2. Rangos de explosividad del metano al mezclarse con oxígeno.

Fuente: Eden, 1990 como se citó en Martín, 1997.

figura 1.2 se puede observar lo mencionado anteriormente.

El poder calorífico inferior es de 35.880 KJ/m³ a condiciones normales, aproximadamente 1 m³ de biogás al 50% de metano es equivalente a 0,5 litros de gasolina; el metano no es tóxico pero puede presentar desplazamiento de oxígeno, si el oxígeno desciende a menos de 18% de concentración puede presentar problemas para la salud humana, es más ligero que el aire por lo cual es muy común que escape a la atmósfera. (Martín, 1997).

1.3.2 El Dióxido de Carbono.

Es incoloro e inodoro y puede producir accidentes por asfixia al desplazar el oxígeno de recintos cerrados. La eliminación de éste del biogás aumenta el poder calorífico del mismo, su presencia en la mezcla provoca resistencia a la auto ignición, es un agente corrosivo a altas presiones y en presencia de agua, formando ácido carbónico (H₂CO₃), provocando el descenso en el pH de la mezcla. (Martín, 1997).

La eliminación del CO₂ depende del uso que se le vaya a dar al biogás (cogeneración o combustible), generalmente cuando se trata de procesos avanzados de combustión las cantidades de CO₂ deben ser mínimas, un ejemplo de ello es que para aumentar el índice de Wobbe se debe eliminar el CO₂ ya que disminuye la densidad relativa del biogás y aumenta su poder calorífico. (Dorado, Gabriel, Gamisans, y Monroy, 2017)

1.3.3 El Oxígeno.

No es un componente normal del biogás, se encuentra en cantidades inferiores al 1%, esto debido principalmente a la presencia de aire en los residuos que recién han sido dispuestos, o en muchos casos por difusión del aire hacia la capa superficial de los residuos que tienen actividad

metanogénica baja, sin embargo, no suele subir de esa cantidad debido a la rapidez con la que se presentan las primeras fases de descomposición, así mismo, los niveles superiores al 1% se presentan en sistemas de extracción activa. (Martín, 1997).

1.3.4 El Nitrógeno.

Cuando se encuentra nitrógeno en el biogás es un determinante de la entrada de aire al relleno sanitario, generalmente causada por la mala cobertura de residuos o por un incorrecto proceso de extracción forzada. (Martín, 1997).

1.3.5 El Hidrogeno y el Monóxido de Carbono.

Se encuentran en cantidades muy pequeñas, generalmente son irrelevantes sus concentraciones en el biogás, sin embargo, el hidrogeno es muy importante en el desarrollo de las fases fermentativa acidogénica ya que puede inhibir la producción de metano, al no regular la acidez del pH. (Martín, 1997).

1.3.6 Vapor de Agua.

El biogás generalmente se encuentra saturado, lo cual provoca que al realizar procesos de extracción y disminuir su presión y temperatura este se convierta en líquido, debido a esto es necesario recolectar dicha humedad teniendo especial cuidado de los compuestos que se encuentren allí disueltos. (Martín, 1997)

1.3.7 Compuestos Traza.

Estos pueden causar daños en los equipos de extracción de biogás y tienen efectos adversos sobre el medio ambiente, especialmente sobre la atmósfera y la salud de los seres vivos, son

altamente corrosivos, en especial los compuestos halogenados, el sulfuro de hidrogeno, los organosulfurados, los organoclorados, estos se pueden generar generalmente de dos formas, los que se generan por medio de la degradación y otros debido a los residuos inorgánicos también dispuestos. (Rodrigo, 2016).

1.4 Curva de Generación de Biogás

La descomposición anaerobia de los residuos se presenta en varias fases que son descritas por Santiago Martín en su tesis doctoral, Biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos (González, 1997).

Fase I. Es una fase aerobia donde se consume rápidamente el oxígeno presente en los residuos sólidos y se produce compost y dióxido de carbono.

Fase II. Inicia la descomposición anaeróbica, donde las bacterias fermentativas y acidogénicas producen ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono e hidrógeno.

Fase III. Las bacterias metanogénicas producen metano, conocida esta como la segunda fase anaerobia. La presencia del dióxido de carbono y el nitrógeno disminuye.

Fase IV. Se produce la estabilización de la etapa metanogénica y el metano alcanza concentraciones del 50 al 60%, reduciendo la presencia de hidrógeno.

En la figura 1.3 se puede observar el comportamiento en el tiempo de los compuestos que se generan normalmente en las fases de digestión anaeróbica en un relleno sanitario, allí se puede identificar que es en la fase 4 donde la generación de metano alcanza su punto máximo, por lo cual es una etapa óptima para su captación y aprovechamiento, sin embargo, la extracción del biogás también se puede realizar mientras la curva de generación asciende.

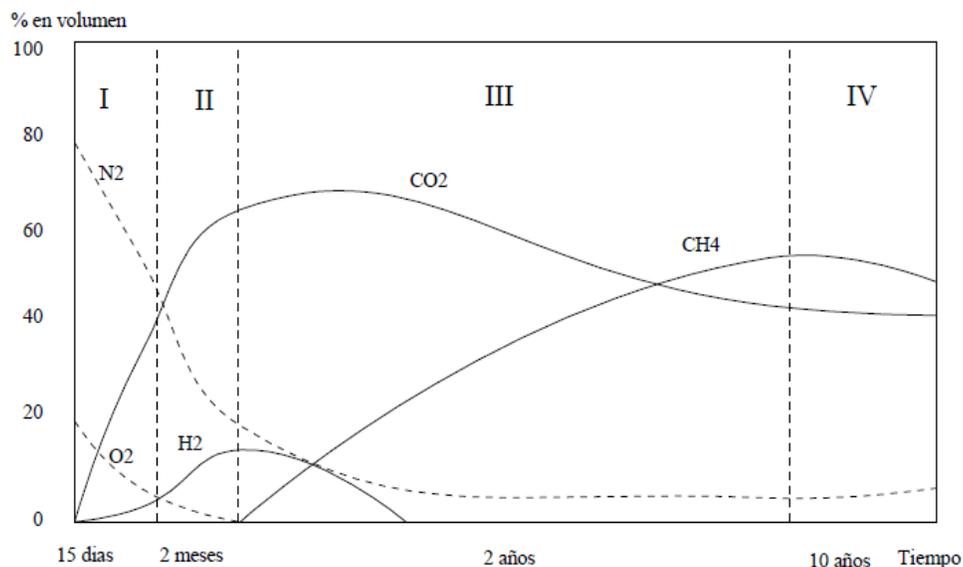


Figura 1.3. Evolución en la Composición del Biogás.
Fuente: Martín González, 1997

Vale la pena resaltar que los tiempos que duran cada fase y las concentraciones del biogás varían de acuerdo con los factores ambientales y condiciones operativas del lugar.

Según Tchobanoglous y Kreith (2002) la transformación anaeróbica de la porción orgánica de los residuos sólidos dispuestos en un relleno sanitario puede describirse mediante la siguiente ecuación:

Materia Orgánica + H₂O + Nutrientes → Nuevas Células + Materia Orgánica Resistente + CO₂ + CH₄ + NH₃ + H₂S + Calor.

Si suponemos que los productos principales de la descomposición son el metano, el dióxido de carbono, el amoníaco y el agua la reacción puede expresarse de la siguiente manera de acuerdo con Rich (1963, como se citó en Tchobanoglous y Kreith, 2002):



Un importante punto es que para llevarse a cabo requiere la presencia de agua, en rellenos sanitarios que carecen de una humedad adecuada se ha encontrado momificado papel periódico

legible después de muchas décadas, aunque la cantidad total de biogás que se produzca dependerá de la estequiometría de la reacción, el tiempo bajo el cual se realiza este proceso de descomposición depende de las condiciones hidrológicas del lugar y los procedimientos de operación del relleno sanitario. (Tchobanoglous y Kreith, 2002).

El volumen que se producirá depende también de la clasificación de los residuos orgánicos. Los cuales se dividen en dos clases: los que se descomponen rápidamente (de 3 meses a 5 años), donde encontramos desperdicios de alimentos, cartón, papel periódico y desechos de jardín; o los que se descomponen de manera lenta (hasta 50 años o más) como el cuero, caucho y madera (Tchobanoglous y Kreith, 2002).

La cantidad teórica de gas que se esperaría en condiciones óptimas a partir de la conversión de los desechos orgánicos biodegradables por degradación rápida en un relleno sanitario es de 0,75 a 0,94 m³/Kg de sólidos orgánicos biodegradables destruidos, mientras que por degradación lenta sería de 0,87 a 1 m³/Kg de sólidos orgánicos biodegradables destruidos, sin embargo, en cantidades reales se han encontrado valores típicos de 0,06 a 0,25 m³/Kg de sólidos orgánicos biodegradables destruidos, provocado principalmente porque la degradación de los residuos no ocurre a la misma velocidad. (Tchobanoglous y Kreith, 2002).

Las tasas de descomposición como ya se ha mencionado dependen de muchos factores, bajo condiciones normales, la tasa de descomposición, medida en producción de biogás, de los residuos orgánicos mezclados en un relleno sanitario, alcanza su pico máximo en los dos primeros años para luego disminuir lentamente, continuando por un tiempo estimado de 25 años o más. (Tchobanoglous y Kreith, 2002).

Si la humedad no es óptima, entre el 40 y 60%, para el proceso de descomposición, es posible encontrar materiales en su forma original después de años que fueron enterrados, es decir que, la

humedad disponible es insuficiente para permitir la conversión completa de los constituyentes orgánicos. En muchos casos la humedad no se distribuye uniformemente lo cual provoca que la generación de biogás sea de un volumen menor durante un tiempo más prolongado que el teórico, la recirculación de lixiviados ayuda a mantener alto el caudal de generación de biogás y la duración de este. (Tchobanoglous y Kreith, 2002).

1.5 Factores que Intervienen en la Generación del Biogás

La calidad y cantidad de biogás que se genere en un relleno sanitario varía según diferentes factores ambientales como: composición de los residuos sólidos, humedad de los residuos, características del sistema de operación del relleno sanitario, condiciones climáticas, sistema de extracción de biogás, entre otras; dichos parámetros deberán ser estudiados y evaluados para el desarrollo de los modelos de generación de biogás y para establecer las recomendaciones operativas que se puedan dar de manera que se mejore la calidad de la generación. (Colmenares y Santos, 2008).

A continuación, se aborda algunos de estos factores explicando la manera en que inciden en la generación del biogás, de acuerdo a los estudios que se han realizado.

1.5.1 Condiciones Climáticas.

El conocimiento de la meteorología de la zona donde está ubicada el relleno sanitario es de suma importancia, tanto la temperatura ambiente como el índice de precipitaciones influyen en la degradación anaeróbica de los residuos, generalmente desde el punto de vista de la generación del biogás es favorable el contenido elevado de humedad en los residuos, existe una relación

directa entre la humedad de los residuos y su tiempo de degradación, pudiéndose afirmar que los vertederos de zonas húmedas producen un caudal mayor de gas durante el periodo de explotación que los de zonas secas, sin embargo, una vez es clausurado el relleno sanitario, son las zonas húmedas las cuales cesan la producción de metano más rápido. (Martín, 1997).

Altos contenidos de humedad permiten que los nutrientes de la parte orgánica presentes en una zona del vertedero se trasladen a otras donde son escasas, el pH debe mantenerse en torno a 7 para que la producción de metano no se detenga, siendo beneficioso un alto nivel de humedad que permiten el movimiento de sustancias efecto buffer (sales hidrolíticamente activas) que regulan el pH, por tanto, si no hay precipitación durante un largo periodo de tiempo, las superficies del vertedero se pueden agrietar y facilitar así la entrada de aire, por el contrario al presentarse lluvias la superficie del vertedero se impermeabiliza, así mismo, cuando existe una entrada de aire se reduce poco a poco el nivel de metano dentro del biogás recuperado por efecto de la dilución. (Martín, 1997).

Las precipitaciones son la mayor fuente de humedad de un relleno sanitario, por lo tanto si existe una excesiva producción de lixiviados se deben realizar adecuaciones que minimicen el ingreso de líquidos a la masa de residuos, generalmente se construyen canales perimetrales y se realiza vibro compactación en los taludes afectados. (López, 2016). Se recomienda que se realice recirculación de lixiviados en temporadas secas para mantener la humedad en los residuos y lograr una superficie más impermeable, sin embargo, es importante controlar el nivel de humedad dentro de la masa de residuos, ya que si se aumenta el nivel de líquido dentro de las chimeneas se reduce el rendimiento de captación, por lo cual el índice de precipitaciones de la zona donde se ubica el relleno sanitario es fundamental para completar su balance hídrico y evitar problemas con los sistemas de captación. (Martín, 1997).

La temperatura ambiente es también un factor importante en la generación de biogás, así como la temperatura interna de los residuos, encontrando que si están por debajo de los 10°C o por encima de los 60°C, la producción de biogás cae rápidamente; por otra parte, dependiendo del tipo de bacterias presentes en la masa de residuos podemos encontrar diferentes temperaturas internas: para las bacterias mesófilas está de 20 a 45°C, para las termófilas entre 45 y 75°C; por ende, dentro de un relleno sanitario se han encontrado habitualmente temperaturas entre 20 y 50°C, aunque existen evidencias de temperaturas hasta de 63°C en el interior del relleno sanitario. (Martín, 1997).

La temperatura de un relleno sanitario es mayor que la ambiental, debido al tipo de reacciones exotérmicas que llevan a cabo las bacterias predominantes, sin embargo, las condiciones internas se ven influenciados por otros factores, como lo es la profundidad de la masa de residuos y la temperatura externa, ya que una combinación entre una masa de residuos poco profunda y bajas temperaturas externas, podrían detener temporalmente la actividad microbiana y por tanto la producción de biogás. (López, 2016). En resumen, la temperatura es una de las más importantes variables fisicoquímicas ya que afecta a la velocidad global del proceso, la actividad de los microorganismos, la constante de equilibrio, la solubilidad de los gases y al tipo de microorganismos presente en el medio. (Ordoñez, 2011).

El Parque Tecnológico ambiental Guayabal cuenta con estación meteorológica que permite llevar el registro diario y en línea de los principales parámetros climáticos lo que permite contar con la información de estas condiciones para alimentar los modelos matemáticos.

1.5.2 Caracterización y Composición de los Residuos Sólidos Dispuestos.

De la cantidad de materia orgánica depositada en el relleno sanitario depende la generación de biogás. Por tal razón es importante conocer la cantidad y composición de los residuos sólidos que diariamente se disponen en el relleno sanitario. (US EPA, 2016).

Se debe contar con la información estadística de los residuos depositados y realizar las proyecciones de generación durante la vida útil, para ello se tendrán en cuenta: la producción per cápita PPC, generación en kilogramos por habitante al día y proyecciones demográficas de los municipios que disponen en el relleno sanitario.

De igual manera la composición de los residuos sólidos es importante con el fin de determinar la fracción biodegradable de los residuos que se disponen.

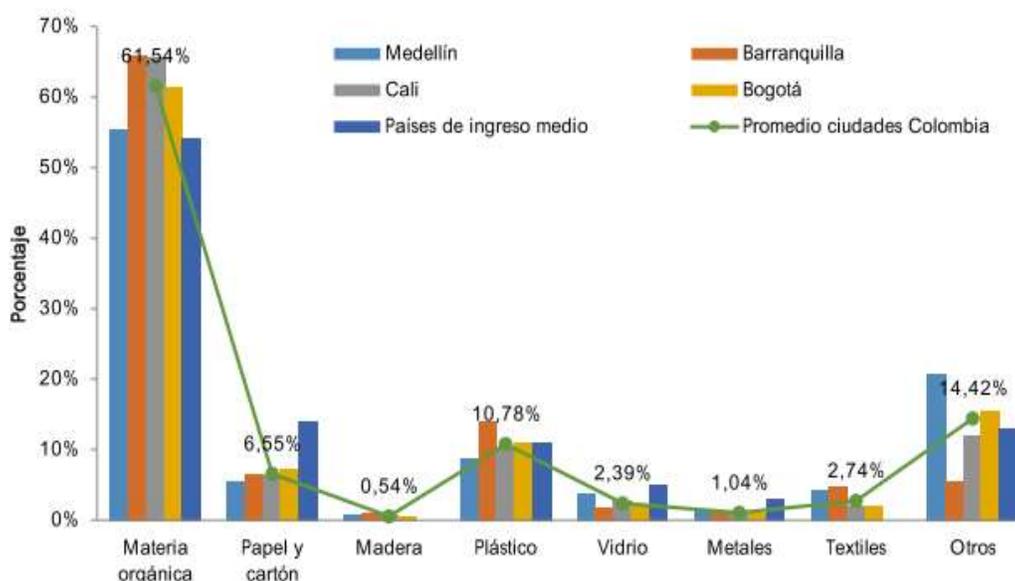


Figura 1.4. Composición de residuos sólidos principales ciudades de Colombia.
Fuente: CONPES 3874/15

En la gráfica anterior se presenta una caracterización por componentes de los residuos sólidos de las principales ciudades del país, encontrándose que en promedio la materia orgánica corresponde al 61,54% de los residuos que se disponen en los rellenos sanitarios. Se presenta

además un 6,55% de papel y cartón, madera 0,54%, plástico 10,78%, vidrio 2,39%, metales 1,04%, textiles 2,74% y otros el 14,42%. Sin embargo, para nuestro caso nos interesa conocer la materia biodegradable que corresponde al contenido de materia orgánica.

A continuación, se presenta la composición promedio de los residuos sólidos según caracterizaciones que se han realizado en el Parque Tecnológico Ambiental Guayabal, en cumplimiento del Decreto 838 de 2005, que reglamenta los monitoreos y controles ambientales.

Tabla 1.2. *Composición de residuos PGIRS Cúcuta.*

Componente	Porcentaje
Residuos de comida y jardín	60,09
Papel	1,94
Cartón	4,96
Plástico	13,09
Caucho y cuero	4,18
Textiles	4,68
Madera	1,99
Productos Metálicos	0,78
Vidrios	1,26
Cerámicas, cenizas, rocas y escombros	0,92
Huesos	0,11
Otros	3,31
Llantas	0,59
Residuos de marroquinería	2,1
Total	100

Fuente: PGIRS 2016 Alcaldía de San José de Cúcuta

1.5.3 Disponibilidad de Nutrientes y Humedad Interna de los Residuos.

La disponibilidad de nutrientes y la humedad interna de los residuos cumplen un papel fundamental en el proceso inicial de generación de biogás, las bacterias requieren de diferentes tipos de nutrientes para su adecuado desarrollo, en gran cantidad se encuentran: carbono, hidrógeno, nitrógeno y fósforo, y en menor cantidad: sodio, potasio, sulfuro, calcio y magnesio, la presencia de estos nutrientes afecta todo el proceso de generación de biogás, además el uso de suelo como cobertura de residuos ayuda a que los microorganismos implicados reciban un aporte adecuado de nutrientes. (Juárez, 2016).

Por su parte, la humedad interna es un aspecto fundamental para el inicio de la descomposición anaerobia, encontrando en residuos jóvenes un contenido de entre el 15 y el 40%, así mismo, el contenido de humedad en un vertedero está fuertemente influenciado por las condiciones climáticas, contenido inicial de humedad en los residuos y por las características de diseño del vertedero tales como la barrera de fondo, el sistema de colección de lixiviados, tipo de cobertura y las condiciones de operación del sitio. (Juárez, 2016).

Dentro de la posible composición de los residuos en un relleno sanitario se pueden encontrar sustancias capaces de inhibir el proceso de la metanogénesis, las más importantes son algunas sales, sulfuros, metales pesados y algunos compuestos orgánicos. (Rao y Suflita, 1993 como se citó en Martín, 1997).

1.5.4 Diseño y Operación del Relleno Sanitario.

El diseño, método de llenado y la operación del relleno sanitario son factores que afectan directamente la producción de biogás, por tanto, la poca profundidad de un relleno, el exceso de humedad por acumulación de lixiviados y las malas prácticas operativas pueden generar

condiciones nocivas que afectan la actividad metanogénica para la generación de biogás. (Martín, 1997).

La topografía del lugar del relleno marca el punto de partida para la selección del método de disposición a utilizar, Cuando un relleno sanitario se ha construido aprovechando las depresiones naturales del terreno, valles u hondonadas, la relación entre la superficie y el volumen depositado es baja, a su vez, esto favorece la producción de biogás ya que proporciona un aislamiento térmico y facilita la implementación de un sistema de captación, siempre que el lugar de disposición haya sido correctamente impermeabilizado. (Martín, 1997).

Sucede lo opuesto en rellenos sanitarios construidos en zonas llanas, ya que los residuos no alcanzan profundidades pronunciadas lo cual significa que la relación entre la superficie y el volumen depositado es mayor, esto provoca que el sitio de disposición se encuentre expuesto a las condiciones ambientales y la instalación de un sistema de captación sea más costoso y menos eficiente. (Martín, 1997).

Según Martín (1997) siempre que se quiera un análisis topográfico del vaso de disposición final se debe incluir el plano con las curvas de nivel iniciales y los planos de evolución de vertido, al menos año a año, de esta forma es posible dividir el relleno sanitario según la profundidad y la edad de los residuos, lo cual permite a su vez decidir la ubicación de los pozos de captación del biogás.

El mal acondicionamiento de la zona de disposición puede provocar no solamente la contaminación de aguas subterráneas, sino también la migración de biogás, ya que este gas se encuentra en constante generación y al ser más ligero que el aire se desplaza fácilmente, el lugar por excelencia para la salida del biogás es la parte superior del relleno sanitario, sin embargo,

este puede migrar horizontalmente debido a poca porosidad en la superficie del relleno y dificultar la captación. (Martín, 1997).

La forma en la cual se le da disposición final a los residuos sólidos y de los procesos que se realizan para ellos tales como las técnicas de disposición, la altura de cada capa de residuos, la trituración y compactación, el tipo de cobertura y la recirculación de lixiviados son los principales procesos que intervienen en el tratamiento de los residuos sólidos y son los que pueden afectar así mismo la generación de biogás. (Eteisa, 2006).

Las técnicas de disposición final de residuos sólidos sean por trinchera, área, rampa o combinado intervienen directamente en la producción de biogás, existen diferentes procesos operativos en una celda de disposición final, entre los que encontramos el descargue de los carros compactadores, la extensión de estos residuos y posterior compactación con maquinaria de trabajo pesado, y por último el proceso de cobertura diaria, los procesos operativos mencionados se encuentran en cualquiera de las técnicas de disposición mencionadas, con las lógicas diferencias debidas a las disposiciones geométricas ya comentadas. (Martín, 1997).

La altura de las capas de residuos se relaciona con el asentamiento que provoca la degradación de los residuos orgánicos, cuando estos asentamientos son diferenciados en distintas zonas de la celda se producen esfuerzos cortantes que quiebran las conducciones del biogás y del lixiviado, produciendo incluso grietas en la superficie de la celda, en muchos casos se indica que la altura de las capas no supere los 3 metros, aunque se recomienda que esta no sobrepase los 2,5 metros (Martín, 1997). El RAS 2017 título F, establece que para rellenos sanitarios con compactación mecanizada la altura de las capas no debe superar los 3,3 metros y que los residuos inicialmente se deben esparcir en capas de 0,45 metros, sin embargo, estos conceptos han cambiado precisamente con la posibilidad de aumentar las eficiencias en la captación del biogás.

La compactación es el proceso mediante el cual la basura depositada es aplastada por vehículos especiales, esta aumenta la vida útil de la celda al reducir los requerimientos de espacio, facilita el movimiento de vehículos, reduce el riesgo de fuegos al interior y a exterior de la celda, y por último, es un buen mecanismo para aumentar la producción de biogás. (Martín, 1997).

Si bien la compactación es un proceso operativo eficiente, su uso debe ser controlado, debido a que una masa de residuos demasiado compactada no permitiría alcanzar a los residuos la humedad necesaria para el proceso de descomposición anaerobia, pudiendo llegar a la inhibición de la producción de biogás, adicionalmente, existe una cadena de compactación que realizan los residuos previamente a ser compactados, en los que se incluye la compactación en los carros compactadores, en una celda previa a su compactación los residuos pueden tener una densidad de entre los 360 y los 450 Kg/m³. (Martín, 1997).

El RAS 2000 título F, menciona que en los rellenos sanitarios donde su disposición de residuos sea superior a las 15 toneladas diarias, la compactación se debe realizar con maquinaria pesada y siguiendo las especificaciones dadas por el diseñador, con un número de pasadas mínima de 4 por capa de residuos, hasta alcanzar al menos una densidad de 850 Kg/m³. Según Martín (1997), comprobar la densidad de compactación es tan sencillo como extraer un volumen determinado de la celda y pesarlo.

La trituración es el proceso mediante el cual las bolsas de residuos se desgarran y se trocean antes de compactarse, esta aumenta la superficie de los residuos expuesta a la actividad de las bacterias y así mismo aumenta la homogeneidad de los residuos, en la mayoría de los países donde se usan los rellenos sanitarios como técnica de disposición de residuos estos son recolectados en bolsas plásticas, por tanto en el proceso de trituración se deben romper las

bolsas, de lo contrario la producción de biogás puede decrecer, el proceso de trituración facilita la acción biológica, puede producir una fase inicial acida más intensa retrasándose la metanogénesis, a largo plazo, no obstante tiene un efecto positivo ya que al existir una homogeneidad de los residuos la fase metanogénica se da con más fuerza. (Martín, 1997).

La cobertura de residuos minimiza el vuelo de papeles y plásticos afuera de la celda, posibilita el movimiento de vehículos, minimiza los olores, evita el contacto de los residuos con el oxígeno del aire, evita la aparición de roedores y aves, reduce la entrada de agua lluvia, y reduce el riesgo por incendios, la cobertura final es de gran importancia para la clausura y recuperación final del vertedero, la calidad y espesor de dicha cobertura depende del uso final de esta, generalmente consiste en una capa de drenaje de biogás, una zona impermeable, una zona de drenaje de aguas y una capa final con vegetación, que los residuos sean o no cubiertos diariamente con material inerte determinará el tipo de proceso biológico que tendrá lugar en la celda de disposición, para la obtención de biogás es necesaria la no aireación de los residuos y por tanto una cobertura periódica, el grosor de la capa debe ser lo suficiente para que la degradación de los residuos no se vea afectada por los cambios meteorológicos. (Martín, 1997).

La cobertura diaria para rellenos mecanizados debe tener un espesor mínimo de 0,3 metros, esta cobertura se aplica diaria de manera que al final del día ningún residuo quede expuesto, la capa compactada debe tener una pendiente de entre el 2 y el 3% para que una vez se asiente esta no sea inferior al 1%, cuando se utilice material entre celdas se debe evitar que este sea impermeable, o en caso tal retirarse antes de disponer la siguiente capa de residuos, en caso de ser material limoso o arcilla deben hacerse filtros longitudinales pasantes en grava gruesa que conecten un nivel con el siguiente de tal forma que se permita el flujo de lixiviados de forma vertical entre niveles. (RAS título F, 2000).

La recirculación de lixiviados permite la incorporación de líquidos a la masa de residuos; estos líquidos constituyen el canal a través del cual los microorganismos responsables de la generación de biogás colonizan todas las zonas del relleno, además la humedad es vital para el apropiado desarrollo de los procesos metabólicos de los microorganismos, si el lixiviado no es recirculado y presenta niveles de DBO altos, el resultado es una pérdida negativa de nutrientes para la metanogénesis, al usarse material arcilloso como material de cobertura y realizarse la recirculación se provoca el hinchamiento de las arcillas y se mejora el carácter impermeable del terreno, lo que redundaría en un mayor rendimiento de los sistemas de colección de biogás, sin embargo, se debe evitar la inundación de la celda, ya que, el biogás puede migrar disuelto en el lixiviado, además se pueden presentar problemas de inestabilidad de taludes y fugas de lixiviados. (Martín, 1997).

1.6 Modelo Colombiano de Generación de Biogás

La modelación de la cantidad de biogás generado busca predecir la generación y recuperación del biogás basados en la disposición histórica de los residuos y en las proyecciones de cantidad a disponer, así como las estimaciones de las eficiencias de recolección. (Ludwing, 2009).

Este es un paso importante que proporciona la estimación y se desarrolla para conocer:

- Evaluar la viabilidad de un proyecto energético de biogás.
- Determinar los requisitos del sistema de recolección y control.
- Aportes del sector de residuos sólidos a los inventarios nacionales de GEI.

Se han desarrollado diferentes modelos para estimar las generaciones de Biogás en un relleno sanitario, aplicando modelos a las diferentes condiciones de los factores que influyen en cada país, tales como: el clima, características físico químicas de los residuos y métodos de operación.

LMOP (Landfill Methane Outreach Program) un programa de voluntariado para trabaja conjuntamente con las partes interesadas en la reducción de emisiones de metano en rellenos sanitarios, desarrolló el Modelo Colombiano de Biogás para ayudar a los operadores a evaluar la viabilidad en la captación y uso del biogás como fuente de energía. El Modelo incorpora la estructura del Modelo de residuos desarrollado por el IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático) con algunas revisiones y variaciones que permiten reflejar de mejor forma las condiciones del clima y condiciones de los sitios de disposición final en Colombia. (Ludwing, 2009).

El Modelo presenta valores pre calculados para el índice de generación de metano (k) y la generación potencial de metano (L_0), los cuales fueron desarrollados usando datos específicos del clima, de 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. (Global Methane Initiative, 2016).

1.7 Opciones Tecnológicas del Uso del Biogás

Los más comunes usos del biogás tenemos generación de electricidad, uso directo como combustible, como combustible para vehículos, el biogás es convertido al equivalente de gas natural, como combustible para evaporación de lixiviados. (US EPA, 2016).

Existen varias opciones para la conversión del biogás a energía. A continuación, se mencionaran algunos.

- Generación eléctrica: en estados unidos más de la mitad de los proyectos de aprovechamiento generan energía eléctrica, ya sea para uso propio o para la venta; así mismo, algunos de las tecnologías usadas en este fin son: Motores de combustión interna, turbinas, microturbinas, y pilas de combustible, entre otros; estos dependen del tamaño del proyecto y la cantidad de eficiencia requerida. (Basic Information about Landfill Gas, Landfill Methane Outreach Program [LMOP] US EPA, 2016).

- Uso directo: Reemplaza a otros combustibles como el gas natural, el carbón o la gasolina, a su vez, se utiliza directamente en calderas, secadoras, hornos, u otras operaciones térmicas y en algunos rellenos sanitarios es usado para la evaporación de lixiviados; por otro lado, existen muchos campos de aplicación en los cuales se cuenta con muy poca información, como el sector de producción química, la fabricación de automóviles, el procesamiento de alimentos, la industria cementera, entre otros. (Basic Information about Landfill Gas, Landfill Methane Outreach Program [LMOP] US EPA, 2016).

- La cogeneración: se utiliza para la generación de electricidad o energía térmica mediante vapor de agua o agua caliente en turbinas, a nivel industrial es usado frecuentemente, se ha comprobado que la mejor eficiencia la logra con su aplicación a energía térmica. (Basic Information about Landfill Gas, Landfill Methane Outreach Program [LMOP] US EPA, 2016).

- Combustibles alternativos: En los últimos años esta aplicación ha sido cada vez más frecuente, mezclando biogás de alta BTU con éxito en tuberías de gas natural, y adecuando el biogás de media BTU como combustible de vehículos, también es usado para producir algo

similar al gas natural comprimido (CNG) o gas natural licuado (GNL) para su uso en vehículos. (Basic Information about Landfill Gas, Landfill Methane Outreach Program [LMOP] US EPA, 2016).

1.8 Cambio Climático

Teniendo en cuenta que la temperatura de la tierra es el resultado de un estado de equilibrio entre la energía que se recibe del sol y el calor almacenado por la tierra, al existir un desbalance en este equilibrio por la acción de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), se produce un aumento en la temperatura de la tierra. (Pinzón, 2014).

Las acciones humanas han contribuido al continuo y acelerado calentamiento del planeta, lo cual encendió las alarmas en todos los países donde el cambio climático se ha presentado durante los últimos 20 años como uno de los problemas globales de gran importancia que afronta la humanidad, debido al incremento progresivo de la temperatura media de la tierra y a partir del estudio de estas problemáticas se han generado algunos tratados internacionales entre ellos el de Río de Janeiro de 1992 que dio origen al Protocolo de Kyoto en 1997, donde los países desarrollados se comprometían a reducir en un 5% la generación de gases de efecto invernadero entre el 2008 y 2012, tomando como base el inventario de emisiones de 1990. (MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2017).

1.9 Gases de Efecto Invernadero GEI

En el marco de la construcción de las comunicaciones nacionales de GEI en cabeza del IDEAM se han producido 7 inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (INGEI) para los años 1990, 1994, 2000, 2004, 2010, 2012 y 2015, estos inventarios se han elaborado empleando las guías del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) del 2006. Los inventarios de GEI nos permiten identificar las principales fuentes de emisión en un periodo de tiempo, con el fin de definir potenciales medidas para reducir las emisiones y potenciar el crecimiento sostenible del país. (IDEAM, 2016).

1.9.1 Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC).

La Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC) es un programa de planeación del desarrollo a corto, mediano y largo plazo, liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), a través de la Dirección de Cambio Climático, con el apoyo del Departamento Nacional de Planeación (DNP) y los Ministerios Sectoriales de Colombia.

Busca desligar el crecimiento de las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) del crecimiento económico nacional a través de medidas sectoriales de mitigación que contribuyan al desarrollo económico y competitividad de los sectores. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

1.9.2 Compromisos de Colombia en la COP 21.

Colombia ha participado activamente en las cumbres desarrolladas a fin de mitigar el cambio climático. Colombia es miembro de la Asociación Independiente de Latinoamérica y el Caribe (AILAC) y participa en las negociaciones internacionales de cambio climático. En la pasada convención de París COP21 Colombia presentó el índice de Contribuciones Nacionales Determinadas, INDC, por sus siglas en inglés, para contribuir a la meta mundial de evitar el

aumento de la temperatura promedio por encima de los 2°C. (ABC de los compromisos de Colombia COP 21).

En la preparación de la INDC de Colombia se tuvieron en cuenta las condiciones del país en cuanto a capacidad económica, vulnerabilidad y los retos del país frente a superación de la pobreza y eliminación del conflicto; de igual manera se incluyeron aspectos de mitigación, adaptación, financiamiento, y desarrollo de ciencia y tecnología. (WWF-Colombia, 2015).

En la consolidación de estos compromisos la participación de los sectores públicos y privados, la academia y los institutos de investigación fue clave de manera que se reflejará el interés nacional frente a la contribución que Colombia puede desarrollar para mitigar las emisiones de GEI.

El componente de mitigación de las INDC se preparó con base en "Inventario de gases de efecto invernadero" (GEI, 2010 que elaboró el IDEAM). Este documento indicó que, ese año, Colombia emitió cerca de 224 millones de toneladas de CO₂-eq, el 0.46% del total mundial (ABC de los compromisos de Colombia COP 21).

Los resultados de las emisiones de GEI se proyectaron a 2050; para el 2030, Colombia podría aumentar sus emisiones un 50%, es decir, que si no se realizan acciones de mitigación podrían llegarse a 335 millones de toneladas de CO₂-eq. (WWF- Colombia, 2015).

Por ello, la importancia que se desarrollen proyectos que permitan contribuir al cumplimiento de las metas nacionales lo cual además traerá beneficios sociales, económicos y ambientales.

1.10 Energías Alternativas en Colombia

El agotamiento de los combustibles fósiles para generar electricidad ha puesto a la mayoría de los países del mundo a encontrar alternativas de generación. Colombia no es la excepción y aunque la principal fuente de generación eléctrica en Colombia son las hidroeléctricas, por la abundancia de agua, también se generan energía de combustibles fósiles como petróleo, gas y carbón y las reservas de éstos se vienen acabando. (Ministerio de Educación Nacional, 2013).

El Gobierno Nacional viene trabajando en invertir en el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías que permitan solucionar los problemas de la crisis energética mundial y contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero con la mitigación en la generación con combustibles fósiles.

1.11 Análisis de Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta que permite evaluar los impactos ambientales asociados a un producto o servicio, identificando las operaciones unitarias que componen el sistema productivo. (ISO, 2007).

El análisis de ciclo de vida puede ayudar a tomar decisiones respecto a oportunidades para mejorar el desempeño ambiental en las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto o servicio, en la selección de indicadores de desempeño ambiental y en la planeación estratégica, rediseño de procesos y productos. (ISO, 2007).

Para el análisis del ciclo de vida se desarrolla en cuatro fases de acuerdo con lo establecido en la norma internacional ISO 14040:

1. Definición de objetivo y alcance: Se establecen los límites del sistema y nivel de estudio de acuerdo con el análisis que se quiere desarrollar. Se evidencia el uso de los resultados y la

información que se espera obtener. En esta fase se define la unidad funcional, como referencia para las entradas y salidas del sistema.

2. Análisis de inventario: Consiste en cuantificar las entradas y salidas del proyecto en estudio. Para ello se realizan diagramas de flujo, teniendo en cuenta los componentes, líneas de producción, información detallada de cada proceso, especificando métodos de cálculo y técnicas para la recolección de la información. Se debe relacionar el inventario con la unidad funcional.

3. Evaluación de impacto ambiental: Esta fase tiene como objetivo evaluar los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del inventario.

4. Interpretación: En esta etapa se proporcionan los resultados que deben ser coherentes con el cumplimiento de los objetivos y alcance del proyecto.

1.12 Marco Referencial

1.12.1 Parque de Tecnología Ambiental Guayabal.

Se encuentra ubicado en el Km 10 en la vía que de Cúcuta conduce al Municipio de Puerto Santander, es un relleno sanitario de carácter regional, donde se disponen aproximadamente el 85% de los residuos sólidos generados en el departamento Norte de Santander.

Aseo Urbano SAS ESP opera el relleno sanitario ubicado dentro del Parque de Tecnología Ambiental Guayabal desde el 23 de abril del año 2001 a través de contrato de concesión No. 0618 celebrado con la alcaldía de San José de Cúcuta para construir y operar el sitio de disposición final por 25 años.

Desde el 2001 hasta la fecha el operador del relleno sanitario es Aseo Urbano y realiza las actividades de construcción, operación y plan de llenado de acuerdo con los programas operativos de la empresa y al cumplimiento de la licencia ambiental Resolución No. 0450 de 2006 otorgada por la Corporación Autónoma Regional de la Frontera (CORPONOR).

La zona de estudio comprende la actual celda de disposición de los residuos sólidos ordinarios denominada "Vaso Norte"; la ubicación de la zona bajo coordenadas geográficas corresponde: 8°00'43" de latitud Norte, 72°30'41" de longitud Oeste. El área total del relleno sanitario son 119 hectáreas y se proyecta que para la disposición final de los residuos sólidos por 25 años se utilizarán 40 Ha, las demás son zonas de amortiguación ambiental y para el desarrollo de otros proyectos como gestión de residuos peligrosos, tratamiento de aguas industriales, compostajes entre otros; el vaso norte tiene un área utilizada para la disposición de residuos de aproximadamente 24 Ha. (Aseo Urbano, 2016).



Figura 1.5 Foto aérea PTAG.
Fuente: Aseo Urbano, 2018

Teniendo en cuenta los datos históricos de disposición final desde el inicio de operación hasta diciembre de 2018, se han dispuesto 4.039.381,4 toneladas de residuos sólidos; actualmente se disponen en promedio 880 Ton diarias de residuos sólidos. (Aseo Urbano SAS ESP, 2018).

1.13 Marco Legal

Teniendo en cuenta el desarrollo de la investigación desde el punto de vista de políticas sectoriales relacionadas con residuos sólidos, cambio climático, energías alternativas y operación del relleno sanitario, se presenta el marco normativo que se tendrá en cuenta en el proyecto:

Decreto 0750 de 2018: Establece lineamientos básicos para diversificar la matriz energética de Colombia, de cara a la adaptación del país al cambio climático y a los compromisos adquiridos por Colombia en los pactos internacionales COP 21 (reducción del 20% emisiones de gases de efecto invernadero para 2030).

Resolución 0330 de 2017: Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el 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, 1447 de 2005 y 2320 de 2009.

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; establece dentro de los controles ambientales el monitoreo del biogás, con el fin de tomar medidas de control frente a posibles altas concentraciones en el fondo del relleno y de los índices de explosividad.

Decreto 1077 de 2015: Por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario para el sector Vivienda, Ciudad y Territorio; en el Título 2 se reglamenta lo relacionado con el Servicio Público de Aseo.

Decreto 1076 de 2015: Por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario para el sector Ambiente.

CONPES 3874 de 2015: Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos sólidos, articula la visión ambiental con el componente del servicio público domiciliario de aseo, como política nacional de interés social, económico, ambiental y sanitario; esta política se compone de cuatro ejes estratégicos, 1) prevención en la generación de residuos, 2) la minimización de aquellos residuos que van a la disposición final, 3) la promoción de la reutilización, aprovechamiento y tratamiento, 4) evitar la generación de los gases de efecto invernadero.

Ley 1715 de 2014: Por el cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional; tiene como objetivos generales promover la eficiencia energética y la utilización de Fuentes No Convencionales de Energía Renovables (FNCER), en el SIN y en las Zonas No Interconectadas (ZNI), reducir las emisiones de GEI y cumplir acuerdos internacionales.

Plan energético nacional Colombia, Ideario energético 2050: En este documento se presentan algunas ideas sobre el desarrollo futuro del sector energético colombiano que pueden servir de base para la elaboración e implementación de una política energética; el documento hace las veces de un Plan Energético Nacional, 2014 – 2050, pero sin tener estructurados los mapas de ruta para los objetivos propuestos.

Resolución 135 del 2012: Por la cual se adoptan normas aplicables al servicio público domiciliario de gas combustible con Biogás.

Resolución 18 – 0919 del 2010: Por la cual se adopta el Plan de Acción Indicativo 2010- 2015 para desarrollar el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, PROURE, se definen sus objetivos, subprogramas y se adoptan otras disposiciones al respecto. .

Documento CREG-056 de 2009: Pro la cual se establecen las regulaciones aplicables al biogás.

PROURE. Programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales, en cual se da el informe final y el plan de acción que tomaron para los años 2010-2015.

CONPES 3510 de 2008: Se crean los lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia. .

Ley 788 de 2002: Por la cual se expiden normas en materia tributaria y penal del orden nacional y territorial; y se dictan otras disposiciones, así mismo, estableció una exención al impuesto de renta sobre los ingresos derivados de la venta de energía eléctrica generada a partir de residuos agrícolas, fuentes eólicas y biomasa: esta Ley exige el cumplimiento de 2 requisitos: tramitar certificados de emisión de CO₂ y, que al menos 50,0% de los recursos obtenidos por la venta de dichos certificados se inviertan en obras de beneficio social en la región donde opera el generador.

Decreto 1713 del 2002: Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos; en él se define que la generación de biogás es una forma de aprovechamiento de los residuos en el marco de la Gestión Integral de los Residuos Sólidos, y que la actividad de aprovechamiento comprendido dentro de la actividad de disposición final, está sujeta a la CRA y solo abarca la

recolección, transporte y separación de residuos aprovechables, además establece que la responsabilidad por los efectos ambientales y a la salud pública generada por las actividades efectuadas en los diferentes componentes del servicio público de aseo de los residuos sólidos, recaerá en la persona prestadora del servicio de aseo; sin embargo, cuando se realice la actividad de aprovechamiento, dicha responsabilidad será de quien ejecute la actividad.

Ley 697 de 2001: Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones; declaró el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como un asunto de conveniencia nacional, además, creó el Programa Nacional de URE (PROURE), en el que se promueven la eficiencia energética y otras formas de energías no convencionales.

Ley 693 del 2001: Por la cual se dictan normas sobre el uso de alcoholes carburantes, se crean estímulos para su producción, comercialización y consumo, y se dictan otras disposiciones, se legisla para permitir la libre competencia en la producción, distribución y comercialización de alcoholes no potables; esto coincide con la implementación de dicho régimen con un elevado precio de la gasolina, producto del alza del petróleo en el mercado mundial y del desmonte de los subsidios a nivel nacional.

Ley 629 del 2000: Por medio de la cual se aprueba el "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997; el objetivo de este Protocolo era reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), por lo cual las energías renovables se convirtieron en una opción estratégica para Colombia. (Consulta de la Norma, 2017).

Ley 142 de 1994: Establece el régimen de servicios públicos domiciliarios y se establecen otras disposiciones, allí se definen las entidades encargadas de la regulación y legislación de los

servicios públicos tradicionales y aquellos que evolucionan como resultado del avance tecnológico mundial para el caso del biogás.

Ley 143 de 1994: Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética; con él se desarrolló el marco legal para el desarrollo de la regulación sectorial por parte de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).

1.14 Antecedentes

En la literatura a nivel internacional y nacional se puede encontrar una serie de investigaciones y estudios realizados con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que se generan en el relleno sanitario y darle un aprovechamiento con valorización energética al biogás. De igual manera se vienen implementando muchos proyectos de este tipo en países en vía de desarrollo y en Colombia se viene avanzando al generar las políticas adecuadas para promover inversión y desarrollo de los modelos de negocio de este tipo de tecnologías.

1.14.1 Estudios Internacionales.

Emkes, Coulon, y Wagland (2015), realizaron un estudio en el Reino Unido donde desarrollaron una herramienta que permite a los operadores de relleno sanitarios conocer los procesos bioquímicos dentro de un relleno sanitario, evaluar el rendimiento de la producción de biogás e identificar posibles problemas operativos que influyan en la generación del biogás. Lo anterior al comparar el modelo de generación de biogás LanGEM (ecuación de primer orden) y

el análisis de diferentes indicadores del biogás y lixiviados tales como: pH, DBO, DQO, relación DBO/DQO, amoníaco, cloruro, hierro y zinc.

Dillah, Miles, Balwinder y Panesar de SCS Engineer en 2015, evaluaron el modelo LandGEM de la EPA de Estados Unidos, ampliamente utilizado para estimar las tasas de generación y recolección de gas de relleno sanitario. Este modelo se basa en la ecuación de descomposición típica de primer orden, utilizando dos parámetros, L_0 (capacidad potencial de generación de metano) y k (tasa de generación de metano). Los investigadores encontraron que es necesario desarrollar un nuevo modelo que maneje un L_0 y K variable, teniendo en cuenta la recirculación de lixiviados, desviación de sustancias orgánicas, manejo de la infiltración y cambios en las precipitaciones ya que no pueden ser constantes como se desarrollan hasta ahora.

Feng, Zheng, y Xie (2015), desarrollaron un modelo de recolección del biogás evaluando un estudio de la presión del biogás, la presión de los pozos y la eficiencia en la recuperación del biogás. Los resultados obtenidos en este estudio son importantes para el desarrollo de la investigación teniendo en cuenta que se deben dar las recomendaciones técnicas de operación y captura del biogás de acuerdo al sistema de llenado del relleno.

Mambeli, Tiago, Da Silva (2014), El propósito de este estudio fue facilitar un aumento en la generación de energía a partir de recursos renovables, específicamente de rellenos sanitarios a través de plantas de biogás térmicas. Para ello crearon una gama de posibles valores de generación de biogás (metano) en rellenos sanitarios y capacidades de energía instaladas, considerando los valores máximos y mínimos extremos. Se identificó una necesidad urgente para formular políticas que fomenten el número de iniciativas financieramente viables para la generación de energía a partir de biogás de rellenos sanitarios.

Yechiel y Shevah (2016), en Israel se desarrollaron un modelo de programación lineal que permite evaluar el retorno económico de la generación de biogás en un relleno sanitario.

Beylot, Villeneuve, y Bellenfant (2013) realizan un análisis de las emisiones de biogás en un relleno sanitario con la metodología de análisis de ciclo de vida (LCA). Evaluaron 4 escenarios de opciones de aprovechamiento del biogás, desde emisiones a cielo abierto hasta el aprovechamiento como combustible directo en autobuses.

Chacartegui, Carvalho, Abrahaño y Becerra, (2015) analizaron el potencial de generación de biogás en una planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos y el uso en la cogeneración in situ en el relleno sanitario. El objetivo es identificar el potencial energético asociado con el relleno sanitario y su uso potencial para acelerar la evaporación de los lixiviados a través del suministro de calor. El estudio también incluyó el análisis de las políticas energéticas en España para la evaluación de la inversión.

Aguilar, Taboada y Ojeda (2011), el objetivo de este trabajo fue estimar la generación de biogás en el relleno sanitario de Ensenada (estado mexicano de Baja California) con la finalidad de conocer la cantidad de energía que se podría generar con los residuos sólidos depositados. Los resultados arrojaron que se podría generar una capacidad máxima de 1,90 MW y abastecer el 60% de la energía necesaria para alumbrado público.

Broun y Sattler (2016), compararon la gestión del biogás en un relleno sanitario convencional con quema del biogás y en un relleno sanitario con generación de electricidad a partir del biogás. Trabajaron el balance de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el potencial de aprovechamiento en la generación de electricidad a partir de motores de combustión interna, utilizando la metodología de análisis de ciclo de vida. Los resultados estimados de la cantidad total de reducciones de emisiones de GEI a la atmósfera, por la producción de energía eléctrica

fue de 668 y 803 kg de dióxido de carbono (CO₂) equivalentes (CO₂E) por tonelada métrica (t) de residuos sólidos dispuestos para un relleno convencional con quema del biogás y la generación de energía eléctrica.

Piñas, Venturini, Silva, Oliveira y Calle (2016), investigaron a cerca de los rellenos sanitarios para la generación de energía eléctrica a partir de la producción de biogás en Brasil: comparación de los modelos LandGEM (EPA) y Biogás (Cetesb). En investigación se hace una estimación de la cantidad de biogás y energía generada de la descomposición anaeróbica en un relleno sanitario en la ciudad de Tres Corazones, Minas Gerais. Para realizar la estimación de los parámetros se utilizaron los modelos LandGEM (EPA) y Biogás (Cetesb), que mostraron resultados similares en el momento de hacer la comparación, con una variación de sólo el 5% para ambos modelos.

Lee, Han y Wang (2017), evaluaron las emisiones de gases de rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales utilizando la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con diferentes escenarios de gestión de residuos, incluyendo el aprovechamiento para generación de energía. El método desarrollado y los datos recopilados en este estudio pueden ayudar a mejorar la evaluación de los impactos de GEI de los rellenos sanitarios, lo que respalda la toma de decisiones frente a la gestión y la utilización de los RSU.

1.14.2 Estudios Nacionales.

Rudas, Antolínez, Nieves, Venegas, Téllez, Medina (2014): Con el apoyo del Departamento Nacional de Planeación, Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono y organismos internacionales interesados en el cambio climático desarrollaron una metodología de evaluación de los cobeneficios de acciones de mitigación del cambio climático en Colombia. Se incluye en el capítulo 8 la reducción de residuos sólidos orgánicos dispuestos en rellenos sanitarios.

Ordoñez: Evaluación de la generación de biogás en rellenos sanitarios en Colombia en el marco del protocolo de Kioto. UTP, Pereira, 2001. En el cual se revisaron los proyectos bajo los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), realizados en Colombia y su potencial de éxito, además se investigaron los requisitos para poder presentar un proyecto de MDL.

Colmenares: Generación y manejo de gases en sitios de disposición final, 2007. En el cual se provee la información básica acerca de la producción, composición y manejo del gas producto de la disposición final de residuos sólidos en rellenos sanitarios de América latina. Y el análisis de aplicaciones para el biogás a gran escala.

Estudios y Técnicas Especializadas en Ingeniería S.A. (ETEISA) (2005): estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento del biogás generado en el relleno sanitario “guayabal”, municipio de Cúcuta, Colombia. En este estudio se levantó la única información existente respecto al aprovechamiento del biogás en el Parque Tecnológico Ambiental Guayabal, aunque las proyecciones realizadas en ese entonces difieren de la información actual es un instrumento importante para el avance de la investigación.

Serrano: Alternativas de utilización de biogás de rellenos sanitarios en Colombia. Fundación Universitaria Iberoamericana, Bogotá, 2006. En el cual se realiza una investigación de la producción de biogás en el relleno doña Juana en Bogotá por medio del uso de tres modelos matemáticos y se examina la metodología MDL desarrollando proyectos de aprovechamiento en Colombia.

1.14.3 Estudios Locales.

Bionersis (2011): Durante los años 2010 y 2011 Bionersis empresa francesa trabajo en un proyecto que consiste en extraer, controlar y destruir mediante la quema controlada el Biogás

que se genere a partir de la disposición de residuos en el sitio, particularmente su contenido de metano (CH_4), logrando con ello una importante contribución para la reducción de los gases de efecto invernadero.

Se inició la primera fase con la Instalación de pozos verticales de extracción de Biogás en áreas que ya se encontraban clausuradas. Los pozos se construyeron a diferentes niveles dependiendo de la profundidad de la masa de residuos, estimándose en promedio una profundidad de 20 m. Se construyeron 21 pozos por medio de una red de tuberías en PEAD la cual desembocaba en un dispositivo supresor que alimentaba a una antorcha de quema, de modo tal de realizar la extracción de Biogás mediante un sistema de ventilación forzada. Los gases producidos por la quema eran expulsados por una gran chimenea. El objetivo de Bioenersis en la Primera Etapa del proyecto era incinerar o quemar el Metano (CH_4) y convertirlo en Dióxido de Carbono (CO_2).

En la Segunda Etapa del proyecto, Bioenersis tenía previsto utilizar el biogás para generar energía eléctrica, pero no se alcanzó a desarrollar esta etapa debido a que los precios de los bonos de carbono disminuyeron drásticamente en el mercado y la empresa se declaró en insuficiencia financiera.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Proponer una alternativa de aprovechamiento del biogás generado en el relleno sanitario del Parque de Tecnología Ambiental Guayabal, que permita la recuperación del potencial energético y la reducción cuantificada de las emisiones de Gases de efecto Invernadero.

2.2 Objetivos Específicos

1. Evaluar el comportamiento de las variables que influyen en la generación de biogás, para determinar la eficiencia de producción en el relleno sanitario del PTAG.
2. Estimar el potencial de generación de biogás mediante el modelo Colombiano de Generación de Biogás, con el fin de realizar la valorización energética de la biomasa.

3. Realizar la evaluación técnico ambiental y económica de las tecnologías de valorización energética de biomasa más usadas para determinar la viabilidad de aplicación en el Parque de Tecnología Ambiental Guayabal.

4. Calcular las reducciones de gases de efecto invernadero GEI bajo los principios de la metodología análisis de ciclo de vida (ACV), de la alternativa de aprovechamiento seleccionada como instrumento cuantitativo de evaluación ambiental del proyecto.

5. Proponer un sistema de aprovechamiento y valorización energética del biogás en el relleno sanitario del parque de tecnología ambiental guayabal que sirva como alternativa viable para la recuperación del potencial energético y reducción de los gases de efecto invernadero.

3. Metodología

Para el desarrollo del trabajo de investigación se desarrollarán los siguientes pasos metodológicos:

3.1 Comportamiento de las Variables que Influyen en la Generación de Biogás

Para evaluar el potencial de generación de biogás en el relleno sanitario, es importante evaluar el comportamiento de todas las variables que influyen en la generación y las condiciones operativas del sitio de disposición final.

3.1.1 Proyección de Toneladas de Disposición Final.

Teniendo en cuenta el crecimiento poblacional, los hábitos de consumo y la información estadística de las toneladas que se han depositado a la fecha, se realizó la proyección de

toneladas teniendo en cuenta la metodología establecida por el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) en el Título F, Sistemas de Aseo (2017).

La Guía RAS – 001 establece la metodología para definir el nivel de complejidad y los métodos de cálculo para determinar la población futura en proyectos de acueducto, alcantarillado o aseo. Se tuvo en cuenta las recomendaciones del RAS para aplicar correctamente uno de los métodos aplicables al cálculo de población de acuerdo con el nivel de complejidad del proyecto.

Tabla 3.1 *Métodos de Cálculo de Población.*

Método de cálculo a emplear	Nivel de complejidad del sistema			
	Bajo	Medio	Medio Alto	Alto
Aritmético	X	X		
Geométrico	X	X	X	X
Wappus	X	X	X	X
Gráfico	X ⁽¹⁾	X	X	
Exponencial	X ⁽¹⁾	X ⁽¹⁾	X ⁽²⁾	
Detallar por Zonas		X	X	X
Detallar Densidades		X	X	X

Fuente: RAS 2017

De igual forma, basada en la información estadística dispuesta desde el 2001 hasta la fecha se evaluará la PPC, las variaciones de acuerdo a la población migratoria y a los fenómenos poblacionales y comerciales que se presentan en esta zona de frontera.

3.1.2 Caracterización de los Residuos Sólidos.

La composición de los residuos sólidos es un factor determinante en la generación de biogás. De acuerdo al Decreto 1784 de 2017 que reglamenta la disposición final de residuos sólidos, se

realiza la caracterización de residuos para determinar las características físico-químicas, cualitativas y cuantitativas de los residuos sólidos para identificar el potencial de tratamiento o aprovechamiento.

Para ello el RAS 2017 título F establece el listado de residuos que deberá tenerse en cuenta en la composición según la factibilidad de manejo y se realiza utilizando el método de cuarteo. Se tomará la información reportada por la empresa Aseo Urbano SAS en los informes semestrales entregados a Corponor de la caracterización de residuos.

3.1.3 Evaluación de Condiciones Climáticas en el Relleno Sanitario.

Factores climáticos tales como precipitación y evapotranspiración son factores que influyen en la generación de biogás favoreciendo o limitando la acción de los microorganismos en la fase metanogénica. En la PTAG se registra diariamente la información de la meteorológica DAVIS VANTAGE PRO2, que registra los parámetros que se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. *Parámetros Meteorológicos Estación PTAG.*

Parámetro	Unidad	
Temperatura del Aire	°C	
Velocidad del Viento	m/seg	Fuente:
Presión Barométrica	mmHg	Aseo
Humedad Relativa	%	Urbano
Precipitación	Mm	
Radiación Solar	W/m ²	, 2017.
Evapotranspiración	Mm	

Cerca de la PTAG operan dos estaciones meteorológicas del IDEAM y cuya información estadística se encuentra disponible en la base de datos de dicha entidad.

3.1.4 Condiciones de Operación del Relleno Sanitario.

La compactación de los residuos sólidos, recirculación de lixiviados, tipo de cobertura utilizada, espesor del material de cobertura, área de disposición de residuos, profundidad y sistema de llenado, son algunas de las condiciones operativas que interfieren en la generación del biogás.

La identificación de los procesos operativos, los métodos y materiales utilizados permitieron establecer las condiciones de operación del sistema.

3.1.5 Clausura y Post-clausura del Relleno Sanitario.

La etapa de cierre y clausura de las zonas operadas influirá en la utilización futura del biogás, por tal motivo conocer el proceso operativo de dicha fase es importante para las recomendaciones que favorezcan el desarrollo de los proyectos de aprovechamiento del biogás.

3.2 Aplicación del Modelo Colombiano de Biogás

Con base en información de los factores que influyen en la generación de biogás y la proyección de la tonelada dispuesta se realiza la estimación de la cantidad y eficiencia de los sistemas de recolección de biogás. (US EPA, 2016).

Las proyecciones del biogás generado en un relleno sanitario se vienen desarrollando desde varios puntos de vista, con metodologías y modelos matemáticos desarrollados por diferentes entidades y organismos internacionales. Los países que han realizado compromisos internacionales frente al cambio climático incluyen en el módulo de biomasa el inventario de generación de gases de efecto invernadero GEI para determinar la contribución de los residuos sólidos en el inventario nacional. (Broun y Sattler, 2016).

Se realizó la evaluación de los modelos existentes y se aplicó la metodología desarrollada por la

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF) (F)$$

Donde: Q_{LFG} = Flujo de biogás máximo esperado (m³/año)
 i = Incremento en tiempo de 1 año
 n = (año del cálculo) – (año inicial de disposición de residuos)
 j = Incremento de tiempo en 0.1 años
 k = Índice de generación de metano (1/año)
 L_0 = Generación potencial de metano (m³/Mg)
 M_i = Masa de residuos dispuestos en el año i (Mg)
 t_{ij} = Edad de la sección j de la masa de residuos M_i dispuestas en el año i (años decimales)
MCF = Factor de corrección de metano
F = Factor de ajuste por incendios

Figura 3.1. Modelo LanGEM, EPA 2005.

Fuente: US EPA, 2016.

EPA en Estados Unidos, LandGEM. Esta es una aplicación de software desarrollada en Excel que utiliza una ecuación de velocidad de primer orden para calcular cantidad de metano que se generará en un determinado período de tiempo (US EPA, 2016). En la siguiente figura se presenta la ecuación utilizada por el modelo:

Basados en el anterior modelo, se ha desarrollado el Modelo Colombiano de Biogás Versión 1.0 utilizado para la estimación de biogás en rellenos sanitarios en Colombia. Este modelo fue desarrollado por SCS Engineers con el programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la USEPA.

El modelo utiliza información específica como año de inicio de operación del relleno, año proyectado de cierre, proyección de disposición anual de residuos, ubicación geográfica del sitio y condiciones de operación pasadas y futuras del sitio.

El modelo provee automáticamente valores para el índice de generación de metano (k) y la generación potencial de metano (L_0) para cada uno de los 33 departamentos en Colombia y

estima la eficiencia de captura. Estos valores fueron desarrollados usando datos específicos de clima, caracterización de residuos y prácticas de disposición de residuos de Colombia y estima el efecto de estas condiciones en las cantidades y índices de generación de biogás (EPA, 2009).

3.3 Medición de Caudales y Composición de Biogás en Campo

En cumplimiento del Decreto 1784/17 dentro de las actividades de control y monitoreo se debe realizar la medición semestral de los siguientes parámetros relacionados con el biogás, (ver tabla 3.3).

Tabla 3.3. *Parámetros de control Biogás.*

Parámetro	Frecuencia
Composición de Biogás CH ₄ , CO ₂ , O ₂	Semestral
Explosividad	Semestral
Caudal	Semestral

Fuente: Decreto 1784/17

Se tomó la información reportada por los contratistas en el período de la investigación, con el fin de comparar con los datos de las proyecciones establecidas en la fase anterior.

Además se realizaron monitoreos en chimeneas seleccionadas teniendo en cuenta las adecuaciones necesarias para la instalación del cabezal del equipo de medición Biogás 5000, adquirido por la empresa Aseo Urbano SAS, que mide concentraciones y caudal de Biogás.

Se seleccionaron 5 chimeneas que tenían las adecuaciones necesarias por el proyecto anteriormente desarrollado por Bionersis y 4 chimeneas convencionales las cuales requirieron las adecuaciones de quitar el gavión y colocar una campana que permitiera la adaptación del cabezal del equipo. Las mediciones se realizaron de manera puntual y se repitieron durante 3 días.

Debido a la generación constante del biogás en un relleno sanitario sin un sistema de extracción de biogás existirá una sobrepresión negativa interna que provoca la salida del biogás de forma constante, el valor de esta sobrepresión se condiciona por la actividad metanogénica, los movimientos de los lixiviados y los cambios en el nivel freático (UK Department of the Environment, 1994, como se citó en González, 1997).

Se realizaron pruebas de extracción forzada en 3 chimeneas con mediciones puntuales para determinar la eficiencia, en la medida que se aumenta la presión de succión de biogás. Se podrá aumentar o disminuir la presión de succión sin afectar la composición drásticamente; así mismo, el tipo de cobertura se relaciona con la efectividad del sellado de la celda de vertido y la migración del biogás exclusivamente por las chimeneas dispuestas para ello. La cota piezométrica del pozo de extracción se relaciona con el manejo de condensados a la hora de realizar la extracción del biogás. (González, 1997).

3.4 Evaluación Técnico Ambiental y Económica de Técnicas de Valorización Energética de la Biomasa de PTAG

Conociendo el potencial de generación de biogás del relleno sanitario de la PTAG se realizó la evaluación técnico ambiental y económica de las tecnologías más utilizadas recientemente para el aprovechamiento y valorización energética de la biomasa. Para el desarrollo de esta evaluación se tuvo en cuenta los siguientes ítems:

- Recopilación de las tecnologías disponibles, en términos de diseño, operación y mantenimiento. Se incluyen los requerimientos de calidad del biogás, especificaciones técnicas de los equipos y consumos de combustibles.

- Revisión global de los beneficios ambientales de cada una de las alternativas en cuanto a la cuantificación de las reducciones de GEI.
- Cuantificación de inversiones, costos e ingresos esperados en las alternativas de valorización energética.
- Desarrollo legislativo de cada una de las alternativas analizadas y cómo influye los incentivos tributarios en la viabilidad económica.

A continuación, en la figura 3.2, se presenta el diagrama de flujo de la metodología desarrollada para la evaluación técnico ambiental y Económica de las alternativas.

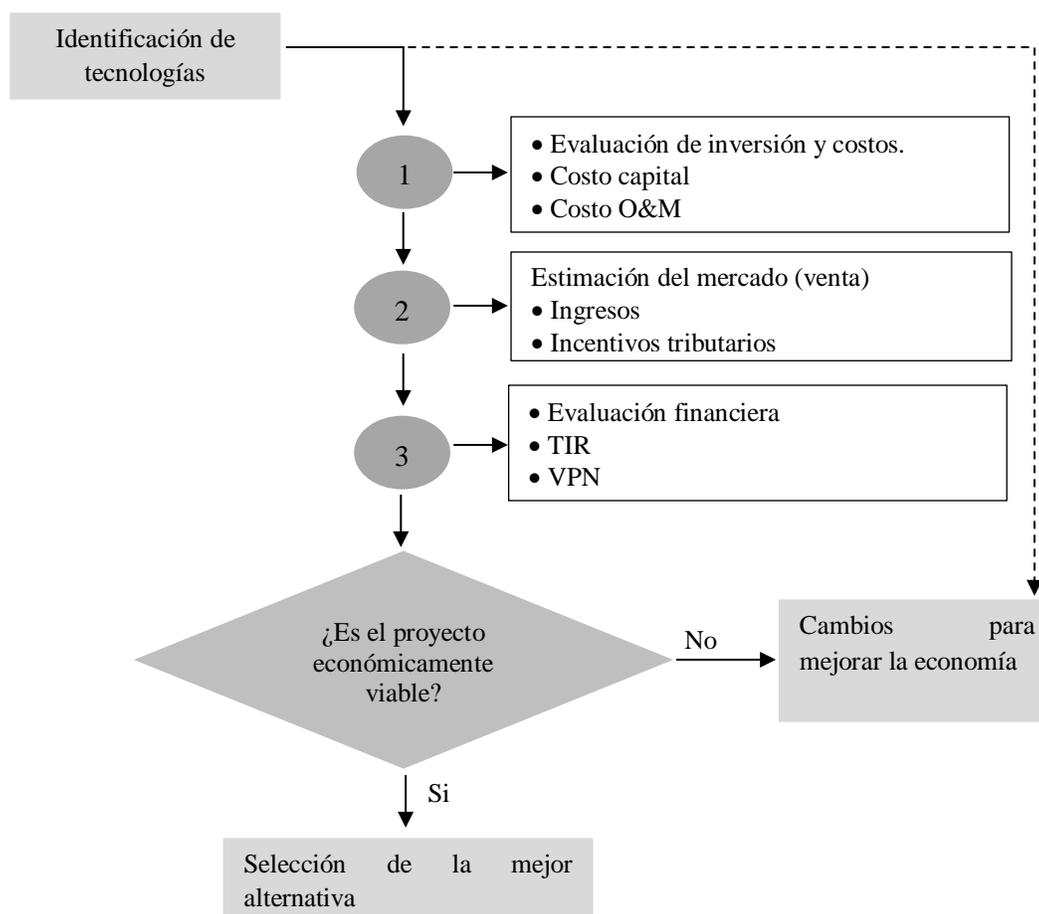


Figura 3.2. Diagrama de Evaluación Económica

3.5 Propuesta de una alternativa para la Valorización Energética del biogás de la PTAG

De acuerdo con la evaluación de las alternativas disponibles se seleccionará la propuesta que cumpliendo con criterios de viabilidad técnicos, sociales, económicos y ambientales se convierta en la tecnología que permita el aprovechamiento del biogás con fines de valorización energética de los residuos y represente los beneficios ambientales que contribuyan a la reducción de los GEI en la PTAG.

De igual manera el sistema seleccionado que se va a proponer deberá ser un sistema adaptable a cualquier relleno sanitario en Colombia, teniendo en cuenta las políticas públicas en la materia.

3.6 Calculo de Reducciones de Gases de Efecto Invernadero GEI, con Metodología Análisis de Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) se estandarizó en la ISO 14040 con la finalidad de contribuir a la gestión ambiental en el sector productivo, allí se evidencia la estructura metodológica cumpliendo con las 4 fases fundamentales que se describen en la Figura 3.3.

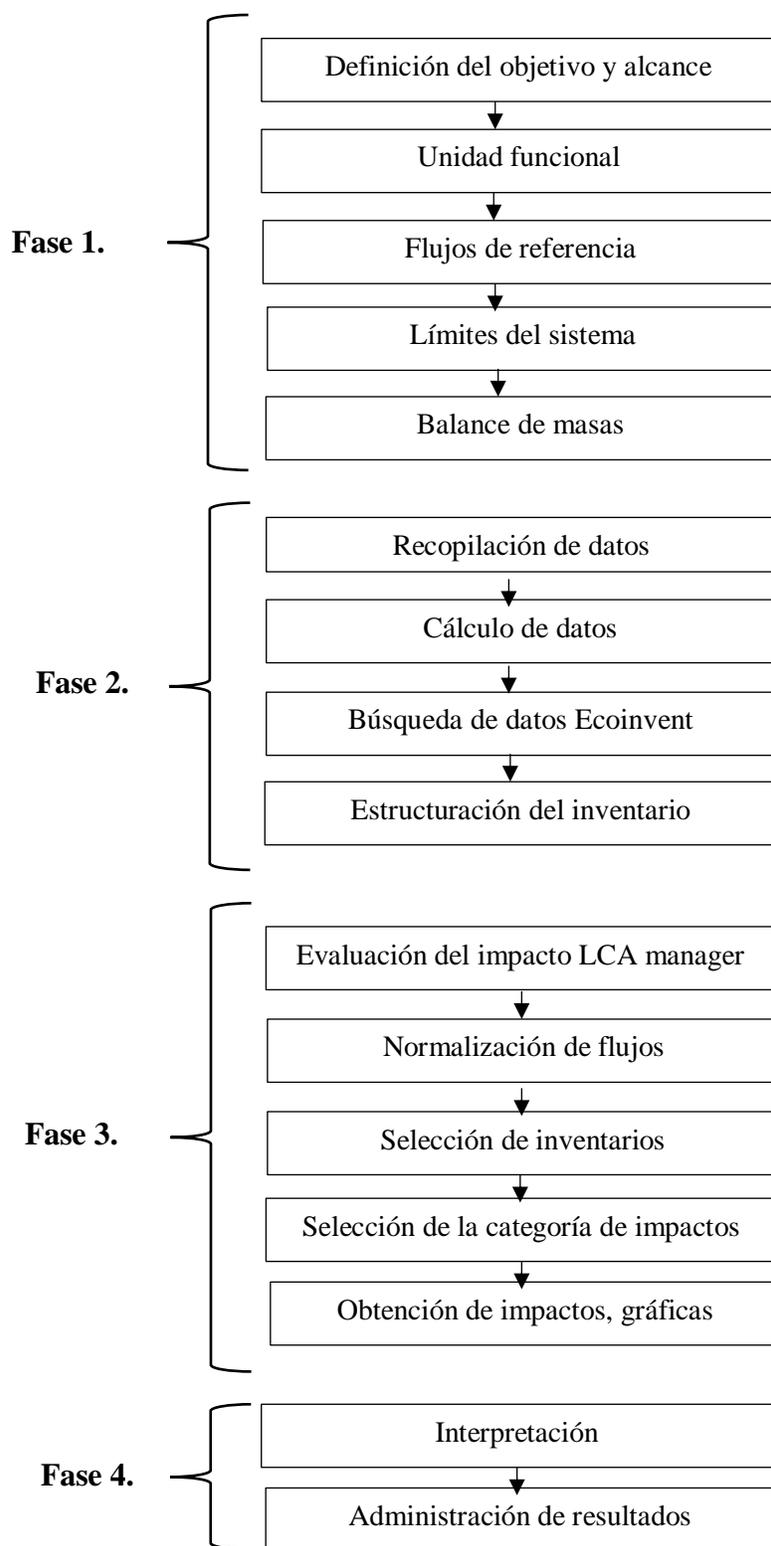


Figura 3.3. Diagrama ACV ISO 14040.

Fuente: Autor basado en las Normas ISO 14040

3.6.1 Fase 1. Definición del Objetivo y Alcance.

Para evaluar el desempeño ambiental y los impactos asociados a la operación del relleno sanitario se realizará el análisis (ACV) en dos escenarios:

Escenario 1. Proceso de disposición final desde el ingreso de los residuos al relleno sanitario, como se realiza actualmente con evacuación de gases a la atmósfera.

Escenario 2. Proceso de disposición final desde el ingreso de los residuos al relleno sanitario con el aprovechamiento del biogás.

La metodología del análisis de ciclo de vida se realizará tomando como unidad funcional Tonelada, es decir se desea conocer los impactos ambientales asociados a la disposición final de 1 Tonelada de residuos sólidos dispuestos en el Parque de Tecnología Ambiental Guayabal (PTAG).

Los límites del sistema serán desde el ingreso de los residuos al Parque de Tecnología Ambiental Guayabal teniendo en cuenta las actividades de operación tales como: pesaje en báscula, transporte de los residuos desde la portería hasta el patio de descargue, la trituración y compactación en la celda de operación, cubrimiento de los residuos y la degradación que se da directamente en la disposición final, Ver Figura 3.4.

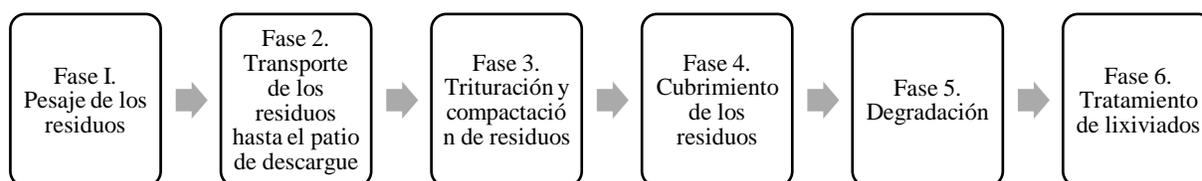


Figura 3.4. Fases para el análisis de ciclo de vida.

La metodología del análisis de ciclo de vida se realizará tomando como unidad funcional Tonelada, es decir se desea conocer los impactos ambientales asociados a la disposición final de

1 Tonelada de residuos sólidos dispuestos en el Parque de Tecnología Ambiental Guayabal (PTAG).

3.6.2 Fase 2. Análisis de Inventario.

En el análisis de inventario se realiza la recopilación y cálculo de los datos, para ello se toman como referencia los manuales de operación del relleno sanitario, los manuales técnicos de los equipos tales como báscula, bulldozer, retroexcavadora, cargador.

Para la estructuración del inventario se utilizó la base de datos Ecoinvent 3.0, desde Junio de 2013 Ecoinvent es una asociación sin ánimo de lucro fundada por el instituto de dominio ETH y las oficinas Federales Suizas, su visión es ayudar a las personas de todo el mundo a hacer evaluaciones ambientales de alta calidad más fácilmente.

3.6.3 Fase 3. Evaluación del Impacto.

En esta etapa se evaluará los impactos ambientales teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el inventario.

La base de datos obtenida en Ecoinvent se lleva al software LCA Manager, el cual es una herramienta de evaluación ambiental basada en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida para productos y procesos industriales.

Esta herramienta de soporte a la eco innovación y permite cuantificar y comunicar el perfil ambiental de los productos y procesos teniendo en cuenta todo su ciclo de vida.

El LCA manager está dividido en 6 etapas de cálculo: Caracterización, inventario, indicadores, impactos, resultados y gráficos.

En investigación se realizará la evaluación del impacto de Global Warming Potencial (GWP) y se expresa como la modificación de la temperatura media terrestre derivada de la contribución de los gases de efecto invernadero GEI. El GWP se define como el efecto acumulado del forzamiento radiactivo causado por unidad de masa de un gas emitido a la atmósfera, en función de otro tomado como referencia, que normalmente es el CO₂, por ello este impacto tiene como indicador las Ton-equ de CO₂ (Sanchez, 2012).

3.6.4 Fase 4. Interpretación.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la fase anterior se realiza un análisis integral buscando coherencia con los objetivos planteados.

Se realiza el análisis comparativo de los dos escenarios y se plasman las conclusiones y recomendaciones.

4. Análisis y Discusión de Resultados

Una vez se ha realizado la revisión bibliográfica del proyecto y con la aplicación de la metodología descrita, se presentan a continuación los resultados obtenidos en cada una de las etapas de la investigación para realizar el análisis y discusión en cumplimiento de los objetivos planteados en la investigación.

4.1 Comportamiento de las Variables que Influyen en la Generación del Biogás

Teniendo en cuenta los factores que influyen en la generación del biogás se presentan los resultados de las condiciones operativas actuales y de los factores que influyen en la generación del biogás.

Para el análisis de este comportamiento se utilizó la información secundaria, información estadística del relleno sanitario

4.1.1 Proyección de Toneladas de Disposición Final.

En la tabla 4.1 se presentan los resultados de la disposición final actual de residuos y cómo ha sido la variación frente a la disposición del año anterior con el objeto de determinar la dinámica de crecimiento de los residuos.

La generación de residuos en una zona depende de factores tales como crecimiento poblacional, población migratoria y la situación económica.

Teniendo en cuenta los datos históricos de disposición final desde el inicio de operación en el relleno sanitario hasta diciembre de 2017, se han dispuesto 3.723.518 Toneladas de residuos sólidos.

Los porcentajes de variación de un año a otro están relacionados con el ingreso de nuevos municipios a la disposición final obedeciendo a las políticas nacionales de fomentar la regionalización en el manejo de residuos. De igual manera se ven influenciados por los fenómenos de cierre de frontera y de la actividad comercial que se presente con el país de Venezuela.

Tabla 4.1. *Disposición de residuos PTAG.*

Año	Disposición final Ton/Año	Variación
2001	84.699	-
2002	131.202	-
2003	126.376	-4%
2004	156.208	24%
2005	168.649	8%
2006	181.225	7%
2007	196.533	8%
2008	213.798	9%
2009	231.160	8%
2010	245.996	6%
2011	263.296	7%
2012	235.271	-11%
2013	270.342	15%
2014	301.486	12%
2015	304.436	1%
2016	309.717	2%
2017	303.124	-2%

Fuente: Aseo Urbano, 2017

Los datos históricos de disposición y las toneladas que se dispondrán en la vida útil del relleno sanitario se requieren para la proyección de la generación del biogás.

Para efectos de proyectar la disposición final de residuos hasta el 2026 se tendrá en cuenta un incremento del 2% que es el presentado en los años 2016 y 2017. Si bien los incrementos en algunos años anteriores fueron mayores, las nuevas políticas de manejo de residuos van encaminados hacia la economía circular y por ende mayor aprovechamiento de residuos.

En la Tabla 4.2 se presenta la proyección de toneladas de disposición hasta el año 2026. Si bien la vida útil del relleno sanitario de acuerdo con la vigencia de la licencia ambiental va hasta este año, se proyecta que en este sitio continúe la disposición final por lo menos por veinte años más. Lo anterior teniendo en cuenta que se tiene la capacidad en área para continuar con la disposición en este sitio y porque es recomendable continuar operando un sitio ya impactado que ir a buscar nuevos sitios de disposición final.

Tabla 4.2 . *Proyección de toneladas de disposición final.*

Año	Disposición final Ton/Año
2018	303.124
2019	309.186
2020	315.370
2021	321.678
2022	328.111
2023	334.673
2024	341.367
2025	348.194
2026	355.158

4.1.2 Caracterización de Residuos Sólidos.

Conocer la composición de los residuos que llegan al relleno sanitario es de gran importancia ya que los residuos biodegradables se convierten en la materia prima para la determinación de la calidad y cantidad del biogás generado.

A continuación, se presentan algunas de las caracterizaciones de residuos que se realizan en el relleno sanitario en cumplimiento del Decreto 838 de 2005 que establece que anualmente se debe realizar la caracterización de residuos. De igual manera firmas contratistas que han realizados estudios de estabilidad y de aprovechamiento del biogás han realizado dichas caracterizaciones.

En la tabla 4.3 se presenta la composición de los residuos sólidos en el departamento Norte de Santander según la información levantada por SCS Engineers, para incluir en el modelo colombiano de generación de biogás.

Tabla 4.3. *Composición de residuos sólidos en el departamento Norte de Santander*

Componente	Porcentaje
Comida	49.8%
Papel y Cartón	15.9%
Poda (jardines)	5.1%
Madera	2.0%
Caucho, Piel, Huesos y Paja	2.2%
Textiles	2.8%
Papel Higiénico	0.0%
Otros Orgánicos	0.0%
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	0.0%
Metales	0.7%
Construcción y Demolición	0.0%
Vidrio y Cerámica	6.7%
Plásticos	4.7%
Otros Inorgánicos	10.1%
Total	100.0%

Fuente: SCS Engineers 2010

En la anterior caracterización de residuos se encuentra que los residuos de interés para la actividad microbiana son los residuos de comida, papel y cartón, podas y madera los cuales suman: 72,8%, para el año 2010.

En la tabla 4.4 se presentan los resultados porcentuales de la caracterización anual de residuos realizada en el 2015.

Tabla 4.4. *Caracterización de residuos 2015.*

Componente	Porcentaje
Comida y jardín	59.0%
Papel	2.0%
Cartón	9.0%
Plástico	16.0%
Caucho y Cuero	1.0%
Textiles	5.0%
Madera	0.0%
Productos metálicos	1.0%
Vidrios	3.0%
Productos cerámicos, cenizas rocas y escombros	0.0%
Huesos	0.0%
Otros	6.7%
Total	100.0%

Fuente: Aseo Urbano, 2015.

La caracterización de los residuos realizada en el año 2015 se encuentra que el 70% de los residuos que corresponden a residuos de comida, jardín, papel y cartón, obedecen al contenido biodegradable de interés para la proyección de los gases.

En la Tabla 4.5 se presentan los resultados obtenidos en el año 2016 de la caracterización por composición porcentual de los residuos sólidos.

Tabla 4.5. *Composición de residuos 2016.*

Componente	Porcentaje
Residuos de comida y jardín	63,60%
Papel	2,20%
Cartón	4,50%

Componente	Porcentaje
Plástico	12,00%
Caucho y cuero	3,30%
Textiles	3,80%
Madera	1,40%
Productos metálicos	0,70%
Vidrios	1,90%
Cerámicos, cenizas, rocas y escombros	0,90%
Huesos	0,10%
Otros	2,20%
Llantas	0,40%
Residuos de marroquinería	3,00%
Total	100,00%

Fuente: Aseo Urbano SAS, 2016

En la caracterización de residuos del año 2016 se encontró que el 63,6% de residuos corresponde a residuos orgánicos provenientes de restos de comida y jardín, el 6,7% a residuos de papel y cartón y los residuos de madera representan el 1,4%. La suma de estos componentes representa el 71,7%, considerado residuos de rápida y lenta degradación.

Dependiendo de la edad de los residuos sólidos dentro de las zonas de disposición final y de la disponibilidad de materia orgánica según como se hayan dado los procesos de degradación se puede encontrar todavía materia orgánica de lenta degradación sin descomponer. En la Tabla 4.6 se presenta la composición de los residuos sólidos según estudio de estabilidad geológica realizado en el año 2015, donde se realizaron sondeos y se tomó como muestra una zona de disposición superior a 2 años.

Tabla 4.6. *Composición de residuos en zonas de más de 2 años de disposición.*

Componente	Porcentaje
Plástico	10.76%
Papel y Cartón	11.94%
Vidrio	12.51%
Madera	7.47%
Textiles	1.34%
Cuero	0.77%

Caucho	0.29%
Metales	4.24%
Cerámicos, cenizas, rocas y escombros	0,05
Suelos y gravas	50.64%
Total	100,00%

Fuente: Estudio de estabilidad geotécnica, 2015.

En los resultados anteriores se ve como disminuye la disponibilidad de materia orgánica, sin embargo, no se identifican los residuos de comida y de jardín que son los de rápida degradación y quedan disponibles los de lenta degradación como son los residuos de papel y cartón y los residuos de madera.

Para efectos de la modelación de generación de biogás se utilizarán los datos de caracterización del 2016, teniendo en cuenta que no existen mayores variaciones con los de años anteriores.

4.1.3 Evaluación de las Condiciones Climáticas.

El conocimiento de las condiciones meteorológicas resulta ser de gran aporte para la operación y el control de parámetros ambientales en un relleno sanitario. De acuerdo con el régimen de lluvias y de evaporación se realiza el balance hídrico del relleno sanitario, teniendo en cuenta por ejemplo la radiación solar se establece la posibilidad de evaporar lixiviados. Las predicciones meteorológicas ayudan a realizar el control y manejo de coberturas de residuos y de vías de acceso a las zonas de operación.

En el Parque de Tecnología Ambiental Guayabal se tiene una estación meteorológica marca DAVIS modelo VANTAGE PRO, el cual funciona con panel solar y un sistema de batería recargable que permite la operación durante las 24 horas del día. En la Tabla 4.7 se presenta los parámetros de medición que realiza dicha estación.

Tabla 4.7. *Parámetros de medición estación meteorológica PTAG.*

Parámetro	Unidad
Temperatura del Aire	°C
Velocidad del Viento	m/seg
Presión Barométrica	mmHg
Humedad Relativa	%
Precipitación	Mm
Radiación Solar	W/m ²
Evapotranspiración	mm

Fuente: Aseo Urbano SAS, 2017

Para efectos del presente estudio se tendrán en cuenta los datos de precipitación y evapotranspiración.

4.1.3.1 Precipitación.

A continuación, se realizó la consolidación de los datos encontrados en los reportes mensuales de la estación meteorológica durante todo el año 2016 en el Apéndice 1.

Los datos reportados por la estación fueron 622,1 mm/m² de precipitación y 1557,1 mm/m² de evapotranspiración.

Sin embargo, al solo contar con la información de un año se tomará la información reportada por Duarte (2017), donde utilizó métodos de interpolación espacial para determinar la precipitación media anual, con los datos de las estaciones meteorológicas cercanas al relleno sanitario.

Se revisaron las estaciones con datos de precipitación en lugares cercanos al PTAG por medio de la página oficial del IDEAM, además se revisó que estas estaciones tuvieran datos acerca de la precipitación en el tiempo correspondiente a 20 años. Se encontraron tres estaciones pluviométricas cercanas llamadas Aguablanca, Guayabal y Cerro Pelao.

Fue necesario realizar un proceso de validación cruzada, en el cual inicialmente se extrajo la información de la ubicación de los puntos en cada método determinístico, por medio de la herramienta de análisis espacial con el proceso de extracción usando el método de extraer valores

de puntos en ArcMap. En la tabla 4.8 se pueden encontrar los resultados de la validación cruzada realizada para seleccionar el modelo que mejor se adaptará a la realidad presentada por los datos del IDEAM.

Tabla 4.8. *Validación cruzada datos de precipitación.*

Estación	Resultado	Método determinístico		Desviación	
	precipitación	IDW	SPLINE	IDW	SPLINE
Tasajero	1.260.092.308	1.260.092.900	1.259.002.700	0.000592	1.089.608
Guayabal Doc	1.381.765.594	1.381.506.300	1.384.700.000	0.259294	2.934.406
Cerro Pelao Doc	1.104.886.621	1.104.906.700	1.103.324.000	0.020079	1.562.621
Aguablanca Doc	1.625.241.379	1.625.164.500	1.623.270.600	0.076879	1.970.779
Apto Camilo Daza Doc	904.183.333	904.223.200	909.212.600	0.039867	5.029.267
San Faustino	1.383.694.444	1.383.694.100	1.385.638.000	0.000344	1.943.556
Bocatoma Rio Zulia	1.493.732.453	1.493.730.100	1.495.549.100	0.002353	1.816.647
Urimaco	1.186.456.080	1.186.456.000	1.186.456.000	0.000080	0.000080
Total				0.399490	16.346.963

Fuente: Duarte, 2017.

Según los resultados encontrados los datos del modelo IDW presentan una desviación del resultado inferior, por lo tanto, es este el modelo que tiene los resultados que se pueden relacionar con los presentados por el IDEAM. Según este método la precipitación media que se encuentra en el PTAG está entre 1116 y 1257 mm/m²*año, por lo cual en las proyecciones de generación de biogás con el modelo colombiano de biogás se debe usar el rango de entre 1000 y 1500 mm/m²*año.

4.1.3.2 Evapotranspiración.

Con la información encontrada en el IDEAM que corresponde a la zona de interés, los Valores medios multianuales de evaporación en mm para el periodo comprendido entre 1981 y 2010 en el Aeropuerto Camilo Daza se aproximan a los 2211mm, la medición de este parámetro se dificulta al no contar con estaciones que lo midan cercanas al PTAG, según el Mapa de

evaporación total anual promedio multianual 1981-2010; la zona podría oscilar entre 1500 y 1900 mm de evaporación cada año. Para nuestro caso de estudio se tomará el valor medio del rango mencionado anteriormente el cual es 1700 mm/m² de evaporación anual.

4.1.3.3 Radiación Solar.

En la ciudad de Cúcuta según el documento publicado por el IDEAM: Promedios mensuales de irradiación global media recibida en superficie para las principales ciudades del país (Wh/m² POR DÍA) se recibe una radiación promedio mensual de 4443.8 o 4,4KWh/m².

Para la zona donde se encuentra ubicado el PTAG no se encuentran datos específicos, sin embargo, el IDEAM publicó el mapa multianual de la Irradiación global horizontal medio diaria anual (Apéndice 2), en ella se estimó la ubicación del PTAG encontrando que este estaba ubicado en un rango promedio de 4 – 4,5 KWh/m²/día. Para efectos de este estudio se usará el rango encontrado, ya que no se cuenta con información levantada directamente en el PTAG.

4.1.4 Condiciones de Operación del Relleno Sanitario.

A continuación, se realiza un recuento de las principales actividades constructivas y operativas del relleno sanitario, en efecto de establecer las recomendaciones técnicas que permitan mejorar el potencial de generación de biogás en el relleno sanitario del PTAG.

4.1.4.1 Construcción de Zonas de Disposición Final.

Como se ha mencionado en anteriores capítulos el método de operación del relleno sanitario es combinado entre el relleno tipo área y ladera. Aprovechando las depresiones naturales del terreno se han construido las zonas de operación mediante el movimiento de tierras, perfilamiento de taludes y adecuación de suelos de soporte.

De las 167 Ha que conforman el área del PTAG, 48 Ha están destinadas para usarse en la disposición de los residuos sólidos a través de dos grandes vasos (o depresiones naturales) llamadas Vaso Norte y Vaso Sur.

Actualmente se realiza la disposición en el vaso Norte con un área aproximada de 24 Ha, y se trabaja en la construcción del vaso sur con un área de 27 Ha, esto se puede ver en la Figura 9.

Teniendo en cuenta las densidades de compactación alcanzadas se dimensionan las celdas de disposición final para aproximadamente 1 mes de disposición con las siguientes dimensiones aproximadas 6 metros de alto, 30 metros de ancho y 30 metros de largo.



Figura 4.1. Zonas de disposición relleno sanitario PTAG.

Fuente: Aseo Urbano SAS 2017

En el vaso norte se han identificado diferentes zonas de disposición que ayudan a diferenciar las edades de los residuos, las profundidades alcanzadas y los volúmenes de residuos depositados en cada zona.

Lo anterior tiene relevancia porque la edad de disposición de los residuos influye directamente en la cantidad y calidad del biogás generado.

Inicio de operaciones – 23 de abril de 2001.

Fase 1. Enero del año 2003 – Diciembre del año 2005.

Fase 2. Enero del año 2006 – Febrero del año 2008.

Fase 3. Marzo del año 2008 – Marzo del año 2012.

Fase 4. Abril del año 2012 – Julio del año 2015.

Fase 5. Agosto del año 2015 – Mitad de Abril del año 2016.

Fase 6. Mitad de Abril del año 2016 – Agosto del año 2016.

Fase 7. Septiembre del año 2016 – Diciembre del año 2016.

Fase 8, Enero del año 2017 – Septiembre del año 2017.

4.1.4.2 Sistema de Impermeabilización de Fondo.

Para la impermeabilización de las celdas de disposición se utiliza membrana geotécnica construida con arcilla compactada hasta el 90% del Proctor Estándar. El procedimiento constructivo consiste en la extensión, luego de la excavación para terrazas, de capas de 20-25 cm de arcilla con el bulldozer, aplicación de agua en un porcentaje ligeramente superior al óptimo, amasado con el bulldozer y finalmente compactación con rodillo pata de cabra y vibrocompactador, hasta obtener un espesor mínimo de 1 m. El pie de los taludes es reforzado con muros de arcilla de la misma característica de la membrana geotécnica, lo que permite confinar los líquidos lixiviados y a la vez suministra estabilidad a los taludes.

CORPONOR estableció que la membrana geotécnica debería tener al menos una conductividad hidráulica igual o menor a 1×10^{-7} cm/seg con el fin de minimizar el riesgo

filtración de lixiviados y biogás hacia el subsuelo de la celda, evitando la contaminación de aguas subterráneas.

En la Tabla 4.9 se presentan los resultados de los ensayos de permeabilidad realizados a la arcilla de la geomembrana técnica del Vaso Norte.

Tabla 4.9. *Ensayo de permeabilidad Vaso Norte.*

Número de Informe	Fecha del Ensayo	Constante de Permeabilidad (K)
13-024	4-may-13	3,408 X10-8 cm/seg
15-006	3-mar-15	7,92 X10-8 cm/seg

Fuente: Aseo Urbano 2017

4.1.4.3 Manejo de Lixiviados.

El transporte de los lixiviados hasta el sitio de almacenamiento se construye desde el fondo del relleno sanitario y consiste en instalar una red de filtros de tuberías perforadas de alta densidad (HDPE) de 8 y 6 pulgadas de diámetro cubiertas por gavión y piedra, en forma de espina de pescado.

En los niveles superiores se construyen filtros secundarios, cubiertos por gavión y piedra, con una pendiente de mínimo el 2%, garantizando el direccionamiento del lixiviado hacia las tuberías de 8 pulgadas de los filtros principales, que se encargan de llevar los lixiviados hasta las piscinas de almacenamiento. Los sistemas de recolección de lixiviados se construyen en segmentos, a medida que cada sección se va desarrollando aproximadamente a una distancia de 40 metros, aunque esto puede variar según las condiciones de disposición.

Los lixiviados son transportados hasta piscinas de almacenamiento para realizar la evaporación natural o evaporación forzada como sistema de manejo con el que se garantiza que no exista vertimiento a ninguna fuente hídrica. En el relleno sanitario se tienen 4 piscinas de almacenamiento con una capacidad total de 25.000 m³.

Actualmente la medición de producción de lixiviados se realiza con una estación hidrométrica que consiste en una canaleta parshall, un sensor de nivel y un transmisor de datos.

En la figura 4.2 se presentan los datos de m³ de lixiviados generados durante el 2017.

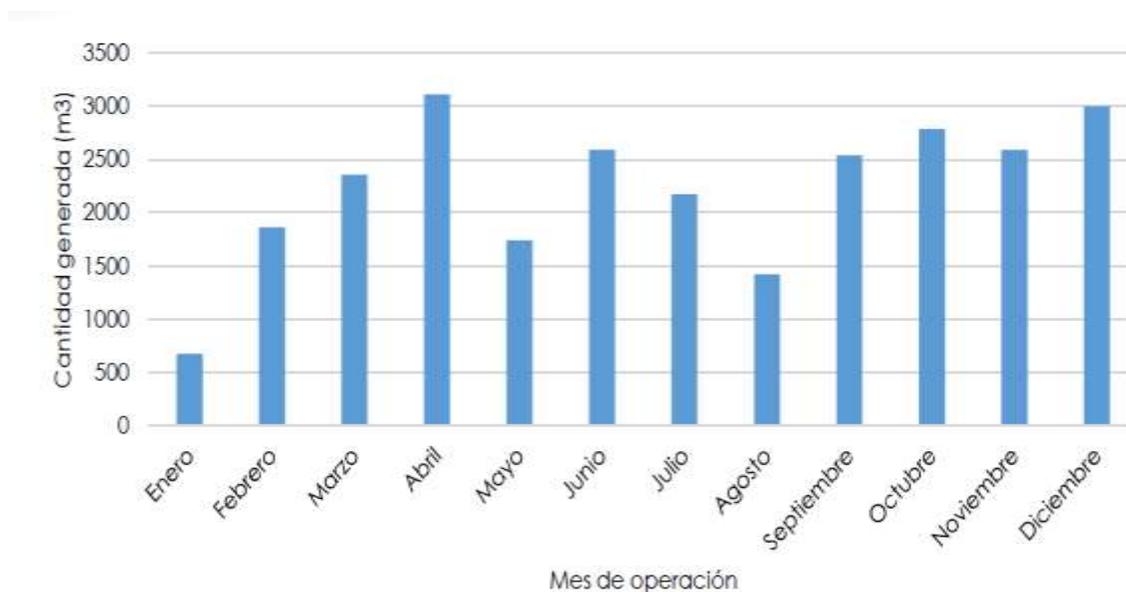


Figura 4.2. Generación de lixiviados 2017.
Fuente: Informe de gestión Aseo Urbano SAS, 2017

La media actual de producción de lixiviados es de 0,866 l/seg, y en esta media influye en gran medida la infiltración de agua lluvia por precipitación directa sobre zonas de disposición actual o zonas no clausuradas.

Para el manejo de los lixiviados se utiliza en el PTAG varios sistemas, evaporación natural que se da directamente en las piscinas de almacenamiento, evaporación forzada a través de un equipo llamado LanShark o recirculación en zonas de disposición actuales.

Evaporación forzada: En el PTAG se implementó durante el año 2017 un sistema para la evaporación forzada de lixiviado a través de un equipo llamado LandShark. Este equipo se compone de un sistema de succión y un sistema de pulverización que trabajan en conjunto, aprovechando la alta temperatura presentada en la zona, se pulveriza el lixiviado con ayuda de

una turbina integrada de alta potencia, una vez en el aire se evaporan dos de cada tres gotas expulsadas. La gota no evaporada cae nuevamente sobre la piscina de almacenamiento, en la figura 4.3 se puede observar la operación del LandShark ubicado sobre una piscina de almacenamiento.



Figura 4.3. LandShark para evaporación de lixiviados.
Fuente: Aseo Urbano SAS, 2017

El equipo LandShark es una solución efectiva para el control de lixiviados, según información extraída de los informes de operaciones mensuales del PTAG, este equipo puede alcanzar una tasa de evaporación cercana a los 100 m³/día de operación, funcionando aproximadamente de 10 a 12 horas continuas.

Evaporación pasiva: Aprovechando las altas tasas de radiación solar, evapotranspiración y los fuertes vientos que se presentan en el relleno sanitario se realiza el almacenamiento de los lixiviados en piscinas con un área de exposición de 8 Ha. Aunque este sistema no es tan eficiente como el sistema de bombeo o evaporación forzada, se obtienen buenos resultados en los meses de fuerte radiación solar.

Evaporación sobre zonas de disposición final: Otro sistema utilizado para la evaporación de los lixiviados es llevar el lixivado con la ayuda de motobombas hasta las zonas de disposición final. De esta manera se aumenta el área de evaporación y el lixivado al colocarse sobre zonas de disposición con cobertura en arcilla no se infiltra.

4.1.4.4 Manejo de Gases.

Para la evacuación de los gases en el relleno se ha utilizado un sistema de chimeneas construidos cada 40 mts con las siguientes dimensiones.

Esta construcción será de 1.0 metros cuadrados de área.

Se coloca verticalmente una malla para gavión (malla de triple torsión en alambre de calibre 12 o similar de dimensiones 2 x 1 x 1).

Se llena de piedra de río de diámetro entre 4" a 6".

En el centro de la estructura se coloca tubería de PVC, manguera de baja o alta densidad de 4" de diámetro debidamente perforada o ranurada cada 10 centímetros con el objeto de garantizar la entrada de gases por el contacto piedra-basuras.

La estructura de la chimenea está conformada por la piedra y la tubería. A medida que los niveles de residuos van avanzando verticalmente de la misma manera la estructura se va llenando hasta alcanzar las cotas de diseño final.

Actualmente el biogás es generado y emitido directamente a la atmósfera, en el año 2011 operó el proyecto de extracción y combustión de biogás en el marco del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del protocolo de Kioto. A continuación, se hace un recuento de la información encontrada en Aseo Urbano relacionada con el desarrollo de este proyecto.

El proyecto consistía en extraer, controlar y destruir mediante la quema controlada el Biogás que se genera a partir de la disposición de residuos en el sitio, particularmente su contenido de

metano (CH₄), logrando con ello una importante contribución para la reducción de los gases de efecto invernadero.

Para el desarrollo del proyecto se instalaron pozos verticales de extracción de biogás en áreas que se encontraban finalizadas. Los pozos dependiendo de la altura de los residuos tenían una profundidad promedio de 20 m. En la primera fase del proyecto se construyeron 21 pozos verticales los cuales se interconectaron por medio de una red de tuberías en PEAD desembocando en un dispositivo supresor que alimentaba la antorcha de quema, realizando la extracción del biogás mediante un sistema de ventilación forzada.

De igual forma se realizó el sellamiento de algunos pozos utilizando un empalme con la tubería perforada y el cubrimiento con geo-membrana HDPE 1,5 mm. De esta manera se mejora



Figura 4.4. Perforación de pozos proyecto MDL Biogás.

Fuente: Bionersis 2011

las condiciones de cobertura final para la extracción forzada del biogás.

En el lugar donde se ubicaba el proyecto de quema de biogás, “BIONERSIS” aún se conservan algunos de los equipos dejados por la empresa, según Aseo Urbano E.S.P., los

equipos son de su propiedad y pueden tenerse en cuenta para el desarrollo de las alternativas seleccionadas. En la revisión se encontraron los siguientes elementos.

- Chimenea de incineración del biogás.
- Equipo de filtros de húmedas y H₂S.
- Motor y blower industrial para la succión del biogás.
- Sistemas de tuberías y conexiones.

En la Figura 4.5 se observan los equipos que se encuentran en las instalaciones de Aseo Urbano, estos equipos requieren de una prueba de funcionamiento para determinar en qué condiciones se encuentra. En la Figura 4.5a se puede observar la chimenea de combustión del biogás con capacidad de 1000m³/hora, dicha chimenea se podrá usar para quemar el biogás de exceso que se produzca en el desarrollo de cualquier proyecto. En la Figura 4.5b se observa el equipo eliminador de humedad y el filtro de H₂S necesarios para purificar el biogás a usar, estos equipos se podrán incluir al proceso de algunos proyectos y en la Figura 4.5c se observa la presencia del blower industrial el cual sirve para realizar la succión del biogás de la masa de residuos y el motor que alimenta el blower con una potencia de 18.5 kW a 220 voltios.

4.1.4.5 Trituración y Compactación de Residuos.

Durante la operación del Vaso Norte se han realizado cambios operativos, provocados por el aumento en la producción per cápita de residuos a nivel local y regional, el hecho de pasar de ser un relleno sanitario local a ser un relleno sanitario regional significó el cambio de procesos operativos, la dimensión del frente de trabajo, los diámetros de las tuberías para conducción de lixiviados, la densidad de compactación, la remoción de las coberturas intermedias y la adecuación de las zonas clausuradas son algunos de los procesos que se vieron afectados, Aseo

Urbano S.A.S. E.S.P. ha realizado las modificaciones necesarias a nivel operativo, para evitar que se generen afectaciones ambientales a las zonas de influencia del proyecto, y con el fin de dar cumplimiento a la licencia ambiental otorgada por CORPONOR..

Los residuos sólidos una vez son dispuestos en la celda de operación, el bulldozer inicia la actividad de compactación y trituración de residuos hasta alcanzar la densidad deseada, que debe ser mínimo de 800 Kg/m³.

El equipo utilizado para la compactación de residuos debe cumplir mínimo con las siguientes especificaciones:

Peso mínimo: 1800 Kg

Longitud mínima de pasadas: 180 mm a 200 mm

Número mínimo de pasadas: 4 - 5 del compactador aprobado y verificado para obtener densificación de la referencia.

Para efectos de modelación de generación de gases se trabajará con la densidad promedio calculada en 0,92 Ton/m³, de acuerdo a los informes de operación del relleno sanitario

4.1.4.6 Material de Cobertura.

A medida que se avanza en la construcción de celdas de disposición final, lo recomendable es instalar una cobertura intermedia en material impermeable con el fin de que en caso de presentarse precipitaciones no se generen filtraciones de agua que aumenten considerablemente el caudal de lixiviados. En las zonas actuales de disposición final del Vaso Norte se usa material arcilloso para construir la capa superior de las celdas, según el RAS 2017, es recomendable que en caso de ser un material impermeable como la arcilla este sea removido al momento de

empezar a disponer residuos de una nueva celda sobre él, con el fin de que por la masa de residuos se puedan mover los lixiviados y el biogás tanto horizontal como verticalmente.

En el Vaso Norte no se tiene evidencia de que se realizará la remoción del material de cobertura intermedia en las celdas iniciales de disposición, la disponibilidad operativa de la maquinaria amarilla influye directamente sobre este proceso, ya que, al tener limitaciones operativas de la maquinaria en muchos casos no se realiza la remoción de la cobertura intermedia.

4.1.4.7 Estabilidad Geotécnica del Relleno.

Con el objeto de conocer el comportamiento de las zonas rellenas, establecer la estabilidad y disminuir los riesgos por movimientos en masa, en el relleno sanitario se realizan estudios de estabilidad geotécnica con empresas especializadas contratadas para esta actividad.

En el Estudio de Estabilidad Geotécnica realizado en el 2015 se realizaron sondeos en tres puntos de la masa de residuos incluyendo zonas antiguas de disposición, en el sondeo se determinó el perfil geotécnico, la información encontrada se muestra en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10. *Resultados de estudio de estabilidad geotécnica.*

Sondeos	Ubicación		Cota de altitud (m)	profundidad del nivel de lixiviados (m)	Edad de los residuos	Descripción
	Coordenada norte	Coordenada este				
1	1'378.183	841.767	289	10	12 años a 9 años	Se encontró material de cobertura de 0 a 2,2 m y de 10 a 15 m de profundidad
2	1'377.974	841.685	294	9	Años a 5 años	Se encontró material de cobertura de 0 a 1 metros, de 4 a 6 metros y de 7 a 14

Sondeos	Ubicación		Cota de altitud (m)	profundidad del nivel de lixiviados (m)	Edad de los residuos	Descripción
	Coordenada norte	Coordenada este				
						metros de profundidad
3	1'377.978	841.909	304	4	4 años a 3 años	Se encontró material de cobertura de 0 a 1 metro y de 4 a 15 metros de profundidad.

Fuente: Estudio de estabilidad geotécnica, 2015.

De acuerdo con la información suministrada por este estudio, en los puntos de los sondeos se encontró que en el perfil geotécnico existen evidencias de que no se realizaba la remoción del material de cobertura intermedia antes de disponer el siguiente nivel de residuos, lo que genera que existan bolsas de lixiviados o biogás o zonas aisladas de residuos sólidos. Se encontró que si bien estas bolsas no generan riesgos de estabilidad deben ser monitoreadas y deben tenerse en cuenta en los procesos de extracción del biogás. A pesar de que la generación de biogás se ve beneficiada cuando la humedad es alta, el exceso de la misma puede detener el proceso, es importante realizar antes de empezar un proyecto de aprovechamiento un sondeo en la masa de residuos que determine la ubicación de dichas bolsas de lixiviado y la forma en la cual se deben manejar.

4.1.4.8 Cierre y Clausura de Zonas de Disposición Final.

Una vez se alcance la altura de las celdas se debe realizar el cierre final de las zonas de disposición. El método de cierre tendrá interferencia en la filtración de aguas lluvias por precipitación directa y por el ingreso del oxígeno que afectará la calidad del biogás.

Dependiendo de los planes futuros a los que se destine el terreno sobre el cual se hizo la disposición de residuos, se debe realizar la cobertura de cierre, o cobertura final que consta de un sistema que evite el ingreso de raíces y precipitaciones a la masa de residuos, además que así mismo evite la migración de lixiviados y biogás fuera de ella.

4.2 Estimación del potencial de generación de Biogás en el PTAG

En el presente capítulo se realizará la aplicación del modelo colombiano de Biogás, el cual provee una herramienta de estimación automatizada que permite cuantificar la generación y recuperación del biogás en rellenos sanitario en los diferentes departamentos del país.

El modelo aplica ecuaciones separadas para calcular la generación del biogás de los cuatro grupos de residuos orgánicos de acuerdo con el nivel de degradación.

1. Residuos de degradación muy rápida: residuos de comida y residuos de pañales.
2. Residuos de degradación moderadamente rápidos: residuos vegetales, podas y papel higiénico.
3. Residuos de degradación moderadamente lenta: papel, cartón y textiles.
4. Residuos de degradación muy lenta: madera, caucho, piel, huesos, paja.

La generación del biogás es calculada como la suma de las cantidades de generación de las cuatro categorías de residuos. (EPA, 2009)

El modelo se basa en la ecuación creada por la US EPA para el modelo estadounidense de biogás LandGEM en el año 2005 y utilizando la ecuación de degradación de primer orden que fue explicada de manera amplia en el capítulo de metodología.

La ecuación estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a través de un año, las proyecciones para años siguientes son desarrolladas variando la proyección anual y luego repitiendo la ecuación.

El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales). Con la excepción de los valores de k y L_0 , el modelo colombiano de biogás requiere datos específicos del relleno en cuestión para calcular las proyecciones de generación. El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales).

Los valores de k varían dependiendo del clima y el grupo de residuos. El clima esta categorizado en cinco regiones basándose en la precipitación anual promedio, la temperatura y localización dentro de una de las cinco regiones geográficas en Colombia. Los índices de disposición anual, los valores de k y L_0 , los factores de corrección de metano y ajuste por incendio y estimaciones de la eficiencia de captura son usados para estimar la generación y recuperación de biogás para rellenos sanitarios en cada uno de los departamentos de Colombia (EPA, 2009).

El modelo se corrió utilizando la información propia del relleno sanitario de acuerdo a las proyecciones de toneladas y condiciones de operación. En la Tabla 4.11 se presenta la hoja de alimentación del modelo Colombiano de Biogás.

Tabla 4.11 *Información Modelo Colombiano de Biogás.*

Información de Alimentación	
1	Nombre del sitio: Parque de Tecnología Ambiental Guayabal

Información de Alimentación		
2	Ciudad:	Cúcuta
3	Departamento:	Norte de Santander
4	Seleccionar una de 5 regiones geográficas en Colombia:	Andina
5	Seleccionar una de 5 zonas climáticas basado en la precipitación anual promedio:	Moderadamente Húmedo (1000-1499 mm/yr)
6	¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión?	Si
7	Año de apertura del sitio:	2001
8	Disposición anual del año más reciente (Mg/año):	303124 Mg
9	Año de disposición (ver #8):	2017
10	¿Existe información sobre el volumen total dispuesto en el sitio (volumen o masa)? Si no existe información, entonces pasar al #15	Si
11	¿Existe información sobre la disposición histórica de residuos para calcular el Mg. dispuesto en sitio?	Si
12	¿Cuál es el estimado de residuos puesto en sitio al final del año? (ver #9)	3492358 Mg
13	¿Cuál es la densidad estimada en sitio en Mg./m ³ ? (rango típico: 0.5-1.0):	0,92 Mg/m ³
14	Si el volumen de residuos puesto en sitio se encuentra en (m ³), convertir a Mg.:	Mg
15	Año de clausura actual o proyectado:	2026
16	Crecimiento estimado en la disposición anual:	2,0%
17	Profundidad promedio del relleno sanitario:	20 m
18	Diseño y prácticas de manejo del relleno sanitario (condiciones históricas promedio):	2
19a	¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?	No
19b	Si la respuesta a 19a es "Si", indique el área del impacto en % del total del relleno sanitario:	0%
19c	Si la respuesta a 19a es "Si", indique la gravedad o impacto del incendio:	0
20	Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado):	2019
21	Porcentaje del área con residuos que cubre el sistema de captura:	96%
22	Porcentaje del área con residuos con cubierta final:	26%
23	Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia:	70%
24	Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria:	3%
25	Porcentaje del área con residuos sin cobertura:	1%

Información de Alimentación		
26	Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana:	100%
27	¿La compactación de residuos se hace regularmente?	Si
28	¿La disposición de residuos se hace en un área específica?	Si
29a	¿Existe el afloramiento/brote de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?	Si
29b	Si la respuesta de 29a es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover?	Si
30	Eficiencia de captura estimada:	73%

Para efectos de calcular la proyección del biogás se trabajó con dos escenarios basados en la eficiencia de captura del biogás:

Escenario 1: Eficiencia de biogás conocida (medida): Para este escenario se utilizó la eficiencia calculada por la empresa Bionersis en el momento en que operó el sistema de extracción y combustión del biogás. La eficiencia calculada es la eficiencia real (medida) sobre la generación de biogás modelada. La eficiencia utilizada para el primer escenario es del 60%.

Escenario 2: En base a la evaluación del sitio, condiciones de operación y mantenimientos, se calcula la eficiencia de captura. Para este caso la eficiencia se calculó en el 73% de acuerdo a los resultados que se muestran en Tabla 4.12 y que son deducidos por el modelo colombiano.

Tabla 4.12. *Eficiencia según aspectos operativos.*

Aspectos operativos	Porcentajes de Eficiencia de Captura
Corresponde a la practicas del manejo del sitio	100%
Corresponde a la profundidad de residuos	100%
Área de cobertura del sistema de captura	96%
Cobertura superior y su cobertura	79%
Recubrimiento inferior y su cobertura	79%
Compactación de los residuos	79%
Área de disposición designada	79%

Aspectos operativos	Porcentajes de Eficiencia de Captura
Lixiviado	73%
Eficiencia de Captura Estimada	73%

Como se puede observar algunas zonas del vaso norte carecen de un adecuado cierre de cobertura final, aproximadamente el 70% de la cobertura de la masa de residuos no tiene las condiciones de permeabilidad necesarias para evitar la migración del biogás, ya que se encuentran con cobertura intermedia. El área de residuos expuesta sin cobertura se aproxima al 1% del área total del vaso norte.

Es necesario considerar la cobertura de estos residuos al presentarse precipitaciones, pues la filtración que provocan las zonas expuestas aumenta considerablemente la generación de los lixiviados. Según la información encontrada el suelo de soporte de todo el vaso norte se encuentra fabricado en membrana geotécnica de arcilla con el coeficiente de impermeabilidad requerido en la licencia ambiental de acuerdo con los requerimientos de CORPONOR. No se tienen registros de incendios que se hayan presentado en la masa de residuos del vaso norte, y por último se consideró que se podía instalar un sistema de captura de biogás que cubriera al menos el 96% de la masa de residuos.



Figura 4.5. Equipos del proyecto de extracción y combustión de Biogás.
Fuente: (Aseo Urbano, 2017).

En la Tabla 4.12 se presentan los datos utilizados por el modelo como caracterización de residuos, utilizando la información disponible en el Parque de Tecnología Ambiental Guayabal y por defecto se presenta los datos que el modelo tiene para el departamento de Norte de Santander.

En las Tablas 4.13 y 4.14 se presentan los resultados obtenidos en la proyección del Biogás, con el escenario No. 1 del 60% de eficiencia y el Escenario 2 del 73%.

Además, calcula la reducción de emisiones en toneladas de CO₂-equivalente por cada año, teniendo en cuenta solo el metano reducido usando la densidad del metano en Ton/m³.

Tabla 4.13. Caracterización de residuos.

Categoría de Residuo	Datos Específicos al Sitio	Norte de Santander
Comida	60,0%	49,8%
Papel y Cartón	6,7%	15,9%
Poda (jardines)	3,6%	5,1%
Madera	1,4%	2,0%
Caucho, Piel, Huesos y Paja	3,8%	2,2%
Textiles	3,8%	2,8%
Papel Higiénico	1,2%	0,0%
Otros Orgánicos	0,0%	0,0%

Categoría de Residuo	Datos Específicos al Sitio	Norte de Santander
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	1,0%	0,0%
Metales	0,7%	0,7%
Construcción y Demolición	0,9%	0,0%
Vidrio y Cerámica	1,9%	6,7%
Plásticos	12,0%	4,7%
Otros Inorgánicos	3,0%	10,1%
Total	100,0%	100,0%
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	60,2%	49,8%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	4,8%	5,1%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	10,5%	18,7%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	5,2%	4,2%
Total Orgánicos	80,7%	77,8%
Total Inorgánicos	19,3%	22,2%
Lo de degradación rápida calculado	70	70
Lo de degradación moderadamente rápida calculado	103	103
Lo de degradación moderadamente lenta calculado	175	175
Lo de degradación lenta calculado	200	200

Fuente: Modelo Colombiano de Biogás, 2017

De acuerdo con los resultados proporcionados por el Modelo Colombiano de Biogás, en el año 2019 se generarán en el relleno sanitario 2.503 m³/hr. de biogás. Esta cantidad es equivalente a 1473 m³/hr metano, teniendo en cuenta el factor de corrección de metano y una eficiencia de extracción del 73%, teniendo en cuenta las condiciones actuales de operación del relleno sanitario. El modelo también permite calcular las reducciones estimadas de Ton CO₂-eq/año calculadas en 164.847.

En la Figura 4.6, se observa que la curva de generación de biogás para el escenario 2, crece hasta el año 2026 –año en que se genera la mayor cantidad- y a partir de ahí, comienza a disminuir paulatinamente hasta el año 2033, y finalmente disminuye drásticamente hasta el año 2043.

Tabla 4.14. Resultados obtenidos en la proyección del Biogás, con el escenario No. 1.

Tabla 4.15. Resultados obtenidos en la proyección del Biogás, con el escenario No.2.

Año	Disposición (Mg/yr)	Acumulada Disposición (Mg/yr)	Generación de Biogás			de Captura	Recuperación de Biogás Estimada			Reducción de Emisión	
Año	(Mg/yr)	Acumulada	(m3/hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)	(%)	(m3/hr)	(cfm)	(mmBtu/hr)	(tonnes CH4/yr)	(tonnes CO2eq/yr)
2001	84.699	84.699	0	0	0.0	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2002	131.202	215.901	197	116	3.5	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2003	126.696	342.597	462	272	8.8	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2004	136.208	478.805	468	280	8.59	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2005	188.649	667.454	493	297	8.60	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2006	186.208	853.662	668	398	11.98	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2007	186.649	1040.311	894	527	16.6	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2008	243.798	1284.109	1.516	892	19.8	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2009	296.169	1580.278	1.724	1.043	29.8	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2008	245.996	1.736.646	1.916	1.036	27.5	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2009	268.206	1.999.842	2.126	1.057	38.8	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2010	245.974	2.234.416	2.945	1.380	34.9	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2011	249.342	2.504.142	2.453	1.347	38.8	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2014	394.486	2.896.244	2.627	1.386	46.9	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2015	394.426	3.410.677	2.844	1.674	60.8	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2016	309.437	3.800.324	3.690	1.782	64.9	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2017	302.434	3.727.618	3.427	1.882	57.4	0%	0	0	0.0	0.0	0.0
2018	303.727	4.030.642	3.632	1.983	59.4	60%	1.993	1.073	66.6	6251	131.276
2019	302.190	4.333.832	3.462	2.018	61.3	60%	2.857	1.211	66.8	6452	135.491
2020	303.370	4.634.202	3.235	2.054	63.2	60%	2.451	1.248	43.9	7662	149.996
2021	304.080	4.935.882	3.421	2.018	61.3	60%	2.585	1.486	49.0	7881	164.372
2022	328.148	5.264.030	3.335	2.080	62.9	60%	2.818	1.516	40.2	8.603	168.559
2023	327.680	5.591.710	3.821	2.298	68.9	60%	2.638	1.561	41.3	8.535	173.075
2024	326.100	5.917.810	3.909	2.335	70.8	60%	2.735	1.618	48.6	8.573	186.138
2025	348.190	6.266.000	4.057	2.368	72.7	60%	2.740	1.736	43.6	8.692	190.191
2026	341.120	6.607.120	4.160	2.457	76.0	60%	2.805	1.704	44.8	9.065	194.264
2027	0	6.950.360	4.262	2.521	79.7	60%	2.891	1.713	35.9	8.060	199.280
2028	0	7.293.600	4.360	2.590	83.4	60%	2.960	1.724	38.1	9.081	204.392
2029	355.150	7.648.750	4.472	2.657	87.6	60%	3.048	1.794	51.9	9.227	209.707
2030	0	8.003.900	4.570	2.720	91.1	60%	3.128	1.840	31.9	9.325	214.737
2031	0	8.359.050	4.665	2.780	94.5	60%	3.199	1.888	32.0	9.803	219.753
2032	0	8.714.200	4.757	2.838	97.9	60%	3.269	1.936	32.6	8.123	224.769
2033	0	9.069.350	4.847	2.896	101.3	60%	3.340	1.984	45.1	6.803	229.785
2034	0	9.424.500	4.934	2.954	104.8	60%	3.411	2.032	45.1	6.303	234.801
2035	0	9.779.650	5.019	3.011	108.3	60%	3.482	2.080	36.8	4.648	239.817
2036	0	10.134.800	5.102	3.068	111.8	60%	3.553	2.127	36.8	4.148	244.833
2037	0	10.490.000	5.183	3.125	115.3	60%	3.624	2.175	37.9	3.648	249.849
2038	0	10.845.200	5.262	3.182	118.8	60%	3.695	2.222	37.9	3.148	254.865
2039	0	11.200.400	5.339	3.239	122.3	60%	3.766	2.270	28.4	2.648	259.881
2040	0	11.555.600	5.414	3.296	125.8	60%	3.837	2.317	28.4	2.148	264.897
2038	0	6.680.362	961	566	17.2	73%	702	413	12.5	2.200	46.202
2039	0	6.680.362	886	521	15.8	73%	647	381	11.6	2.028	42.592
2040	0	6.680.362	822	484	14.7	73%	600	353	10.7	1.881	39.502

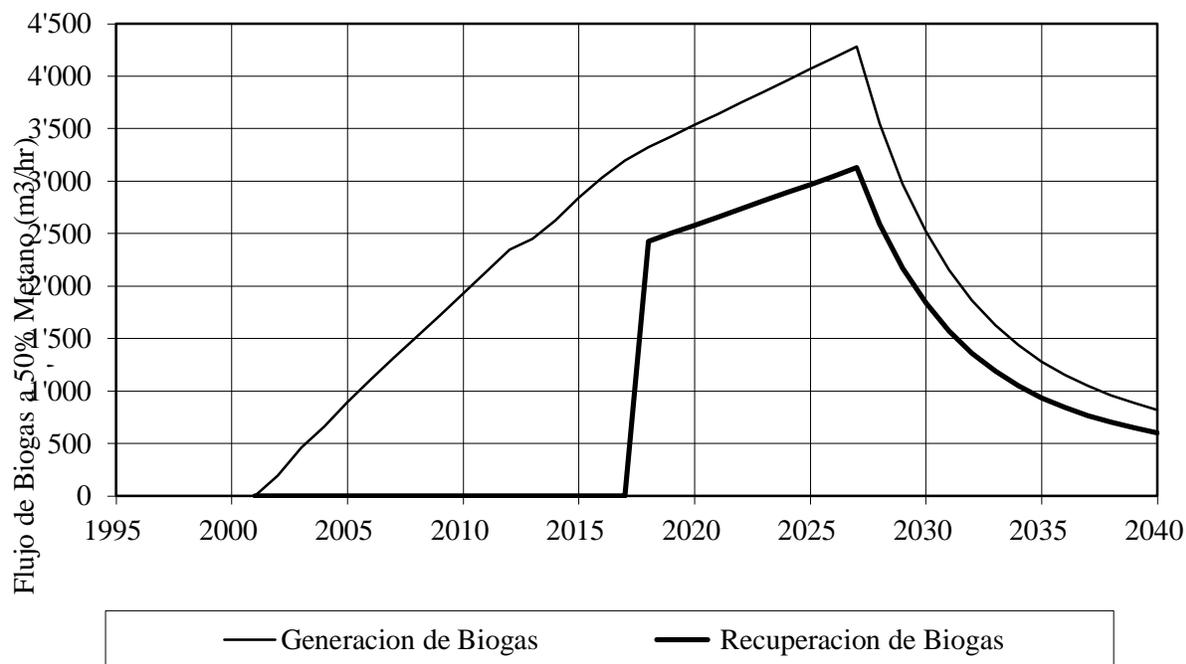


Figura 4.6. Curva de generación de Biogás con 73% de eficiencia.

A pesar de que la estimación de generación de biogás con el uso de modelos de ecuaciones matemáticas no es precisa, resulta ser una herramienta muy útil, pues brinda un primer reconocimiento de lo que se pudiera encontrar en la generación de biogás en determinado lugar. La exactitud de los resultados depende en su mayoría de la calidad de los datos ingresados. En muchos rellenos sanitarios las condiciones operativas no permiten realizar de manera adecuada un estudio de generación en el cual se puedan revisar cada uno de los pozos de salida de biogás, por lo cual en muchos casos es el modelo de proyección el insumo principal de una investigación de aprovechamiento de biogás.

4.3 Mediciones en Campo de Composición y Caudales

En el Parque de Tecnología Ambiental Guayabal a diciembre de 2017 se han construido 131 chimeneas, de las cuales se estima que más de 120 generan algún tipo de emisión atmosférica y

el restante se encuentran obstruidas por material arcilloso transportado por la lluvia o ya se encuentran en unas zonas demasiado antiguas. En el reconocimiento de campo se encontraron 4 chimeneas que habían sido adecuadas para el proyecto de Bionersis, las cuales tienen estructura en cemento y se les instaló un cabezal para las mediciones, tal como lo muestra la Figura 4.7.

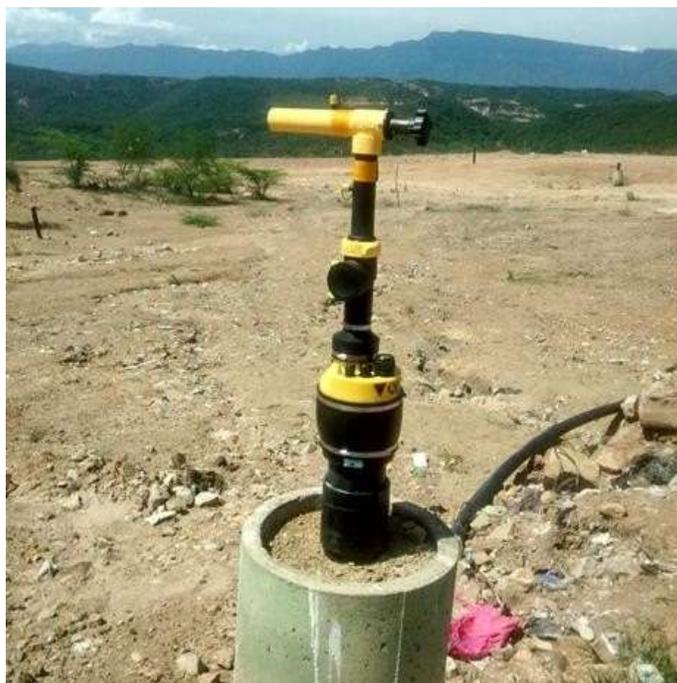


Figura 4.7. Chimeneas de proyecto Bionersis.

Se realizó el levantamiento de mediciones de biogás que se han realizado en cumplimiento del monitoreo ambiental trimestral y de otros estudios que se han realizado en el relleno sanitario.

En la tabla 4.16 se observan los resultados obtenidos para mediciones en campo del vaso norte, con un analizador GEM500, obteniendo 52,9% de contenido de metano en las chimeneas analizadas, con una temperatura promedio de 41,9 °C.

Tabla 4.16. *Composición de Biogás 2016.*

Numero de pozo	Composición			Temperatura °C
	CH4	CO2	O2	
1	51.7	40.5	1.6	37.77

	54.9	43.6	0.3	45.55
2	54.2	43.3	0.4	41.11
	54	42.8	0,3	37.77
3	53.2	43.3	0.8	43.33
4	50.9	45	0.8	45.55
	50.8	44.8	0.7	45.55
5	53.3	44.9	0.8	38.33
Total	52.88	43.53	0.77	41.87

Fuente: Informe trimestral Aseo Urbano SAS, 2017

Trimestralmente en el PTAG, se realiza un monitoreo de la calidad del aire, el cual incluye el análisis de la composición del biogás, el laboratorio encargado ADA y Co, realiza la medición por medio de una campana fabricada en acero inoxidable que se ubica sobre las chimeneas de gavión para tomar una muestra acertada de la producción de la chimenea, sin embargo la falta de un sello adecuado provoca la entrada de aire a la muestra, debido a esto en los resultados obtenidos de estos informes es común encontrar altos contenidos de Oxígeno (O₂).

En la tabla 4.17 se pueden observar algunos de los resultados entregados por la empresa ADA y Co, de los monitoreos trimestrales de biogás.

Tabla 4.17. *Composición porcentual del Biogás.*

Numero de pozo	Composición				Caudal m ³ / Hr
	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂ atm	
3	43	38	4	15	0.6
4	14.1	0.2	18	67.7	0.8
5	11.3	3	18	67.7	2.5
6	19.5	7.2	15.4	57.9	1.2
51	28.9	14	12	45.1	3
53	72.5	18	2	7.5	4.2
57	35.9	26	8	30.1	1
76	45	36	4	15	10.9
102	12.1	2.2	18	67.7	1.9
Total	31.37	16.07	11.04	41.52	2.90

Teniendo en cuenta los resultados de la empresa ADA y Co, se encuentra que sólo en una chimenea el metano supera la concentración del 50% y al contrario se reportan altos porcentajes de oxígeno y nitrógeno atmosférico.

Revisando el procedimiento utilizado por la empresa para realizar las mediciones se encontró que utilizan una campana en acero inoxidable que envuelve el gavión y al final de la campana instalan una manga para la captura del biogás y posterior análisis en laboratorio. Sin embargo, tal como se evidencia en la Figura 4.8, el sistema permite que el biogás se mezcle con el aire que entra por la campana en el área señalada lo cual interfiere en el resultado.



Figura 4.8. Campana para captura de muestra de Biogás.
Fuente: Duarte, 2017

Para el desarrollo del proyecto Aseo Urbano adquirió un analizador portátil Biogás 5000, un cabezal de chimenea de última tecnología y un equipo de succión, para simular la extracción activa del biogás. El equipo biogás5000 marca Landtec cumple con todos los requerimientos de ley para los analizadores en campo, además cuenta con certificado ATEX el cual garantiza el

trabajo seguro en ambientes explosivos. El cabezal de pozo de marca QED, permite conectar las sondas del equipo Biogás5000 y realizar mediciones de caudal por medio de un sistema de orificios concéntricos y la medición de las variaciones de presión antes y después de los orificios. El equipo de succión (blower) de 0,75 Hp permite ejercer presión negativa a un sistema cerrado, este equipo trabaja haciendo succión de poco más de 1 metro columna de agua sobre un sistema con tubería de 2 pulgadas.

Al realizar el análisis de los factores externos que pudieran alterar la composición del caudal de biogás que sale de cada chimenea, se observó que un factor importante es la forma en la cual se encuentran construidas las chimeneas de evacuación de gases. El uso de gaviones en la construcción de las chimeneas permite que el biogás se desplace rápidamente distribuyéndose por la piedra, así mismo el caudal de aire circundante se mezcla con el caudal de biogás incluso antes de este abandonar la estructura de gavión.

Para el desarrollo de las mediciones de campo se construyó una campana, de acuerdo a las dimensiones y diseño que se presentan los gaviones utilizados en los pozos de venteo o chimeneas.

En algunas de las chimeneas fue necesario realizar las adecuaciones de la salida de la chimenea con el fin de utilizar correctamente la campana y que no se presentaran los mismos errores ocurridos en los análisis expuestos anteriormente.

Luego de realizar la remoción del gavión se procedió a instalar la campana fabricada por Aseo Urbano en aluminio y se instaló sobre ella el cabezal de pozo. En la Figura 4.9 se puede



Figura 4.9. Campana y cabezal para análisis de biogás.

Fuente: Propia

observar la forma de utilización de la campana y el cabezal en las mediciones de campo.

Se tuvo especial cuidado en realizar un adecuado sellado de la parte inferior con la nueva campana de medición, y con la ayuda del cargador colocar la arcilla alrededor de cada una de las chimeneas donde se realizó el monitoreo.

Por condiciones operativas y de toma de muestras la campana se ubicaba con varias horas de anticipación o incluso el día anterior, con el fin de que la chimenea sobre la que se ubica logre evacuar el caudal de aire atrapado. La llave del cabezal de pozo se dejaba totalmente abierta para facilitar la migración del caudal de biogás, en el sello inferior de la campana se humecta la arcilla y se le aplicaba peso con el fin de compactar adecuadamente el sello y evitar la migración de biogás o la entrada de caudal de aire.

Solo en algunas de las chimeneas con tubería instalada se pudo usar el cabezal de pozo, debido a que en la operación de Bionersis quedaron algunas chimeneas con el cabezal instalado y este no permitía la instalación de un segundo cabezal.

En el diagnóstico de las condiciones del vaso norte se encontró que gran parte de las chimeneas no se encontraban marcadas con el número interno de identificación, por lo cual para efectos de este estudio se trabajó con las coordenadas de ubicación de los planos entregados por el área de proyectos. Se realizaron mediciones en varias chimeneas con tubería instalada, así mismo se realizaron mediciones a unas chimeneas que se le removió el gavión y por último se midió el biogás en chimeneas con gavión y sello de arcilla, en la Tabla 4.16 se presenta la ubicación y comentario de las condiciones de cada una de las chimeneas tomadas para el análisis.

Un aspecto importante fue el sellado al cual estaban sometidas las chimeneas sobre las cuales operaba Bionersis, la estructura y la profundidad de sus tuberías permitió realizar mediciones acordes a los requerimientos de sellado sin presentar la filtración de caudal de aire a la toma de la muestra. En las chimeneas 15, 51, 52.1 y 6.2 se instaló el cabezal de pozo, en todas ellas salvo en la chimenea 6,2 el contenido porcentual de metano CH₄ en el biogás supero el 53%, en la chimenea 6,2 se presentó la filtración de una corriente de aire, pues la tubería presentaba un orificio en la base. Las chimeneas 3, 4, 6, 6.1 y 21 contaban con cabezal previamente instalado en el proyecto de Bionersis, en ellas se realizó la medición introduciendo la sonda dentro del cabezal, de tal forma que la medida fuera tomada donde la corriente de aire no interfiriera.

De las anteriores chimeneas el número 4 fue la única que no presentaba un contenido porcentual de metano en su corriente de biogás superior al 30%, y fue la que presentó contenidos de oxígeno superiores al 6%.

En las chimeneas 38 y 48 se realizó la remoción del gavión en piedra y se ubicó la campana de aluminio, posterior a esto se realizó el sello con arcilla en la parte inferior, se realizó la medición continua de la composición del biogás encontrando a medida que transcurría el tiempo un descenso en el contenido porcentual de oxígeno en el biogás.

En la chimenea 38 la medición inicial arrojó un contenido porcentual de 33,1% de metano y 7,8% de oxígeno, y en la medición final realizada 20 minutos después se obtuvo 39,3% de metano y 5,5 de oxígeno, sin embargo, se observó que a pesar de dejar transcurrir más tiempo el imperfecto sello del sistema no permitía la evacuación total del oxígeno, ya que el aire circundante se filtraba al interior del sistema. En las chimeneas 69 y 105 se ubicó la campana de aluminio sin realizar la remoción del gavión y con la ayuda del retrocargador se ubicó arcilla a los costados de la misma realizando un sello impermeable. Las mediciones arrojaron bajos contenidos de metano y altos de oxígeno.

En la tabla 4.17 se pueden observar el resultado promedio del contenido porcentual de cada una de las chimeneas, allí se pueden observar las diferencias existentes en los resultados finales de cada una de las mediciones.

Como se esperaba en las antiguas chimeneas del proyecto Bionersis se presentó un alto contenido porcentual de metano en el biogás. Las condiciones de sellado de dichas chimeneas permiten que no se presente la filtración de caudal de aire, presentando contenidos porcentuales inferiores al 5% de oxígeno. Es de gran importancia conocer la cantidad de oxígeno presente en la mezcla de biogás, ya que una combinación adecuada entre oxígeno y metano podría provocar explosiones. La chimenea número 4 a pesar de tener una estructura de extracción del proyecto Bionersis, no presenta un alto contenido porcentual de metano en el biogás, sin embargo presenta un balance de gases del 50.4%, generalmente este balance de gases se compone esencialmente

por nitrógeno, tal y como se observa en la curva de generación de gases de vertedero mencionada en el marco teórico, en las zonas donde se está terminando la fase de producción metanogénica; el nitrógeno es el principal gas generado.

Según la revisión de los planos de la zona donde se ubican las chimeneas instaladas por Bionersis (zonas de disposición de 2005-2008), existe una tubería colectora de lixiviados que divide parte de esa zona, dejando fuera de contacto con los lixiviados la chimenea número 4 y otras instaladas en las primeras fases de disposición. Esta puede ser una de las razones por las cuales las demás chimeneas del proyecto Bionersis instaladas antes de la tubería colectora de lixiviados aún tienen una producción considerable de biogás con alto contenido porcentual de metano.

En promedio las chimeneas activas del proyecto Bionersis sin incluir la número 4 tienen un contenido porcentual de metano de 49.1% y un contenido porcentual de oxígeno que no superó el 1.2%. Estas tienen una composición adecuada para realizar proyectos de aprovechamiento energético pues estos generalmente son realizados con contenidos porcentuales de metano del 50%, sin embargo, además de la composición de biogás resulta de igual importancia conocer el caudal de generación de biogás. En rellenos sanitarios en los que no se tienen un sello impermeable adecuado sobre la masa de residuos se presentan migraciones del biogás, impidiendo que se realicen adecuadamente mediciones de composición y de caudal de generación. Se seleccionó la chimenea número 52.1 para realizar un ensayo de extracción versus presión de succión y la prueba del sistema de medición de caudal por orificios del cabezal de pozo QED, con el fin relacionar los cambios en el contenido porcentual del biogás según la presión negativa ejercida por los equipos adquiridos por Aseo Urbano S.A.S. E.S.P.

Para realizar las pruebas de extracción se utilizaron uniones de tuberías del proyecto Bioneris y una fuente de energía para lo cual se usó la planta eléctrica a gasolina de la PTAG. Se usaron los equipos adquiridos como el cabezal de pozo QED, el blower de succión de 0,75 HP, el equipo medidor de gases Biogás5000 y los orificios plásticos de medición de caudal. Se realizó un trabajo exhaustivo en el cual se tuvieron en cuenta normas de seguridad y salud en el trabajo, ubicando el caudal de salida de la chimenea lejos de la planta eléctrica para evitar la formación de atmosferas explosivas. En la Figura 4.10 se presenta una imagen de los equipos y pruebas de extracción realizadas.



Figura 4.10 Pruebas de extracción.

Teniendo en cuenta que cualquier tecnología de aprovechamiento que se vaya a realizar requiere de la extracción activa, es necesario conocer el comportamiento de la composición porcentual de biogás según la presión de succión ejercida en cada pozo de venteo y evaluar las condiciones operativas que puedan afectar el procedimiento. El sello final influye directamente en la filtración de oxígeno alterando la calidad del biogás con fines de aprovechamiento.

Si la evaluación de composición del biogás se realiza en una chimenea cuyos residuos se hayan dispuesto con un año de anterioridad, la probabilidad de encontrar un alto contenido porcentual de oxígeno debería ser mínimo.

Medición del caudal del biogás generado. El contenido porcentual del biogás se relaciona estrechamente con el caudal generado del mismo, generalmente el contenido porcentual evoluciona según la etapa de degradación anaeróbica en la que se encuentra, y el caudal depende principalmente de la cantidad de material orgánico disponible, sin excluir el fin de procesos operativos que condicionan el adecuado desarrollo de las fases anaeróbicas de los residuos y por consiguiente la generación del caudal correspondiente.

El caudal de generación en una chimenea no tiene un comportamiento constante, por la forma en la cual está construida la chimenea evacua el biogás de diferentes zonas de la masa de residuos. En el vaso norte una chimenea puede evacuar el biogás generado por residuos de diferentes edades de disposición y con contenidos de materia orgánica diferente, los modelos de proyección matemática estiman en un tiempo determinado el caudal medio que una masa determinada de residuos podría generar y la composición porcentual del mismo.

En rellenos sanitarios que no cuentan con los sistemas adecuados de evacuación de biogás de la masa de residuos, es complicado obtener una medida certera del caudal generado de biogás y de su composición porcentual. En el vaso norte más del 80% de las chimeneas no cuenta con una estructura adecuada para la evacuación del biogás, el uso del gavión es un método tradicional, en muchos casos podría considerarse ambiguo. En rellenos sanitarios modernos el gavión solo se usa para la estructura interna de la masa de residuos y se acompaña de tubería perforada de 8 pulgadas de HPED que sobre sale a la superficie, dicha tubería además de mejorar las

condiciones de evacuación del biogás permite monitorear el nivel de lixiviados en la masa de residuos.

En vista de las condiciones adversas encontradas en el vaso norte, se realizó la medición del caudal de generación por extracción pasiva, debido a la falta de un sello adecuado entre la campana de aluminio y la chimenea se dificultó la instalación del equipo de succión, y con ello la medición del caudal de extracción activa con el uso del cabezal de pozo QED y el método de orificios concéntricos.

La disponibilidad de materia orgánica después de tanto tiempo de disposición de los residuos afecta la generación del biogás, muy probablemente las chimeneas con alta producción de caudal reciben lixiviado filtrado por la masa de residuos con alta carga orgánica proveniente de las zonas de disposición actual. Según el modelo colombiano de biogás para este año la masa de residuos dispuesta en el vaso norte tendría una generación media de 3197 m³/hora de biogás con un contenido medio de 50% de metano, según las condiciones de manejo actual.

Las condiciones en las cuales se presenta la celda de disposición de residuos vaso norte no permiten realizar un adecuado estudio de medición de composición y caudal de generación de biogás, por lo cual para efectos de este estudio se trabajará con los resultados obtenidos con el modelo colombiano de biogás ya que este considera las características propias del lugar y alimentado con la información verídica levantada en la fase de diagnóstico de la celda de disposición final de residuos vaso norte. Se debe continuar con el análisis de la calidad del biogás generado en el vaso norte con el fin de levantar una línea base del comportamiento del mismo, además es prudente mejorar las condiciones de toma de muestras para disminuir la incertidumbre de los resultados encontrados.

4.4 Evaluación de Alternativas de Aprovechamiento de Biogás

Teniendo en cuenta las alternativas de valorización energética que se han utilizado en otros rellenos sanitarios y que podrían implementarse en el Parque de Tecnología Ambiental Guayabal, se realizó la evaluación desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

De acuerdo con las revisiones hechas en diferentes proyectos de aprovechamiento a nivel mundial y en condiciones similares al PTAG, por las proyecciones de biogás que se generan en el vaso norte sé que el uso de los motores de combustión interna se adecúa a las referencias teóricas. Los proyectos con el uso de estos motores suelen ubicarse dentro del rango de generación de 800 kW a 3 MW. Si el proyecto supera este valor se realiza la combinación de varios motores. Así mismo se puede alcanzar un mayor rendimiento con proyectos de cogeneración. (Blanco, Santalla, y Levy, 2017)

Así mismo el uso del biogás con tratamiento de Btu-alto para la inyección en las redes de distribución de gas natural, este uso se consideró debido a la cercanía de la red de transporte nacional de gas natural a la zona del PTAG; quedando a aproximadamente 4 kilómetros del vaso norte. Reduciendo además el uso de combustibles fósiles. (EPA, 2016)

Por lo anterior se evaluarán 2 alternativas de aprovechamiento, fundamentadas en el desarrollo normativo y la aplicación que han tenido estas tecnologías en rellenos sanitarios similares. Éstas alternativas son:

1. Uso directo como combustible (Biometano).
2. Generación de energía eléctrica.

Para la utilización de estas dos tecnologías se requiere en común de la construcción de un sistema de recolección y conducción de biogás y la eliminación de agentes nocivos. El nivel de

purificación del biogás dependerá de la tecnología a utilizar y se explicará en los próximos numerales.

Sistema de Recolección del Biogás.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) por medio del programa de extensión del metano de rellenos sanitarios o LMOP en inglés creó el manual para el desarrollo de proyectos energéticos con biogás de rellenos sanitarios. En dicho manual se describe todo el proceso necesario para la ejecución de un programa de aprovechamiento del biogás, incluyendo proyecciones de generación de biogás, la evaluación técnica y económica de proyectos dependiendo del uso final y los costos de ejecución de cada proyecto.

Por otro lado, el Banco Interamericano de Desarrollo realizó un análisis teórico práctico de la generación de electricidad a partir de biogás producido por los residuos, en el cual incluye los aspectos técnicos, financieros, ambientales y sociales necesarios para ejecutar un proyecto de aprovechamiento. En este ítem se relacionan los sistemas de captura, conducción y limpieza del biogás existentes y aquellos aplicables al aprovechamiento del biogás en el PTAG.

En los proyectos de aprovechamiento del biogás es necesario implementar un sistema de captura compuesto por, pozos de extracción enterrados en la masa de residuos, tuberías que transportan el biogás hasta el sistema de colección, cabezales, válvulas y sistemas de retención de humedad. Este sistema se diseña generalmente considerando el volumen de los residuos dispuestos y el potencial de generación de biogás según las condiciones locales y de operación. El pozo de extracción es la ubicación de una tubería enterrada en la masa de residuos en forma vertical u horizontal que se encarga de conducir los gases fuera de la celda de disposición. En la tabla 4.18 se pueden observar las ventajas y desventajas encontradas con el uso de cada tipo de pozo de extracción.

Existen diferentes configuraciones de la red de captura del biogás, encontrando usualmente: el circuito cerrado y ramificado múltiple, ambos compuestos por tuberías que conducen el biogás hasta el sistema de conducción. Independientemente de la configuración del sistema este debe contar con puntos de monitoreo del biogás, sistema de manejo de taponamiento por líquidos o condensado y construcción por secciones del sistema, lo cual permite realizar mantenimiento sin detener el proceso de succión. Además, se debe considerar la ubicación del sistema de captura, ya sea superficial o enterrada depende de la capacidad económica y financiera del operador de la extracción del biogás. (EPA, 2016).

Tabla 4.18. Pozos para la extracción del biogás.

Pozos verticales		Pozos horizontals	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Si el área se encuentra clausurada, es mínima la intervención necesaria.	Incrementa los requerimientos de operación y mantenimiento si se instala en una zona activa	Facilita la colección del biogás en zonas no clausuradas	Incrementa la probabilidad de la intrusión del aire hasta la zona cubierta con residuos
Es el diseño más común	Disponibilidad del equipo apropiado	Reduce la necesidad de equipo de construcción especializado	Más propenso al fracaso en caso de inundación en los asentamientos del relleno sanitario
Confiable y accesible para la inspección y bombeo de lixiviados	Retraso en el sistema de colección de gas si se realiza en zonas o celdas cerradas recientemente	Permite la extracción en un área más profunda	

Fuente: EPA, 2016.

Los cabezales de pozo se usan específicamente para procesos de extracción activa de biogás, el cual consiste en aplicar presión negativa a los pozos de extracción para forzar la salida del mismo. Un cabezal de pozo ayuda a regular por medio de válvulas la calidad del biogás y el caudal de salida. Las válvulas y sistemas de retención de humedad se instalan sobre las tuberías

de la red de captura, con el fin de realizar cierres controlados por secciones y la evacuación de líquidos controlada. El sistema de captura se debe diseñar teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Área total de la celda de disposición
- Presión de succión requerida
- Radio de acción del pozo
- Velocidad necesaria de extracción
- Caudal de extracción de la celda de disposición
- Presencia de condensados

Sistema de Conducción del Biogás.

Es la red perimetral de tuberías que se encargan de transportar el biogás hasta el punto de aprovechamiento, en ella se mezcla el biogás proveniente de cada una de las chimeneas, por lo cual en su diseño se tiene los siguientes aspectos:

- Caudal a transportar
- Instalación de trampas de condensado y eliminadores de humedad
- Instalaciones de limpieza y purificación de H₂S
- Ubicación de puntos de muestreo
- Aspectos morfológicos de la zona donde se ubica

No toda la humedad del biogás es removida con las trampas de condensado ubicadas en las tuberías de colección, es necesario la instalación de equipos especializados entre los que encontramos: los separadores de humedad centrífugos, nebulizadores y trampas (López, 2016).

Esta red es sobre la cual se aplica principalmente la presión de succión del biogás por lo cual debe estar adecuada para soportar las sobrepresiones del sistema. Debe contar con sistemas de válvulas que bloqueen el flujo en caso de requerirse, además de contar con equipos especializados para la limpieza del biogás.

Eliminación de Agentes Nocivos del Biogás para Proyectos de Aprovechamiento.

Para realizar un proyecto de aprovechamiento del biogás no solo es necesario realizar la remoción de la humedad, existen partículas y otras impurezas que requieren un tratamiento especial dependiendo del uso final del biogás. En los proyectos de aprovechamiento eléctrico existe una serie de filtros que remueven contaminantes peligrosos para los componentes de los motores o turbinas, que pueden disminuir la eficiencia del sistema. Cuando el biogás es usado directamente en hornos, requiere de un tratamiento mínimo.

Por el contrario es necesario un tratamiento especializado en caso de que se requiera producir biogás de alto-Btu, ya que se deben remover compuestos azufrosos, dióxido de carbono, siloxanos, entre otros. Generalmente el metano debe superar el 96% del contenido porcentual de la mezcla y el CO₂ debe estar presente en el resto de ella para considerarse biogás de alto-Btu. (López, 2016).

Para obtener biogás de calidad similar a la del gas natural es necesario utilizar más de una de las diferentes tecnologías de limpieza. Ello depende de la naturaleza de los materiales a partir de los cuales se generó el biogás y de las condiciones de operación durante la digestión anaeróbica. (Dorado et al., 2017). Generalmente se dividen los tratamientos dependiendo del uso final del biogás, existen los tratamientos primarios y secundarios. El tratamiento primario incluye la eliminación de residuos, filtración y remoción de la humedad y otras partículas de tamaño

considerable. En la tabla 4.19 se pueden observar algunos efectos de los contaminantes sobre los procesos aplicados al biogás.

Tabla 4.19. *Componentes contaminantes en los proyectos de aprovechamiento.*

Componente	Posible impacto
Agua	Corrosión en compresores, depósitos de almacenamiento de gas y motores debido a la reacción con H ₂ S, NH ₃ y CO ₂ formando ácidos. Condensación o congelación debido a la alta presión. Acumulación de agua en tuberías.
Siloxanos	Formación de SiO ₂ y cuarzo microcristalizado debido a la combustión; deposición en bujías y consecuente daño en la superficie de válvulas y abrazaderas cilíndricas.
CO ₂	Reduce el poder calorífico.

Fuente: EPA, 2016.

4.4.1 Eliminación de Agua (Secado del Biogás).

Si el biogás se va a inyectar a la red de gas natural este no debe contener más de 100mg de agua/m³ de biogás, por otro lado, si su uso es para vehículos, se requiere que el punto de rocío se encuentre a menos de 10°C. El biogás sin tratamiento es saturado y la cantidad de agua total depende de la temperatura del biogás, estos métodos de separación de líquidos se basan en la separación física del condensado y secado químico de los restantes de humedad. En la tabla 4.20 se consignan los métodos que pueden ser utilizados para la eliminación del agua y las ventajas y desventajas del uso de cada uno. Además, estos procesos permiten la eliminación de espuma y polvo (Dorado et al., 2017).

Tabla 4.20. *Métodos de eliminación de agua.*

Método	Ventajas	Desventajas
Absorción con solventes orgánicos	Polvo, hidrocarburos y aceite se separan con métodos sencillos. A menudo se utiliza como tratamiento previo antes de otros métodos.	La extracción completa no es posible
Absorción de ácidos	Alta eficiencia de eliminación (<95 %)	Provoca corrosión. Se utilizan sustancias químicas peligrosas.

Método	Ventajas	Desventajas
fuertes		Ambientalmente desfavorable.
rción en n.d. base fuerte		Provoca corrosión y precipitación de CO_3^{2-} . Se utilizan sustancias químicas peligrosas. Ambientalmente desfavorable.
orción en gel de sílice	Alta eficiencia de eliminación (<95 %) Mayor capacidad de eliminación vs. Carbón activado (50% Extra). Regeneración posible (95% desorción a 250°C)	Es necesaria la operación a alta presión
Adsorción sobre carbón activado	Alta eficiencia de eliminación (95 %). Regeneración posible (desorción con gel de sílice a 250°C).	Es necesario operar a alta presión <(mayor capacidad de adsorción).
Separación criogénica	Alta eficiencia de eliminación (99,3% 70°C). Eliminación de varias impurezas.	-Inversión y operación costosas (alta presión y baja temperatura).

4.4.2 Eliminación de H₂S Mediante Procesos Físico-Químicos y Biológicos.

Diversos elementos presentes en la biomasa que contienen azufre producen H₂S al pasar por un proceso de descomposición anaeróbica. Este compuesto es tóxico, corrosivo y peligroso para el medio ambiente. Es necesario eliminarlo en los primeros pasos de purificación debido a que puede causar daños en tuberías y motores. Para escoger el sistema de desulfuración se tienen en cuenta varios criterios, entre los cuales están las condiciones de operación como el flujo de biogás, el caudal, la concentración de los compuestos, la temperatura y la humedad y los factores económicos (Dorado et al., 2017). En la tabla 4.21 se detallan las ventajas y desventajas de los procesos de eliminación del H₂S.

Tabla 4.21. *Métodos para eliminación de H₂S.*

Método	Ventajas	Desventajas
---------------	-----------------	--------------------

Método	Ventajas	Desventajas
Biológico con O ₂ /aire (en filtro/depurador/digestor)	Costes baratos de inversión y explotación: bajos requerimientos de electricidad y calor, no se necesitan reactivos extras. Operación y mantenimiento simples.	La concentración del H ₂ S obtenida es aún alta de 100 - ppmv. El exceso de O ₂ /N ₂ en el biogás dificulta su purificación y disminuye el poder calorífico. Gran cantidad de aire provoca una mezcla explosiva.
Biológico sin O ₂	Costes baratos de inversión y explotación: bajos requerimientos de electricidad y calor Operación y mantenimiento simples.	Necesita reactivos, en este caso, nitrato (NO ₃) que actúa como un aceptor de electrones en lugar del oxígeno
FeCl ₃ /FeCl ₂ (en digestor)	Costes baratos de inversión: estanque de almacenamiento y bomba dosificadora. Bajos requerimientos de calor y electricidad, operación y mantenimientos simples. Proceso compacto sin presencia de H ₂ S en la red de biogás. No hay aire en el biogás	La eficiencia de eliminación de H ₂ S es baja 100 – 1.500 ppmv (100 – 150 cm ³ /m ³). La operación es costosa (sal de hierro). Los cambios en pH/temp no son beneficiosos para el proceso de digestión. La dosificación correcta es dificultosa
Fe ₂ O ₃ /Fe(OH) ₃ (en lecho)	Alta eficiencia de eliminación: > 99 %	Sensible para el agua.
Lana de acero oxidada, virutas de madera impregnada o Pellets	Los mercaptanos también se capturan. Inversión barata. Simple.	Altos costes de operación. La regeneración es exotérmica: riesgo de ignición de los chips. La superficie de reacción de cada ciclo es reducida. El polvo liberado puede ser tóxico
Absorción en agua	H ₂ S < 15 cm ³ m ⁻³ Es barato cuando el agua está disponible (no regeneración). También se elimina CO ₂ .	La operación es cara: presión alta, baja temperatura. Dificultad técnica. Posible obstrucción de la columna de absorción
Absorción química NaOH FeCl ₃	Menor demanda de electricidad. Menor volumen, menor bombeo, reactor de menor tamaño (en comparación con la absorción en H ₂ O). Bajas pérdidas de CH ₄	Inversión y operación caras. Dificultad técnica. No regenerativa
Absorción química Fe(OH) ₃ Fe-	Alta eficiencia de eliminación: 95 – 100 %. Operación barata. Se requiere poco volumen.	Dificultad técnica. La regeneración es a través de la oxigenación. El paso de CO ₂ a H ₂ CO ₃ (utilizando EDTA)

Método	Ventajas	Desventajas
EDTA CooabTM	Regenerativa. Bajas pérdidas de CH ₄ .	conduce a la precipitación. Acumulación de tiosulfatos desde quelatos + H ₂ S (con EDTA).
Membranas	Es posible la eliminación de > 98 % de H ₂ S. También se elimina el CO ₂ .	Operación y mantenimiento caros. Complejo
Biofiltros	Es posible eliminar > 97 % de H ₂ S. Bajo coste de operación.	Tratamiento extra del H ₂ S para alcanzar la calidad deseada. La relación O ₂ /N ₂ en el biogás implica dificultad y pasos adicionales.
Adsorción sobre carbón activado (impregnado con KI 1–5 %)	Alta eficiencia (H ₂ S < 3 cm ³ m ⁻³). Tasa de purificación alta. Temperatura de operación baja. Proceso compacto. Alta capacidad de carga.	Caro en inversión y operación. Pérdidas de CH ₄ . Es necesario H ₂ O y O ₂ para eliminar el H ₂ S. El H ₂ O puede ocupar los lugares de unión de H ₂ S. Regeneración a 450 °C. Residuos presentes hasta 850 °C.

Fuente: Dorado et al., 2017.

Eliminación del CO₂.

El proceso de eliminación del CO₂ se conoce como enriquecimiento del biogás, hasta llegar a una calidad similar al gas natural, este proceso consta de muchos pasos. Después de eliminar el vapor de agua y los siloxanos es necesario eliminar el CO₂ para cumplir con el índice de Wobbe. Dependiendo del uso del biogás (mezcla con gas natural o combustible de vehículos) se cumplen ciertas especificaciones, para el transporte en tuberías es necesario que el CO₂ tenga un contenido menor al 3% y para el uso en combustible de vehículo es necesario que el CO₂ y el N₂ sumen de 1,5 al 4,5%. (Dorado et al., 2017). En la tabla 4.22 se pueden observar las ventajas y desventajas de los métodos para eliminar el CO₂.

Si el objetivo principal del proceso es el enriquecimiento del biogás se deben conocer los métodos disponibles de eliminación del CO₂, además algunos de estos métodos pueden incluir la

limpieza de otras impurezas por lo cual es necesario realizar un análisis y determinar el método adecuado de eliminación.

Tabla 4.22. *Eliminación de CO₂*.

Método	Ventajas	Desventajas
Absorción con agua	Alta eficiencia (> 97 % CH ₄). Eliminación simultánea a [H ₂ S] < 300 cm ³ m ⁻³ . Operación sencilla. Capacidad ajustable en función de presión y temperatura. Posibilidad de regeneración. Bajas pérdidas de CH ₄ (< 2 %). Tolerante a impurezas.	Inversión y operación costosas. Obstrucción debido al crecimiento bacteriano. Formación de espuma. Poca flexibilidad para variar la entrada de gas.
Absorción con polietilenglicol	Alta eficiencia (> 97 % CH ₄). Eliminación simultánea de compuestos orgánicos de S, H ₂ S, NH ₃ , HCN y H ₂ O. Balance energético más favorable que el obtenido en la absorción con agua. Posibilidad de regeneración. Bajas pérdidas de CH ₄ .	Inversión y operación costosas. Operación difícil y regeneración incompleta. En el momento de desmontaje/vacío es necesario realizar un proceso de ebullición. Se reduce la capacidad de tratamiento cuando se diluye glicol con agua.
Absorción química con aminas	Alta eficiencia (> 99 % CH ₄). Operación barata. Posibilidad de regeneración. Más CO ₂ disuelto por unidad de volumen (comparado con la absorción con agua). Muy bajas pérdidas de CH ₄ (< 0,1 %).	Inversión costosa. Calor necesario para la regeneración. Corrosión. Descomposición y envenenamiento de las aminas por O ₂ u otros productos químicos. Precipitación de sales y formación de espuma.
PSA/VSA molecular de carbón. Tamiz molecular (zeolita). Silicatos de alúmina.	Alta eficiencia (95 – 98 % CH ₄). H ₂ S es eliminado. Bajo consumo de energía: alta presión, pero regenerativo. Técnica compacta. También para pequeñas capacidades. Tolerante a impurezas.	Inversión y operación costosas. Proceso extenso, requiere control. Pérdidas de CH ₄ cuando hay un mal funcionamiento de las válvulas.
Tecnología de membrana gas/gas gas/líquido	H ₂ S y H ₂ O son eliminados. Construcción y operación simples. Alta fiabilidad. Pequeños flujos de gas tratados sin aumento proporcional del coste. Gas/gas. Eficiencia de eliminación: de < 92 % CH ₄ (paso 1)	Membrana de baja selectividad: compromiso entre pureza de CH ₄ y la cantidad de biogás mejorado. Múltiples pasos necesarios (sistema modular) para llegar a alta pureza. Pérdidas de CH ₄ .

Método	Ventajas	Desventajas
	a > 96 % CH ₄ H ₂ O es eliminada. Gas/líquido. Eficiencia de eliminación: > 96 % CH ₄ . Inversión y operación baratas. Puede obtenerse CO ₂ puro.	Poca experiencia operacional.
Separación criogénica	Puede alcanzarse un 90 – 98 % CH ₄ . CO ₂ y CH ₄ de alta pureza. Bajo coste de energía extra para llegar a Biometano líquido (LBM).	Inversión y operación costosas El CO ₂ puede permanecer en el CH ₄ .

Eliminación de Compuestos Minoritarios.

Dentro de la corriente de biogás podemos encontrar diferentes compuestos que se generan en pequeñas cantidades, llamados comúnmente compuestos traza, algunos de estos son: los siloxanos, los hidrocarburos halogenados, el oxígeno y el NH₃. Algunos de los siloxanos encontrados en el biogás son: tetrametilsilano, trimetilsilanol, tetradimetilsilano, hexametildisiloxano y el octametiltetrasiloxano, entre otros. Es necesario la eliminación de siloxanos debido a la deposición de sílice en las partes internas de los motores, en la combustión son convertidos en óxido de silicio y se depositan como micro cristales de cuarzo. (Dorado et al., 2017).

Los fabricantes de los motores exigen límites máximos de siloxanos. Aunque no se tiene un método universal para eliminar los siloxanos, la absorción física empleando disolventes resulta ser muy eficiente (Dorado et al., 2017). En la tabla 4.23 se pueden observar algunas ventajas y desventajas de la eliminación de los siloxanos.

Tabla 4.23. *Eliminación de siloxanos.*

Método	Ventajas	Desventajas
Absorción con solventes orgánicos	Alta eficiencia de eliminación (97 %)	La extracción completa no es posible.

Método	Ventajas	Desventajas
Absorción en ácidos fuertes	Alta eficiencia de eliminación (< 95 %)	Corrosión. Cuestiones ambientales. Manejo de sustancias químicas peligrosas.
Absorción en base fuerte	n.d.	Corrosión. CO ₃ ²⁻ precipitación. Manejo de sustancias químicas peligrosas.
Adsorción en gel de sílice	Alta eficiencia de eliminación (< 95 %). Mayor capacidad de eliminación vs. Carbón activado (50 % extra). Posible regeneración (95 % desorción a 250 °C).	Alta presión necesaria. La humedad disminuye la eficiencia
Adsorción sobre carbón activado	Alta eficiencia de eliminación (95 %). Regeneración posible (desorción < desorción con gel de sílice a 250 °C).	Alta presión necesaria (mayor capacidad de adsorción). La humedad disminuye la eficiencia de eliminación.
Separación criogénica	Alta eficiencia en eliminación (99,3 % a -70 °C). Eliminación de varias impurezas.	Inversión y operación costosa (alta presión y baja temperatura).

Fuente: Dorado et al., 2017.

Los hidrocarburos y compuestos halogenados presentes en las corrientes del biogás se pueden eliminar usando carbón activado, las moléculas más pequeñas de CH₄, CO₂, N₂ y O₂ migran por los poros del carbón y el resto son atrapadas, en los procesos de eliminación con carbón activado se usa el proceso de regeneración por calentamiento, el cual volatiliza los compuestos atrapados y se retiran con el flujo de gas inerte.

El oxígeno se elimina si supera el 4%, ya que es explosivo si supera este valor y el contenido de metano es superior al 50%. Usualmente se elimina el oxígeno por medio de membranas o por adsorción oscilando la temperatura y la presión, este proceso es costoso por lo cual se debe evitar la introducción de aire al biogás mejorando la permeabilidad del lugar. El NH₃ (amoníaco) es un inhibidor que se puede evitar manteniendo la proporción de carbono/nitrógeno entre 15 y 30, este

se elimina usualmente con ácido nítrico o ácido sulfúrico, para lo cual se requiere una instalación de acero inoxidable muy costosa. (Dorado et al., 2017).

4.4.1 Evaluación Técnica.

Uso Directo como Combustible (Biometano).

A nivel Latinoamericano, Chile es el país con mayor uso de biogás proveniente de la disposición final de residuos sólidos en rellenos sanitarios, a mediados de 1980 se realizó la implementación del uso de biogás enriquecido mezclado con gas natural en las redes de distribución de gas domiciliario en las principales ciudades del país. En Colombia mediante la resolución 135 del 2012 “por la cual se adoptan las normas aplicables al servicio público de gas combustible con biogás” se reglamentaron las actividades de comercialización desde la producción, transporte, distribución y comercialización del servicio público de gas combustible con biogás, según se define en la Figura 4.11.

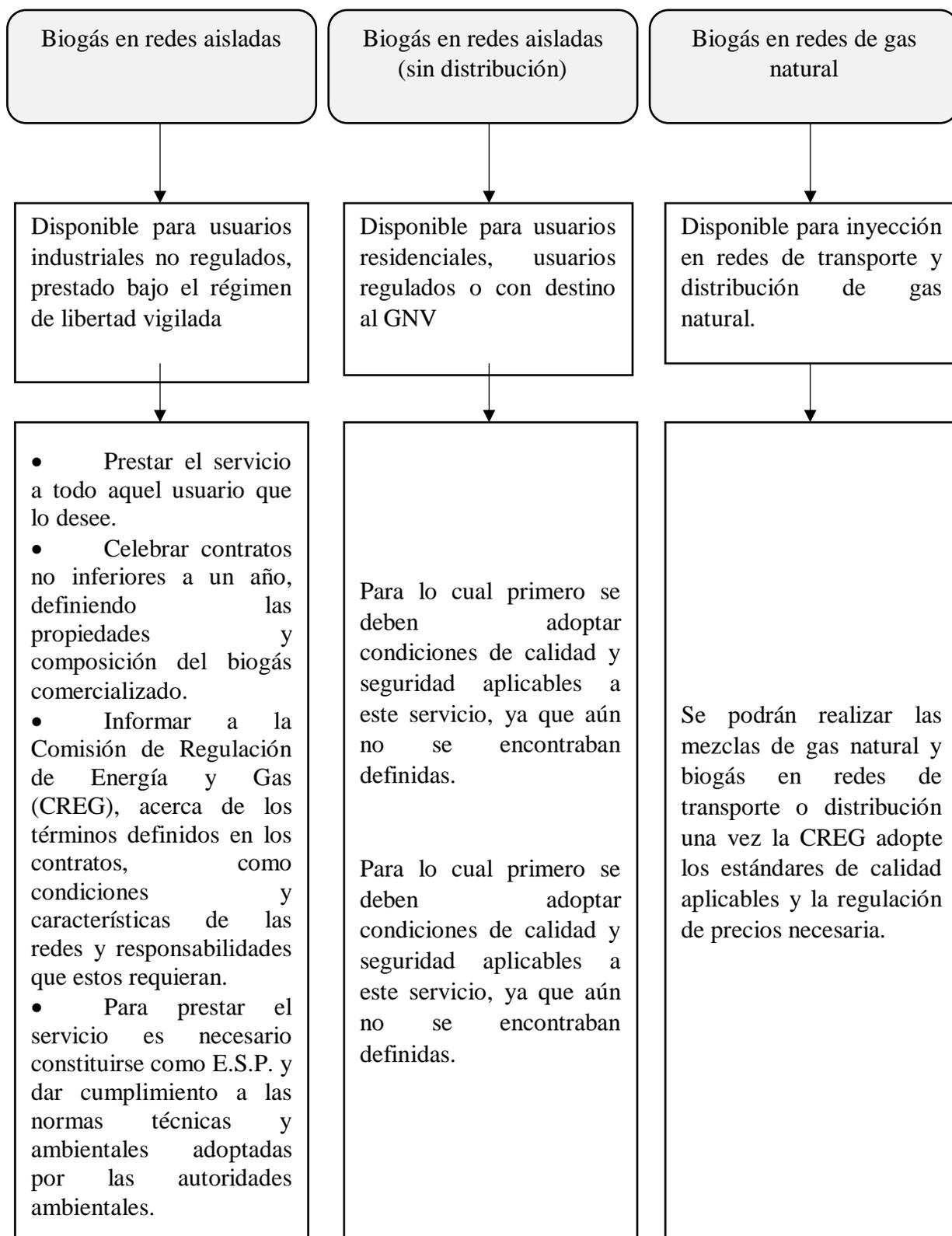


Figura 4.11. Uso del biogás en el servicio público de gas combustible.
Fuente: CREG Res 135 del 2012

Los interesados en prestar el servicio podrán realizar de manera integrada las actividades de producción, transporte distribución y comercialización, pero llevando por separado la contabilidad de cada actividad, garantizando el libre acceso a todos aquellos usuarios no regulados que lo soliciten, o en caso contrario según lo determine la CREG. Como resultado de esta primera vista de regulación, se realizó en los años siguientes la comunicación entre los actores interesados, la CREG y el Ministerio de Minas y Energía con el fin de crear un nuevo esquema.

El uso del biogás representa una fuente importante del uso de energía no convencional, siendo la única capaz de dar soluciones energéticas como gas combustible y generación eléctrica, proviniendo de la misma fuente. Dicha fuente no renovable de energía tiene un amplio desarrollo mundial y un gran potencial nacional, enmarcándose perfectamente en la ley 1715 del 2014. En el documento CREG 040 del 2016 se incluyeron no solo los residuos como fuente de biogás, sino también las fuentes de biomasa cultivadas, además se definen los tipos de mercado, las condiciones de calidad, la seguridad del sistema y el régimen tributario al cual deberá ser sometido.

Para la prestación del servicio se dividieron entre las redes aisladas y las interconectadas al sistema de transporte nacional, para usuarios de redes aisladas se encuentran los usuarios industriales no regulado, que corresponde a dos partes, una encargada de la producción del biogás y otra que lo utiliza en sus procesos internos. El responsable de la operación y mantenimiento de la red se debe encargar de que esta funcione adecuadamente.

En el caso de los usuarios regulados, se refiere a lugares donde no opera el sistema de transporte nacional, cuya finalidad es facilitar la calidad de vida de la población rural. Este se basa en la generación local no solo aprovechando los residuos orgánicos si no también fuentes

cultivadas, el productor del biogás deberá realizar un contrato con los usuarios regulados donde se dé cumplimiento a los requerimientos de ley, cumpliendo las normas técnicas y ambientales adoptadas.

Las redes interconectadas al sistema de transporte nacional se podrían usar para la inyección de biogás con propiedades comparables al gas natural, lo cual es conocido comúnmente como biometano. Se debe dar cumplimiento según lo regulado en la normativa, además de las normas técnicas y ambientales adoptadas por la autoridad. En la resolución 240 del 6 de diciembre del 2016, se regularon las actividades de producción, transporte, distribución y comercialización del servicio público de gas combustible con biogás y Biometano que realice cualquiera de las personas autorizadas de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 15 de la ley 142 de 1994. (Comisión de Regulación de Energía y Gas [CREG], 2016)

Se creó el régimen para el servicio público domiciliario de gas combustible con biogás a través de redes aisladas, para usuarios no regulados y gas natural vehicular (GNV), prestado bajo el régimen de libertad vigilada. Los prestadores de este servicio deberán concretar con el usuario las condiciones de entrega y características de las instalaciones receptoras, además de las responsabilidades y riesgos que deberán asumir. Informando a la CREG y a la SSPD cada que se celebre un contrato y sus tarifas según lo permitido por la libertad vigilada, también deberán informar cada que se realicen modificaciones.

En general el servicio público domiciliario de gas combustible con biogás para usuarios regulados en redes aisladas y Biometano para usuarios regulados y no regulados conectados al SNT, puede ser prestado o usado por cualquier usuario, informando a la CREG y la SSPD las tarifas establecidas en el contrato, las cuales se actualizarán cada que se celebre uno nuevo informando nuevamente a las autoridades correspondientes.

El servicio público domiciliario de gas combustible con biogás – SPDBG a través de redes aisladas para usuarios regulados funcionará bajo libertad vigilada, deberá cumplir con los parámetros de las Tablas 4.24 y 4.25. Semestralmente se debe informar a la SSPD el poder calorífico, el índice de Wobbe, la cantidad de metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno del biogás, en caso de provenir de residuos industriales o urbanos se deberá informar el contenido de siloxanos y cloro, instalando puntos de verificación que garanticen que el biogás entregado da cumplimiento a lo establecido. Se deberá firmar por las partes un contrato de condiciones uniformes que cumpla con los requerimientos de ley, además el prestador del servicio deberá velar por el cumplimiento de las normas técnicas y ambientales que aplique.

Tabla 4.24. *Especificaciones de calidad mínimas para redes aisladas.*

Biogás para Redes Aisladas		
Especificaciones	Cantidad	Unidad
Poder Calorífico Inferior	>16	MJ/m ³
Índice de Wobbe	>18	MJ/m ³
CH ₄	>50	Mol %
H ₂ S	<20	Mg/m ³
Dióxido de Carbono	<45	Mol %

Tabla 4.25. *Especificaciones de calidad mínimas adicionales para biogás proveniente de residuos industriales o urbanos en redes aisladas.*

Especificaciones	Cantidad	Unidad
Siloxanos	<10	mg/m ³
Compuestos Halogenados	<1	mg(Cl)/m ³

Para la prestación del servicio público de gas combustible con Biometano a través de redes de distribución y transporte interconectadas al SNT, atendiendo usuarios regulados y no regulados, los componentes de transporte, distribución y comercialización se aplicarán de la misma forma que el gas natural, mientras que con relación a la producción se realizará bajo libertad vigilada, el

productor deberá cumplir con las condiciones de la tabla 4.26, y deberá informar al encargado del transporte la calidad del biogás entregado. En el punto de entrega de custodia se deberán realizar mediciones constantes de calidad.

Tabla 4.26. *Especificaciones de calidad del Biometano.*

Especificaciones	Cantidad	Unidad
Siloxanos	<10	mg/m ³
Compuestos Halogenados	<1	mg(Cl)/m ³

Los prestadores del servicio con Biometano en redes interconectadas del SNT, solo podrán realizar de manera integrada los procesos de producción, distribución y comercialización, llevando su contabilidad por separado, el transporte de este estará a cargo de los operadores de la red y su costo y tarifa se suscribirán de manera independiente.

En Norte de Santander existe un déficit en el suministro del gas natural y el sector de la cerámica ha manifestado la necesidad de que el departamento se conecte a al sistema nacional de transporte (SNT), solamente una de las empresas Cerámica Italia manifiesta que tiene un déficit de 500.000 pies³/día.

El proyecto del relleno sanitario estaría en capacidad de generar para el 2020 unos 60.072 m³/día de biogás, lo que supliría ampliamente la necesidad de una empresa como esta.

Generación de Energía Eléctrica.

Es la tecnología más usada en la conversión de energía en un relleno sanitario, debido a los bajos costos, el alto rendimiento y la capacidad de adaptación de los motores para aprovechar biogás. Además, se deben tener en cuenta las facilidades de los motores de combustión interna para adaptarse al caudal de cada lugar, esta alternativa brinda condiciones de seguridad y eficiencia aptas para un relleno sanitario con recursos limitados; por tal motivo se presenta un

alto uso de esta tecnología en proyectos de aprovechamiento. A continuación, se mencionan los principales aspectos a tener en cuenta en el estudio de factibilidad del aprovechamiento del biogás. (Blanco et al., 2017)

Aspectos técnicos: Estos resumen las condiciones necesarias para ejecutar el proyecto de aprovechamiento. Generalmente se pueden encontrar motores de combustión interna con capacidades que van desde los 800kW hasta los 3MW, o flujos de biogás aproximadamente de 510 a 1870 m³/hora con 50% de contenido porcentual de metano; usualmente se realiza la combinación de varios motores en caso de requerir una capacidad superior a los 3MW. La eficiencia de conversión de energía de una central de aprovechamiento con motores de combustión interna suele ubicarse entre el 30 y 40%, y aumenta cuando se realiza la aplicación de la cogeneración en otros procesos. Según la EPA existe diferentes motores de combustión interna dependiendo del caudal de biogás, en la tabla 4.27 se pueden observar algunas características de los motores que se encuentran en el mercado.

Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), se debe considerar la calidad del biogás de salida a la hora de calcular la eficiencia energética, según el modelo colombiano de biogás este suele tener el 50% del contenido porcentual en metano. En los resultados encontrados en las mediciones en campo del contenido porcentual del biogás se encontró que el metano era inferior al 50%, por lo cual el rendimiento térmico del equipo puede disminuir. Además las chimeneas de evacuación de gases en las cuales el contenido de metano era inferior al 50%, unas se ubican en las zonas más antiguas de la celda de disposición (Fase 1) y en el restante se presentaron limitaciones con el sistema de medición de campana ya que no se logró un sello adecuado, siendo posible que se presentara la filtración de aire en las mediciones.

Como ya se mencionó en los resultados de las proyecciones de generación de biogás, se tienen dos escenarios que dependen de las condiciones de cobertura final encontradas en la celda de disposición de residuos. En la Figura 4.12 se puede observar el caudal de biogás con un escenario de alta, con un 84% de eficiencia del sistema de captura mejorando las condiciones actuales y un escenario de baja con un 73% de eficiencia del sistema de captura con las

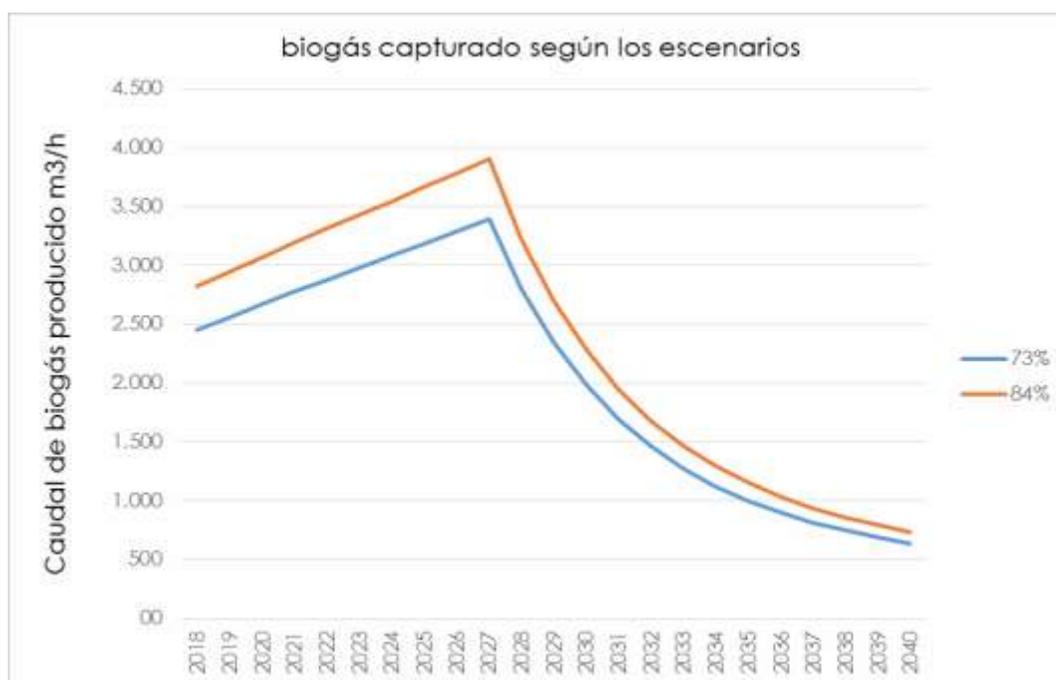


Figura 4.12. Resultados del modelo colombiano de biogás con mejora de la cobertura final de la celda de disposición final.

Fuente: Autor.

condiciones de cobertura final actual; según el modelo colombiano de biogás.

Tabla 4.27. Motores de combustión interna.

Generación del motor de combustión en kW	Consumo de caudal de biogás al 50% de metano en M3/h
540	346.8
633	397.8
800	595
1200	850

Fuente: EPA, 2016.

En los proyectos de generación de energía con biogás por medio del uso de motores de combustión interna, se debe realizar el dimensionamiento y expansión de la capacidad instalada evaluando el comportamiento de la generación de biogás, las características de los motores encontrados en el mercado y el rendimiento alcanzado por los mismos. En la tabla 4.28 se pueden observar algunas ventajas, desventajas y el tipo de tratamiento necesario para el uso de motores de combustión interna. El proyecto de aprovechamiento funcionará hasta el año 2040, en los 22 años de extracción el punto máximo será en el año 2027; un año después de finalizar la disposición final de residuos según la vida útil estimada por licencia ambiental.

Debido a la alta generación de potencia eléctrica se considera el uso de varios motores de combustión interna que ayuden a aprovechar al máximo el biogás generado. Se deben realizar combinaciones de motores de combustión interna que consideren disminuir los desperdicios de energía y minimizar los costos de inversión. No se debe permitir el ingreso de cantidades considerables de siloxanos y H₂S a los sistemas de combustión, con el fin de garantizar la extensión de la vida útil de los equipos.

Tabla 4.28. *Análisis de motores para combustión interna para biogás.*

Ventajas	Desventajas	Tratamiento
Alta eficiencia comparada con las turbinas de gas o microturbinas.	Relativamente alto costo de mantenimiento	Requiere un tratamiento primario mínimo del biogás para optimizar el rendimiento del motor, el tratamiento secundario puede ser necesario en algunas ocasiones.
El tamaño de los equipos se puede igualar a la salida del biogás del relleno sanitario.	Altas emisiones al aire	
Relativamente un bajo costo por la capacidad instalada de kW comparada con las turbinas de gas o microturbinas	La economía puede ser marginal con los bajos costos de la energía.	

La eficiencia aumenta cuando se recupera el calor residual

Se pueden agregar o quitar motores según la demanda de recuperación de biogás existente

Fuente: EPA, 2016.

Aspectos Sociales.

Entre los más relevantes se encuentra la generación de empleo, al ser un proyecto que requiere personal para cada una de sus fases de construcción, operación y clausura. A corto plazo se necesitaría de personal capacitado que participe del diseño, instalación, puesta en marcha y operación con el fin de garantizar los estándares de calidad exigidos por ley. (Blanco et al., 2017).

El proyecto de aprovechamiento brindaría soluciones energéticas a población vulnerable que no cuente con el servicio o aquella cuyo servicio energético sea deficiente en las cercanías al relleno sanitario, además de garantizar una fuente energética capaz de suplir a buena parte de la población Cucuteña, según el BID el acceso a la energía eléctrica está directamente relacionado con la mejora de la calidad de vida; introduciendo el mercado de las energías renovables a países en desarrollo. (Blanco et al., 2017). Un proyecto de inclusión de Fuentes no Convencionales de Energía (FNCE) a nivel regional, puede ocasionar un impacto positivo en la percepción del cambio de fuentes tradicionales de energía por otras más sustentables y menos contaminantes. Se puede impartir educación ambiental a los jóvenes del municipio y la región a partir de un ejemplo local, con el cual ellos pueden interactuar.

4.4.2 Evaluación Ambiental.

Se presenta una disminución doble de gases de efecto invernadero, la primera es con la captura del metano y otros gases contaminantes de la corriente del biogás y la segunda se

presenta al disminuir el uso de los combustibles fósiles para la generación de energía. Cúcuta se surte de energía proveniente de la central termoeléctrica “Termotasajero”, esta usa como insumos principales el agua y el carbón. El aporte inicial del PTAG al Sistema de Interconexión Nacional sería de 3 MW, manteniéndose sobre este valor según el modelo colombiano de biogás por al menos 8 años y logrando un pico máximo de 5 MW 6 años después de iniciado el proyecto.

Los componentes del biogás cuentan con características propias que pueden presentar efectos nocivos para la vida y la salud humana, el suelo, el aire y el agua. Al mejorar las condiciones de cobertura final que se presentan en la celda de disposición de residuos, disminuye la fuente de alimento del gallinazo negro (*Coragyps atratus*), esta especie de ave representa un peligro debido a que la zona en la cual se ubica el PTAG, es cercana a las rutas de flujo aéreo. La disminución de la cantidad de alimento afectará directamente la población del gallinazo. Así mismo una cobertura final adecuada evitará la generación excesiva de lixiviados, el cual es un problema ambiental latente en el PTAG, al no existir un sistema de tratamiento tecnificado.

En la renovación de la licencia ambiental se deja como obligación desde el punto de vista técnico el empleo y manejo de los gases que se producen de la actividad de disposición final de residuos, este proceso no es realizado en el PTAG al ser un proyecto complementario a la disposición de residuos sólidos. Según lo proyectado en el presente trabajo la producción de energía por medio del uso de motores de combustión interna está lejos de superar los 10 MW, por lo cual según la metodología general para la presentación de estudios ambientales no se debe realizar un estudio de impacto ambiental para la creación del proyecto, todos los procesos que se realicen deberán incluirse dentro del plan de manejo ambiental de la empresa Aseo Urbano S.A.S. E.S.P.

Aspectos Legales.

La potencia eléctrica del aprovechamiento del biogás del PTAG es superior a los 3 MW al iniciar el proyecto, según el modelo colombiano de biogás. Según Aseo Urbano (2017), en el PTAG existe un consumo de potencia eléctrica promedio mensual de entre 30kW y 35 kW, lo cual significa que de la potencia eléctrica producida se podría abastecer el consumo total de las instalaciones internas y además el excedente se entregaría al Sistema Interconectado Nacional (SIN). La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) en su resolución 281 del 2015 resuelve en su artículo primero que todo autogenerador que pertenezca al SIN y su producción sea superior a 1MW será considerado como un generador a gran escala, y este deberá someterse a las consideraciones y reglas que imponga la CREG.

En vista de este aspecto Aseo Urbano S.A.S. E.S.P. debe cumplir con los parámetros determinados en el artículo 4 del decreto 2469 del año 2014 para ser considerado un autogenerador a gran escala. Al vincularse a la generación con FNCE tiene acceso a los beneficios determinados en la ley 1715 del 2015 en sus artículos 11, 12, 13 y 14, Los cuales se relacionan con reducción en el pago de la renta, exclusión de IVA para equipos importados, exclusión de pagos arancelarios de equipos importados e incentivos a la depreciación acelerada de equipos. Para realizar la venta de energía al SIN inicialmente se deben buscar las herramientas necesarias para dar cumplimiento a la normativa exigida por la CREG.

Aspectos Económicos.

En Colombia la energía proviene principalmente de las hidroeléctricas, la alta riqueza hídrica del país ha permitido depender en más de un 50% de la generación de energía por medio de esta

tecnología. Debido a los extremos de variabilidad climática se han presentado eventos en los cuales se ve comprometida la generación de electricidad y el desabastecimiento de la población, esta situación obliga a pensar en el uso de energías renovables que no dependan de un recurso natural afectado por los fenómenos climáticos como lo es el agua. Como ya se ha presentado en el municipio de Cúcuta la época del niño provoca el consumo elevado de energía por las altas temperaturas, aumentando los valores estimados por la empresa prestadora del servicio, por lo cual se hace necesario adquirir energía proveniente del interior del país.

Generalmente los costos de generación de energía con el uso de biogás de rellenos sanitarios pueden variar mucho dependiendo del equipo de generación de electricidad, el tamaño, los tratamientos necesarios, el equipo de interconexión y la compresión (EPA, 2016). Además, se tiene que determinar el costo por la importación de la tecnología necesaria para la ejecución del proyecto ya que en el país no existen los proveedores necesarios para diseñar, ejecutar y operar este tipo de proyectos.

En la tabla 4.29 se encuentran cada uno de los elementos que requiere el proyecto para ser ejecutado adecuadamente. Sin tener en cuenta el sistema de captura y conducción necesario para cada proyecto.

Tabla 4.29. *Elementos necesarios para ejecutar el proyecto de aprovechamiento de biogás con motores de combustión interna.*

Elementos del proyecto de aprovechamiento con motores de combustión interna.
Motores de combustión interna de diferentes capacidades
Estación de quemado para excedentes de biogás
Tuberías y conductos del sistema
Estaciones de regulación en el sistema
Estación eléctrica para la conversión de la energía saliente a la potencia necesaria
Tendido de redes de conducción de la energía hasta la red
Sistema de limpieza de impurezas del biogás

Fuente: Autor

4.4.3 Evaluación Económica.

Para llevar a cabo la evaluación económica se toma como referencia costos de capital, de operación y mantenimiento tomados del manual de desarrollo de proyectos de energía desarrollado por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés), y los estudios de factibilidad desarrollados en otros rellenos sanitarios en el marco de los proyectos de MDL.

Para la evaluación económica se tienen en cuenta:

Teniendo en cuenta las alternativas para el aprovechamiento del biogás estudiadas en el numeral anterior y el desarrollo que han tenido estas técnicas a nivel nacional e internacional se realizó la evaluación económica de dos alternativas.

1. Aprovechamiento del Biogás para generación de electricidad.
2. Aprovechamiento del Biogás como combustible para uso directo.

En los dos análisis realizados se evaluó como factor de sensibilidad el proyecto con un factor de eficiencia del 73% de captura del biogás y un 60% de eficiencia.

Estas eficiencias dependerán de las condiciones operativas del relleno sanitario y el análisis de los factores que influyen en la generación.

Generación de Electricidad.

Para la evaluación económica de la alternativa se tomaron como valores de inversión los datos registrados en la tabla No. 4.30.

Tabla 4.30. *Cálculo de inversiones proyecto de generación de electricidad.*

Concepto	Cantidad	Unidad	Costo por unidad US \$	Costo por unidad US \$
Movilización y gestión del proyecto	1	Global	189000	189000
Construcción y preparación del	1	Global	150000	150000

Concepto	Cantidad	Unidad	Costo por unidad US \$	Costo por unidad US \$
lugar				
Boma de succión y tratamiento de Biogás	1	Global	0	0
Equipo de medida y monitoreo de Biogás		Global	40000	0
Planta de co generación de 3 Mw	1	Global	2000000	2000000
Subestación de la planta (interruptor principal, transformador elevador)	1	Global	215000	215000
Interconexión eléctrica	1	Global	200000	200000
Prueba de fuente	1	Global	30000	30000
				2784000
Ingeniería y contingencia	10%	%	278400	278400
Total				3062400

Fuente: Propia basada en costos de la EPA y prefactibilidad SCS Ingeniería

En el apéndice 3 y 4 se presenta la evaluación económica de las tecnologías alternativas 1 y 2 respectivamente, con los siguientes supuestos:

- Se tomaron los datos de Mw de generación proyectados en el modelo Colombiano de generación de Biogás.
- Se supone la construcción de la planta en el año 2019.
- Se tomó como ingreso de referencia el dato tomado de la Comisión Reguladora de Energía y Gas CREG, como el precio de venta de Kw/hr a la red.
- Si bien el proyecto de aprovechamiento para generación de electricidad está calculado con potencial de generación hasta el 2040, el mayor pico se presenta en el 2027 y de allí comienza a decrecer; para efectos del análisis financiero se realizó a 10 años, iniciando operación en el 2019.
- Los costos de operación y Mantenimiento (OyM) se tomaron de referencia del (US EPA, 2016).

- En el escenario No. 1 se trabajó con una eficiencia en el sistema de aprovechamiento del biogás del 73%, de acuerdo a lo calculado en el modelo Colombiano de Biogás.
- En el escenario No. 2 se trabajó con una eficiencia de aprovechamiento del 60%.
- Finalmente se evalúan inversiones, Tasa Interna de Retorno (TIR), Valor presente Neto (VPN).

En la tabla 4.31 se presenta el resumen de los resultados para cada uno de los Escenarios

Tabla 4.31. *Resultados evaluación económica proyecto generación de electricidad.*

	Escenario 1	Escenario 2
VPN	3.517.863.814	2.324.097.767
TIR	24,1%	21,2%
Período de recuperación de la inversión	4 años	6 años

Fuente: Propia

En estos resultados se ve la viabilidad que tiene el desarrollo del proyecto de aprovechamiento de Biogás tanto en el escenario 1, tomado como un escenario optimista donde se obtiene un valor presente neto de \$ 3.517.863.814 y una tasa interna de retorno del 24,1%.

En el escenario pesimista con una eficiencia de aprovechamiento del 60% todavía sigue siendo positivo el desarrollo del proyecto con un valor presente Neto de \$ 2.324.097.767 y una tasa interna de retorno del 21.2%.

Es importante mencionar dentro de la evaluación económica los Beneficios Tributarios contemplados con el objeto de incentivar el uso de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), (Buitrago Silvia, 2017):

- Renta Excenta 50%: Los obligados a declarar renta y que realicen inversiones directas para este tipo de proyectos tienen derecho a reducir anualmente de su renta, por los 5 años siguientes de la inversión, el 50% del valor total de la inversión realizada.

- Exclusión de IVA: Los equipos, maquinaria y servicios nacionales o importados que se destinen a la inversión o reinversión estarán excluidos de IVA, para lo cual se realizará el procedimiento de exclusión ante la ANLA, Agencia Nacional de Licencias ambientales.
- Incentivo arancelario: Para el desarrollo de proyectos de FNCE se contará con la exención de pago de derechos arancelarios de importación en equipos, maquinaria, materiales e insumos para uso exclusivo de pre inversión o inversión.
- Depreciación acelerada de equipos: Se puede aplicar una depreciación acelerada con una tasa anual no mayor al 20%.

Utilización como Combustible Directo.

Para el análisis económico de la alternativa de aprovechamiento del biogás en uso directo como combustible se utilizaron dos escenarios, el escenario 3 con una eficiencia del 73% y el escenario 4 con una eficiencia del 60%.

Se tomó como referencia el costo de distribución de m³ de biogás publicado por la empresa Gases del Oriente.

Para el cálculo de las inversiones se utilizó como referencia el costo de capital publicado por la EPA, que incluye manejo de condensados y construcción del gaseoducto a una distancia menor a 10 Km. Tal como lo expresa el autor en este tipo de proyectos un factor importante es la distancia a la que se encuentre la red para conexión del combustible.

Vale la pena resaltar que una alternativa importante de estudio será el desarrollo en la zona de un parque de Tecnología Industrial, para lo cual se reducirían los costos del transporte del combustible.

En la Tabla 4.32 se presenta el resumen de los escenarios 3 y 4. El escenario 3 arroja una Tasa Interna de Retorno del 13,7% con un Valor presente neto negativo que no hace que el proyecto sea atractivo y en el escenario No. 4 al reducirse los metros cúbicos generados se reduce los ingresos.

Tabla 4.32. *Evaluación económica.*

	Escenario 3	Escenario 4
VPN	- 624.719.920	- 3.293.356.334
TIR	13,7%	7,9%
Período de recuperación de la inversión	6 años	7años

4.5 Análisis de Ciclo de Vida

4.5.1 Definición del Objetivo y Alcance.

Como se mencionó en el numeral 4.5 se realizará el análisis de ciclo de vida con el objetivo de evaluar el desempeño ambiental y los impactos asociados a la operación del relleno sanitario en dos escenarios, uno evaluando el proceso como se realiza actualmente, con emisión a la atmósfera del biogás y con la alternativa de aprovechamiento para generación de energía eléctrica.

Escenario 1. Situación actual del relleno, generación de gases con emisión directa a la atmósfera a la atmósfera y utilización de energía eléctrica proveniente red nacional, para los servicios del relleno sanitario.

Escenario 2. Proyecto de aprovechamiento de biogás para generación de energía eléctrica

La metodología del análisis de ciclo de vida se realizará tomando como unidad funcional Tonelada, es decir se desea conocer los impactos ambientales asociados a la disposición final de

1 Tonelada de residuos sólidos dispuestos en el Parque de Tecnología Ambiental Guayabal (PTAG).

Se establecieron los límites del sistema, enmarcando la evaluación de los impactos desde la entrada de los residuos al Parque de Tecnología Ambiental Guayabal hasta la disposición en el relleno sanitario, incluyendo el pesaje, transporte interno en el relleno sanitario y tratamiento de los residuos que incluye la compactación, cobertura y el proceso de degradación como tal que se da en la fracción orgánica de los mismos.

4.5.2 Análisis de Inventario.

Teniendo en cuenta cada una de las fases realizadas en los límites de la actividad de disposición final se realizó una descripción detallada de los procesos unitarios incluyendo entradas y salidas por cada proceso.

Fase 1. Pesaje de los residuos sólidos: Una vez ingresa el vehículo recolector al relleno sanitario debe pasar por la báscula para tomar el peso del vehículo lleno. En esta actividad se identificaron el consumo de energía y consumo de papel como las cargas de la actividad.

Fase 2. Transporte de los residuos hasta el sitio de descargue. Desde el ingreso de los residuos al relleno sanitario, pasando por la báscula y llegando al sitio de descargue hay 1,7 Km de vía. Se tomó como referencia de los cálculos de costos unitarios y consumos de combustible de los equipos en el relleno sanitario los indicadores de rendimiento para calcular el consumo de combustible y aceite en dicha actividad.

Fase 3. Trituración y compactación de los residuos. Con el fin de reducir el volumen de los desechos y alcanzar la densidad de compactación superior a los 800 Kg/m³, el bulldozer realiza

la trituración y compactación de los residuos. Los consumos de combustible y aceite de motor fueron tomados del manual de Caterpillar.

Fase 4. Cubrimiento de los residuos: Para evitar la proliferación de olores y vectores, diariamente se realiza el cubrimiento de residuos con arcilla por ser el tipo de suelo predominante en la zona. Esta actividad se realiza con el bulldozer para lo cual se calculó rendimientos y consumos de combustible. De igual manera se incluye la arcilla como recurso utilizado en dicha actividad.

Fase 5. Degradación: La caracterización y composición de los residuos se consideró como el factor que influye en esta actividad. Anualmente en el relleno sanitario se realiza la caracterización de los residuos cumpliendo con la normatividad de controles ambientales. Se tomó la caracterización de 2015 (Informes Aseo Urbano SAS, 2015).

Fase 6. Tratamiento de lixiviados: Como se mencionó anteriormente en el relleno sanitario se realiza evaporación forzada de lixiviados a través de un equipo llamado Landshark: Se tomó las fichas técnicas del equipo para calcular el consumo energético del mismo.

Los datos extraídos de información primaria brindada por el proceso de Disposición Final del PTAG en los informes de disposición final y fichas técnicas de los equipos utilizados, se presentan en la tabla 4.33, utilizando como unidad funcional Tonelad y Kw/hr.

Tabla 4.33. *Análisis de Inventario LCA.*

Fase	Elemento	Descripción / Característica	Und. Funcional	Valor
Fase I. Pesaje de los residuos	Electricidad	Electricidad - energía eléctrica de baja potencia Consumo: 72 Kw/mes Ton dispuestas: 25.809 Ton/mes	Kw/hr	0,002789725
	Papel	Formato de papel tipo bond para recibo de pesaje Peso de la hoja 70 gsm, A4= 4,3 gramos	Ton	0,000005375

Fase	Elemento	Descripción / Característica	Und. Funcional	Valor
		Recibo promedio/ton= 1 hoja/8 Ton		
Fase 2. Transporte de los residuos hasta el patio de descargue	Combustible	Desplazamiento del vehículo compactador desde la entrada del PTAG hasta la zona de disposición. Distancia recorrida: 1,7 Km Rendimiento combustible: 0,13 gal/Km Promedio de carga de vehículo compactador: 10 Ton	Ton	7,19355E-05
	Aceite	Combustible distribuido en Colombia con menos de 50 ppm de azufre Aceite motor Volúmen de aceite: 38 Lts. Rendimiento: 250 horas. Rendimiento Buldócer: 60,71 ton/hr Densidad aceite motor: 0,863 ton/m3	Ton	8,17914E-06
Fase 3. Trituración y compactación de los residuos	Combustible	Consumo Buldócer D8 Caterpillar Horas de trabajo: 14hrs/día Toneladas tratadas: 850 Ton/día Rendimiento: 60,71 Ton/hr Rendimiento combustible: 8,9 gal/hr Densidad ACPM: 860Kg/m3	Ton	0,0004557
Fase 4. Cubrimiento de los residuos	Combustible	Buldócer utilizado en el cubrimiento de residuos. Horas de trabajo en cubrimiento de residuos: 3,2hrs Rendimiento de combustible: 8,9 gal/hr (Manual Caterpillar). Densidad del Diesel: 860 Kg/m3.	Ton	0,000109064

Fase	Elemento	Descripción / Característica	Und. Funcional	Valor	
	Arcilla	Material de cobertura utilizado para el cubrimiento diario de los residuos	Ton	0,2	
		Comida	60,0%	Ton	0,6
		Papel y Cartón	6,7%	Ton	0,067
		Poda (jardines)	3,6%	Ton	0,036
		Madera	1,4%	Ton	0,014
		Caucho, Piel, Huesos y Paja	3,8%	Ton	0,038
		Textiles	3,8%	Ton	0,038
		Papel Higiénico	2,2%	Ton	0,022
Fase 5. Degradación	5. Composición de los residuos	Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	0,0%	Ton	0
		Metales	0,7%	Ton	0,007
		Construcción y Demolición	0,9%	Ton	0,009
		Vidrio y Cerámica	1,9%	Ton	0,019
		Plásticos	12,0%	Ton	0,12
		Otros Inorgánicos	3,0%	Ton	0,03
Fase 6. Tratamiento de lixiviados	6. Energía LandShark	Equipo utilizado para la evaporación de lixivado. Rendimiento 4,3 M3/hr. Consumo energético: 30 Kw/hr		Kw/hr	0,035294118

Fuente: Propia con información de catálogos de equipos y análisis de costos unitarios.

Teniendo en cuenta cada uno de los elementos analizados en el inventario se llevaron a búsqueda a la base de datos Ecoinvent 3.0, la cual arroja el formato estructurado del inventario el cual es el insumo para el software LCA manager

4.5.3 Evaluación del Impacto.

Teniendo en cuenta los impactos y el análisis que se realiza desde el punto de vista de Calentamiento Global se presentan los resultados para el Escenario No. 1

Tabla 4.34. *Resultados del Escenario No. 1.*

Indicador / Unidad	Pesaje de los residuos	Transporte de los residuos hasta el patio de descargue	Trituración y compactación de los residuos	Cubrimiento de los residuos	Degradación	Tratamiento de lixiviados
CML 2001 - Calentamiento global (kg CO2 eq.)	2,64E-03	5,34E-02	2,80E-01	1,47E+00	1,51E+03	2,42E-02

Fuente: Propia

En la operación actual que desarrolla el relleno sanitario el proceso que genera mayores emisiones de Kg-CO₂ eq., es la degradación de los residuos sólidos calculada en 1.51E+03 Kg-CO₂ eq, entendiéndose que es en este proceso donde se genera los principales gases causantes del calentamiento, generado por la descomposición del 60% de material orgánico.

En el escenario No. 2 se tiene en cuenta el aprovechamiento de del biogás para la generación de energía eléctrica y los impactos asociados a dicha generación a través del aprovechamiento de biomasa y se incluyen los impactos asociados al aprovechamiento del Biogás, donde se evidencia la reducción significativa de las emisiones de calentamiento global causadas al realizarse el aprovechamiento de biogás.

Tabla 4.35. Resultados en el Escenario No. 2.

Indicador / Unidad	Pesaje de los residuos	Transporte de los residuos hasta el patio de descargue	Trituración y compactación de los residuos	Cubrimiento de los residuos	Tratamiento de lixiviados	Degradación	Aprovechamiento de Biogás	Generación eléctrica
CML 2001 - Calentamiento global (kg CO ₂ eq.)	7,41E-04	5,34E-02	2,80E-01	1,47E+00	2,48E-04	4,09E+02	7,79E-04	7,79E-04

4.5.4 Interpretación.

Como se ha expresado en la evaluación de las alternativas de aprovechamiento de Biogás, la medición del impacto a través del análisis de ciclo de vida confirma la reducción significativa desde el punto de vista de calentamiento Global que tendría el aprovechamiento del Biogás bajo la tecnología de generación de energía eléctrica.

4.6 Selección de la Alternativa

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se propone en este apartado presentar la alternativa y sistema de aprovechamiento que permita realizar la valorización energética del biogás generado por los residuos que se disponen en el relleno sanitario del Parque de Tecnología Ambiental Guayabal y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Con los resultados encontrados en las fases anteriores se realizó la selección de la alternativa de captura y aprovechamiento, basándose en la capacidad operativa actual del PTAG, los aspectos que afectan directamente la generación de biogás, la capacidad financiera de la empresa

Aseo Urbano S.A.S. E.S.P., los tratamientos necesarios para el biogás, las necesidades de la población aledaña, los beneficios ambientales y en referencias de proyectos similares de aprovechamiento ejecutados a nivel nacional e internacional.

Se consideraron las condiciones encontradas en la celda vaso norte para determinar la necesidad de usar pozos de extracción verticales, debido a que la construcción de los pozos actuales de gavión no cumple con los requerimientos mínimos para la instalación de equipos de succión, además estas estructuras suelen ceder ante los movimientos de la masa de residuos lo cual significa que no se tiene una conexión directa entre las plataformas de residuos, generando la acumulación del biogás y su migración por lugares diferentes a las chimeneas de evacuación.

La red de conducción del biogás debe ser perimetral debido a que la empresa Aseo Urbano, plantea dentro de sus objetivos usar el terreno de la celda para aplicar proyectos de aprovechamiento de la radiación solar mediante tecnología fotovoltaica. Además es necesario que en algunos lugares dicha red sea enterrada para permitir el flujo vehicular hacia el vaso sur.

Se deben aprovechar las condiciones morfológicas de la celda para facilitar la eliminación de la humedad en la corriente de biogás, esta se genera por los cambios de temperatura al interior de la tubería de conducción, además se deben implementar filtros de impurezas como el H₂S con el objetivo de garantizar la extensión de la vida útil de la maquinaria utilizada para el aprovechamiento del biogás.

Se seleccionó el aprovechamiento del biogás en la producción de electricidad con la tecnología de motores de combustión interna, teniendo en cuenta la viabilidad económica y la regulación normativa. El aprovechamiento del biogás en proyecto de cogeneración de energía, podría realizar venta de los excedentes en la red de distribución energética.

Por el potencial de generación de 3MW y según la CREG, todo proyecto que genere más de 1MW será considerado como un proyecto de generación a gran escala.

Por considerarse un proyecto de uso de fuentes no convencionales de energía (FNCE), se otorgan beneficios tributarios como son la reducción en el pago de impuestos, la reducción en la devaluación de la maquinaria adquirida y la excepción del pago de aranceles por la importación de la misma.

La alternativa de aprovechamiento energético con el uso de motores de combustión interna arrojó que existe una facilidad de adaptación de los equipos de combustión a caudales de biogás inferiores a los predeterminados.

Como beneficios ambientales se resalta que esta tecnología reduce considerablemente los componentes tóxicos y los efectos nocivos que este presenta sobre el ambiente y las personas, además de ser un control de olores muy efectivo (Blanco et al., 2017).

Con el aprovechamiento del biogás y una eficiencia del sistema de captura del 73% se reducirían 3'076.979 tonCO₂-eq por la duración total del proyecto hasta el año 2040. Si se logra mejorar la eficiencia del sistema de captura al 84% se reducirían 3'540.634 tonCO₂-eq según las proyecciones realizadas con el modelo colombiano de biogás.

Los valores expuestos anteriormente no consideran las emisiones generadas por el proyecto al generar la electricidad, ya que se produce un gas residual de la combustión de este, por lo cual se deben implementar procesos de tratamiento de emisiones de combustión.

Al ejecutar el proyecto de aprovechamiento energético, se supliría los 35kW de consumo mensual de las instalaciones del PTAG, disminuyendo el costo generado.

Con estos resultados se obtienen un modelo que puede ser aplicado en otros rellenos sanitarios del país, teniendo en cuenta los beneficios técnicos, económicos y ambientales

anteriormente expuestos. Para el desarrollo de un proyecto de este tipo en un relleno sanitario se propone a través del Figura 4.12 la siguiente estructura de desarrollo del proyecto.

Fase 1. Evaluación de condiciones operativas del relleno sanitario: A través de la verificación de las condiciones operativas del relleno sanitario, se puede obtener la información necesaria para la proyección de la generación del biogás. Se requiere evaluar información operativa y de condiciones de la zona como: disposición de toneladas, vida útil del rellenos sanitario, proyección de toneladas, condiciones climatológicas, cobertura de residuos, manejo de gases, manejo de lixiviados, compactación de residuos y cobertura de residuos.

Fase 2. Modelación de la generación del biogás. Aplicando los modelos de estimación de la generación de biogás se obtiene la proyección de biogás generado y la eficiencia del sistema de captura que depende de las condiciones operativas del lugar. Allí se podrá evaluar condiciones operativas que pueden mejorar, para maximizar el caudal y calidad del biogás.

Fase 3. Evaluación de alternativas. Basado en los resultados de la modelación del biogás se evalúan las tecnologías disponibles para la valorización energética del biogás y se tendrán en cuenta las condiciones de mercado de dichas alternativas; es decir precio de Kw para el caso de generación de energía eléctrica o precio del m³ de biogás para el caso de uso directo combustible. Tal como se señaló en los apartados anteriores las distancias para la conexión a red eléctrica o para el suministro a la red de conducción del gas son determinantes en la evaluación económica del proyecto.

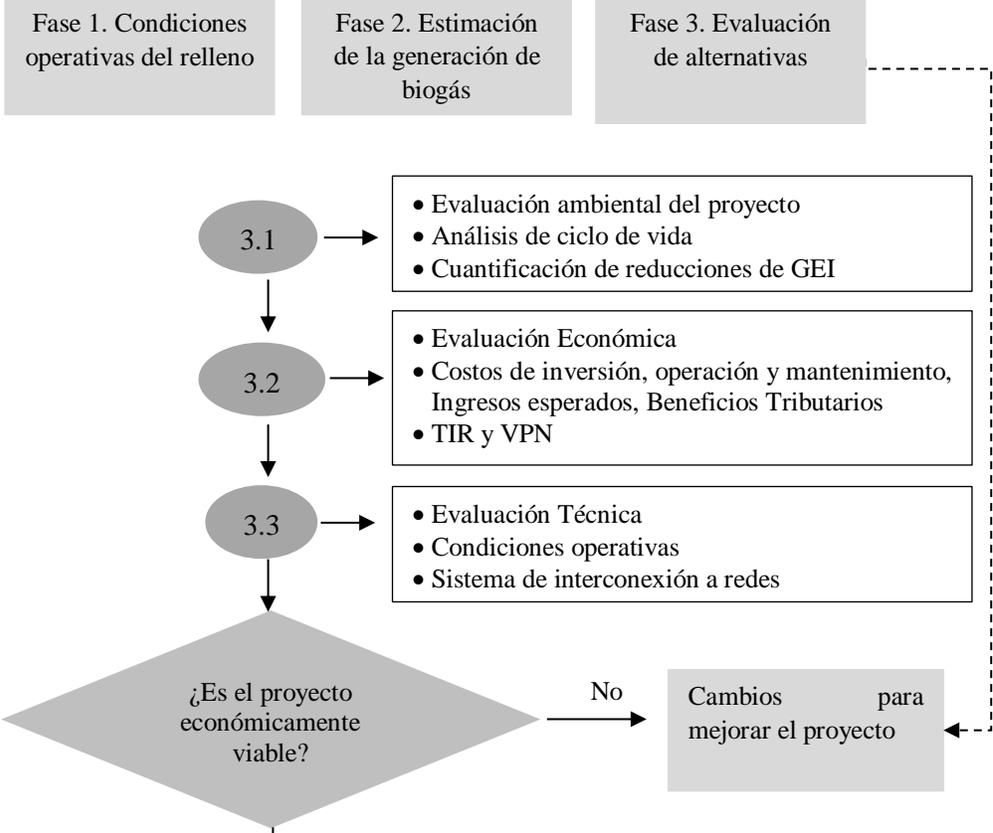
Los beneficios tributarios y la regulación normativa de las alternativas disponibles de deben tener en cuenta en el momento de realizar la evaluación técnica y económica.

La evaluación del impacto ambiental, podrá desarrollarse a través de la metodología de análisis de ciclo de vida.

Fase 4. Ejecución y puesta en marcha: Teniendo en cuenta el resultado de la evaluación técnico, económico y ambiental se selecciona la alternativa que además de los impactos positivos por la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero sea un proyecto sostenible y económicamente viable, para su ejecución y puesta en marcha.

Figura 4.13. Fases para la formulación de un proyecto de aprovechamiento de Biogás

Fuente: Propia



5. Conclusiones

La evaluación de las condiciones operativas del relleno sanitario permitió identificar las recomendaciones técnicas que permitan maximizar la actividad metanogénica y lograr una mayor eficiencia en los proyectos de captura y aprovechamiento del biogás.

Mejorar la cobertura diaria de residuos, garantizar el retiro de la cobertura intermedia, la evacuación de las bolsas de lixiviados existentes, mejorar el sello y cobertura final de los residuos, permitirá mejorar la eficiencia en la captura del biogás.

A través del Modelo Colombiano de generación de biogás se estimó que el relleno sanitario del Parque de Tecnología Ambiental Guayabal, para el año 2019 se generará 2.503 m³/hr de biogás, equivalentes a 1473 m³/hr metano, teniendo en cuenta el factor de corrección de metano y una eficiencia de extracción del 73%. Con las proyecciones del biogás se calcula un potencial de generación promedio de 3MW, lo cual podría suministrar electricidad para aproximadamente 7.000 hogares.

Con la implementación del proyecto de aprovechamiento de biogás para generación de electricidad se calculan unas reducciones estimadas de 2.915.652 Ton-CO₂ equivalentes, lo cual hace que este sea un proyecto atractivo desde el punto de vista de valorización energética y de contribución a las metas nacionales de mitigación de gases de efecto invernadero.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación técnica, ambiental y económica de aprovechamiento del biogás, se encontró que la generación de energía eléctrica es una alternativa

viable que contribuye a la diversificación energética del país y al desarrollo de un modelo de negocio que puede ser aplicable en otros rellenos sanitarios del país.

En la evaluación económica se encontró que las políticas públicas desarrolladas en Colombia frente a Fuentes No Convencionales de Energía establecen incentivos tributarios de manera que se reduzcan las inversiones pagando menos impuestos y omitiendo gastos de importación y aranceles, favoreciendo la implementación de este proyecto.

Bajo la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se confirma la reducción del impacto en el Calentamiento Global que tendría el proyecto de valorización energética en el relleno sanitario de la PTAG, lo que permitiría contribuir con las reducciones cuantificadas de GEI y aportar a los compromisos internacionales que tiene Colombia frente al tema.

Se recomienda para futuras investigaciones evaluar la alternativa de desarrollar en las zonas aledañas al Parque de Tecnología Ambiental Guayabal, una zona industrial de cerámica que utilice el biogás de la PTAG como combustible directo para los hornos. Con la reducción de la distancia en el transporte del biogás y por ende las inversiones y costos del gaseoducto, esta alternativa puede cobrar relevancia.

Al culminar este estudio a finales del 2018, la empresa Aseo Urbano SAS ESP, fue comprada por el grupo empresarial Veolia. Esta firma francesa cuenta con experiencia en el desarrollo de proyectos de eficiencia energética a nivel internacional, garantizando que continúe la línea de desarrollo del proyecto.

6. Referencias Bibliográficas

- Ambiente, M. (2017). Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico.
- Aseo Urbano S.A.S. E.S.P. (2016). *Caracterización de los residuos sólidos ordinarios del parque tecnológico ambiental guayabal 2016*. San José de Cúcuta.
- Aseo Urbano S.A.S. E.S.P. (2018). Informe de Gestión Aseo Urbano SAS 2017. Recuperado de <http://www.aseourbano.com.co/wp-content/uploads/2018/04/informe-de-gesti% c3% 93n-aseo-urbano-cucuta-final-2017.pdf>
- Barros R., Tiago F., Santos A., Ferreira C., Pieroni M., Moura J., Freitas J. (2018). A potential of the biogas generating and energy recovering from municipal solid waste. *Renewable Energy Focus*. 25, pp 4-16.
- Beylot A., Villeneuve J. y Bellenfant G. (2013). Life Cycle Assessment of landfill biogas management: Sensitivity to diffuse and combustion air emissions. *Waste Management*, 33(2), pp 401–411.
- Blanco G., Santalla E., Verónica C., y Levy A. (2017). *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico*. Recuperado de <http://proyectocarbono.org/files/documents/Generacion-de-electricidad-a-partir-de-biogas-capturado-de-residuos-solidos-urbanos-Un-an.pdf>
- Broun R. y Sattler M. (2016). A comparison of greenhouse gas emissions and potential electricity recovery from conventional and bioreactor landfills. *Journal of Cleaner Production*, 112(4), pp 2664–2673.

Colmenares W. y Santos K. (2008). Generación y manejo de gases en sitios de disposición final. Recuperado de <http://www.ingenieriaquimica.org/system/files/relleno-sanitario.pdf>

Comision de Regulación de Energía y Gas (CREG). Resolución No 240 (2016). Colombia. Recuperado de <http://www.cnogas.org.co/asp/detnoticia.asp?id=693>

CONPES. CONPES 3874 (2016). Colombia. Recuperado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>.

Chacartegui, R., Carvalho, M., Abrahao, R., & Becerra, J. (2015). Analysis of a CHP plant in a municipal solid waste landfill in the South of Spain. *Applied Thermal Engineering*, 91, 706-717.

Chiemchaisri C., Chiemchaisri, W., Visvanathan, C., Tränkler, J., & Kurian, J. (2004). Bioreactor landfill for sustainable solid waste landfill management. Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok Thailand.

Dávila J. (2009). Biogas de rellenos sanitarios - generalidades. Recuperado de https://www.globalmethane.org/documents/events_land_20090326_landfill-26mar09_landfill_gas_collection_systems_jose_luis_davila.pdf

Dillah, D. D., Panesar, B., Miles Gornto, E. I. T., & Dieleman, B. L. (2013). New and Improved Implementation of the First Order Model for Landfill Gas Generation or Collection.

Emkes H., Coulon F. y Wagland S. (2015). A decision support tool for landfill methane generation and gas collection. *Waste Management*, 43, pp 307–318.

EPA, E. P. A. (2009). Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0. Recuperado de https://www.globalmethane.org/documents/models/pdfs/manual_del_usuario_modelo_mexicano_de_biogas_v2_2009.pdf

Eteisa (2006). Estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento del biogás generado en el Relleno Sanitario Guayabal del municipio de Cúcuta.

Feng S., Zheng Q, y Xie H. (2015). A model for gas pressure in layered landfills with horizontal gas collection systems. *Computers and Geotechnics*, 68, pp 117–127.

García C., Vallejo G., Lou M., y Escobar E. (2016). *El Acuerdo de París: Así actuará Colombia frente al cambio climático*. Recuperado de <http://www.wwf.org.co/?266971/El-Acuerdo-de-Pars-As-actuar-Colombia-frente-al-cambio-climtico>

IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, PNUD, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, M. de A. vivienda y desarrollo territorial. (2016). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

Kreith F. y Tchobanoglous G. (2002). *Handbook of Solid Waste Management*. *Waste Management Research* 13 (6), pp 519-531.

Lee, U., Han, J., & Wang, M. (2017). Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways. *Journal of cleaner production*, 166, 335-342.

Ludwig V. (2009). *Manual del Usuario Modelo Colombiano de Biogás*. Recuperado de <https://www.globalmethane.org/documents/models/pdfs/ManualdeUsuarioModeloColombiano.pdf>

González M. (1997). *Biogás En Vertederos Controlados De Residuos Sólidos Urbanos*.

Martín S. (1997). *Producción y Recuperación del Biogás en Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos: Análisis de Variables y Modelización*. Universidad de Oviedo.

Ministerio de vivienda ciudad y Desarrollo. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, TÍTULO F Sistemas de Aseo Urbano (2017). Colombia.

Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. Decreto Número 2981 de 2013 (2013). Ordoñez, M. (2011). *Evaluacion de la Generacion de Biogas en Rellenos Sanitarios en Colombia en el Marco del Protocolo de Kyoto*. Universidad Tecnológica de Pereira.

Norma Técnica de Colombia - ISO 14040 (2007). Gestión Ambiental, Análisis de Ciclo de Vida Principios y Marco de Referencia. (571), pp 1–24.

Ordoñez, M. D. C. O. (2011). Evaluación de la Generación de Biogas en Rellenos Sanitarios en Colombia en el Marco del Protocolo de Kyoto (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Química Industrial).

Piñas, J. A. V., Venturini, O. J., Lora, E. E. S., Oliveira, M. A. D., & Roalcaba, O. D. C. (2016). Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). *Revista Brasileira de Estudos de População*, 33(1), 175-188.

Rudas G., Antolínez R., Nieves E., Venegas B., Téllez D., Medina J. (2014). Desarrollo y Aplicación Piloto de la Metodología de Evaluación de los Cobeneficios de Acciones de Mitigación del Cambio Climático en Colombia. *Econometria Consultores*.

Serrano, C. (2006). Alternativas de utilización de biogás de rellenos sanitarios en Colombia (tesis para Magister en Gestión y auditorías Ambientales). Universidad de las Palmas de Gran Canaria.

Turner, D. A., Beaven, R. P., & Woodman, N. D. (2017). Evaluating landfill aftercare strategies: A life cycle assessment approach. *Waste management*, 63, 417-431.

SSDP, S. de S. P. (2015). *Informe anual de Disposición Final de Residuos Sólidos en Colombia*.

US EPA. (2016). LFG Energy Project Development Handbook. *Energy*, (February), 94.

Yecheil A. Y Shevah Y. (2016). Optimization of energy generation using landfill biogas. *Journal of Energy Storage*, 7, pp 93–98.

7. Apéndices

Apéndice 1. Datos de Precipitación

Promedios Climatológicos 1981 - 2010 IDEAM - Excel

CODIGO	COT	NOMBRE	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	ELEV	LONGITUD	LATITUD	PRECIPITACIÓN (mm)												ANUAL	DIA
								DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV		
47040012	PM	Encanto II	El Encanto	Antioquia	120	75°12'34.07"W	4°44'54.07"N	210.7	292.2	323.8	343.8	353.1	289.7	285.4	229.1	188.8	187.4	208.9	234.2	2392.2	34
47040016	PM	San Agustín	El Encanto	Antioquia	125	75°29'5.47"W	4°38'38.57"N	246.8	233.4	225.2	264.3	278.2	304.4	323.4	240.6	180.6	201.0	202.0	240.4	1620.8	18
44130001	PM	Monsú Lora	La Chorrera	Antioquia	187	75°12'38.97"W	2°57'46.87"N	246.1	198.4	275.8	348.2	438.8	508.6	521.8	276.4	252.2	269.1	251.3	212.0	3337.8	33
44130002	PM	Piso Babil	La Chorrera	Antioquia	183	75°40'23.47"W	2°54'54.47"N	281.1	191.8	250.4	334.7	437.4	414.7	371.0	201.4	138.7	241.9	227.9	189.0	3271.9	33
44130003	PM	Bacurí	La Peñera	Antioquia	100	80°28'12.37"W	1°14'9.47"N	329.9	354.8	359.0	376.3	376.4	313.1	257.0	258.8	217.7	187.0	300.8	327.8	1628.9	20
44130004	PM	Manzanilla	La Peñera	Antioquia	109	70°32'48.67"W	1°18'19.27"N	297.8	299.7	360.9	390.2	381.9	364.8	388.3	258.8	214.2	235.5	194.1	284.7	1632.0	18
44130005	PM	Peñera La	La Peñera	Antioquia	100	80°39'28.37"W	1°18'42.87"N	316.3	270.4	425.8	398.9	426.4	368.9	335.7	293.3	253.9	250.2	304.1	302.2	1771.9	24
44130011	PM	Piso Corinto	La Peñera	Antioquia	104	80°49'31.87"W	1°17'17.07"N	345.8	338.4	346.6	390.5	421.0	367.4	344.2	267.8	246.4	280.9	312.1	327.8	1844.9	26
44130012	SP	A. Vasquez Cobo	Leticia	Antioquia	84	80°56'21.87"W	4°11'37.97"N	346.8	354.4	357.9	376.4	351.9	389.8	344.2	267.8	223.8	257.8	317.5	382.1	1889.1	26
44130013	PM	María Mercedes	Marín - Parera	Antioquia	134	70°28'46.57"W	1°15'4.87"N	324.1	343.2	342.9	408.3	437.1	413.5	296.4	227.9	157.0	176.5	302.5	364.8	4088.0	38
44130014	PM	Monsú Lora	Marín - Parera	Antioquia	138	70°48'46.47"W	1°17'42.27"N	249.9	338.7	331.4	411.5	389.8	318.1	284.4	216.0	164.0	291.4	308.8	305.9	1701.0	18
47040018	PM	Piso Tolosa	Puerto Nariño	Antioquia	124	74°16'6.70"W	1°21'48.27"N	288.8	244.1	314.7	376.9	380.7	362.4	337.4	276.2	242.4	243.8	343.3	273.0	1691.1	21
47040020	PM	Refugio II	Puerto Nariño	Antioquia	140	74°22'12.07"W	1°20'30.27"N	310.0	190.4	215.2	347.4	322.9	371.4	326.8	242.6	217.4	154.4	118.1	182.7	1944.4	10
47040021	PM	Remolinos	Puerto Nariño	Antioquia	142	70°37'0.27"W	1°18'32.27"N	242.1	248.4	334.1	432.4	464.9	371.0	315.7	313.9	258.3	283.6	305.0	274.9	1891.1	10
47060022	PM	Sotrocho Marandú	Puerto Nariño	Antioquia	88	72°40'21.17"W	1°28'37.77"N	249.9	274.3	336.9	430.7	354.3	206.4	211.8	244.6	199.3	204.2	224.4	248.7	1774.8	13
44130015	PM	Piso Nariño	Puerto Nariño	Antioquia	88	70°21'36.27"W	1°47'1.87"N	349.7	304.0	300.8	323.8	280.7	240.6	151.8	138.8	199.2	201.1	199.2	349.2	3023.4	19
44130016	PM	Aguaclay	Puerto Santander	Antioquia	134	72°48'41.87"W	0°50'28.57"N	212.2	250.0	310.2	388.5	420.8	419.7	324.8	210.5	174.4	241.4	278.1	244.8	1632.9	19
44130017	PM	Angosturas	Puerto Santander	Antioquia	134	72°42'14.37"W	0°50'27.47"N	205.9	132.0	423.2	455.4	484.3	468.5	443.2	376.9	302.3	349.7	317.3	309.4	4343.1	12
44130018	PM	Monsú Lora	Puerto Santander	Antioquia	133	72°32'40.47"W	0°41'51.87"N	249.7	224.0	300.4	436.0	442.2	401.1	277.2	207.4	185.3	227.3	242.4	224.0	1490.2	13
44160019	PM	Itaizabal	Puerto Santander	Antioquia	118	71°57'27.57"W	1°55'44.07"N	270.9	311.4	291.3	442.0	434.8	388.7	321.4	244.2	252.2	247.0	258.0	282.4	1791.1	14
54180040	PM	Nejames	Abejorral	Antioquia	3180	70°29'46.57"W	6°40'6.87"N	80.4	94.0	151.5	188.8	200.6	142.8	122.8	146.9	214.3	377.8	240.0	181.4	1042.3	11
11110020	PG	Montepío	Montepío	Antioquia	1600	70°43'30.07"W	6°50'32.07"N	92.4	108.7	151.1	240.9	241.9	187.4	141.8	140.0	218.1	270.0	226.0	193.8	1221.9	11
13060020	CD	Nejames	Nejames	Antioquia	1640	70°42'36.27"W	6°52'34.47"N	170.6	193.0	302.1	438.4	426.6	433.2	402.4	447.7	548.9	546.9	348.6	214.0	4679.2	18
17010802	PM	Itaizabal	Antioquia	1590	70°43'30.07"W	6°54'32.07"N	77.3	102.4	152.2	298.8	302.2	246.3	144.2	207.1	207.5	281.8	234.4	116.8	2480.4	8	

Lluvia | Temperatura | Brillo Solar | Humedad Relativa | Evaporación | Evapotranspiración Potencial

Apéndice 2. Mapa de Evaporación Multianual.

