

**EVALUACIÓN DE LAS POSIBILIDADES DE COLECCIÓN, PURIFICACIÓN
Y APROVECHAMIENTO
DEL BIOGÁS GENERADO EN EL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA
DE LA CIUDAD DE MANIZALES**

**JULIAN ALBERTO SOTO OSORIO
WILMER FERNANDO BENAVIDES ALBA**

**Universidad Católica de Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Ingeniería Ambiental
2015**

**EVALUACIÓN DE LAS POSIBILIDADES DE COLECCIÓN, PURIFICACIÓN
Y APROVECHAMIENTO
DEL BIOGÁS GENERADO EN EL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA
DE LA CIUDAD DE MANIZALES**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental en modalidad:
Proyecto de investigación articulado a un semillero de investigación en Tecnologías
Avanzadas de Saneamiento Ambiental
Línea de Investigación en Saneamiento, Desarrollo y Gestión Ambiental
Grupo de Investigación en Desarrollos Tecnológicos y Ambientales

Presentado por:

Wilmer Fernando Benavides Alba
Julián Alberto Soto Osorio

Tutor de proyecto de grado:

Wilmar Osorio Viana

**Universidad Católica de Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Ingeniería Ambiental**

2015

A Dios, por sembrar en mí motivaciones especiales que me han llevado a los logros conseguidos, siendo siempre el camino a seguir.

A mis padres Carlos e Irma, que día tras día han forjado mi persona, luchando siempre para que pueda cumplir mis metas y deseos. Gracias por la formación y siempre mostrarme el mejor camino.

Ustedes dos llenan siempre mis días de motivación y alegría.

Mi familia, amigos y amigas, siempre han sido un apoyo constante e incondicional.

El recuerdo de mis viejos Miguel y Tiberio. Siempre fueron mis maestros, mostrando siempre el lado bueno de la vida. Me enseñaron lo que de verdad importa en la vida.

Muchas son las personas que forjan y acompañan mi camino a diario... a ellos que siempre se mostraron sinceros y son el apoyo constante en los buenos y malos momentos.

Mil gracias.

Julian Alberto Soto

Primero que todo quiero agradecer a Dios por este logro que ha sido posible gracias a la colaboración y el apoyo de muchas personas especiales, cuya buena disposición aportó un granito de arena en la realización y culminación de mi carrera académica, desde lo más profundo de mi corazón agradezco a mis padres, Marleny Alba y Cesar Benavides, a mis hermanos, Norma y Faiber, a mi amigo, confidente y compañero de tesis Soto, a mi novia, Natalia y a todas aquellas personas cercanas que me acompañaron durante este proceso.

También quiero agradecer a la universidad católica de Manizales por su apoyo y acompañamiento durante este proceso de crecimiento y al Ingeniero Wilmar Osorio por su disposición a pesar de las adversidades. Espero que las enseñanzas fruto de este camino jamás se aparte de mi vida y me ofrezcan el privilegio de seguir a delante.

Fernando Benavides.

Contenido

RESUMEN	8
Capítulo 1. Contextualización y enfoque de la investigación.....	9
1.1 Hacia el aprovechamiento energético de los residuos sólidos en rellenos sanitarios.....	9
1.2. METODOLOGÍA.....	13
CAPITULO 2. CONCEPTOS BASICOS SOBRE RELLENOS SANITARIOS Y EL BIOGAS GENERADO. ..	15
2.1. RESIDUOS SOLIDOS	15
2.1.1. Residuos sólidos no peligrosos:.....	15
2.1.2. Biodegradables:.....	15
2.1.3. Reciclables:	15
2.1.4. Inertes:	15
2.1.5. Ordinarios o comunes:	15
2.1.6. Residuos peligrosos (RESPEL):.....	16
2.2. Conceptos técnicos de rellenos sanitarios	16
2.3 BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO	17
2.4 Algunos casos exitosos de rellenos sanitarios en Colombia que utilizan su biogás generado	21
2.4.1. Relleno Sanitario Doña Juana (Bogotá).....	23
2.5 Caso de Estudio; Relleno la Esmeralda (Manizales, Caldas).	23
2.5.1. Macro-localización:	23
2.5.2. Micro-localización:	23
2.5.3. Características de la zona:.....	24
Capítulo 3: ESTADO DEL ARTE EN TECNOLOGIAS DE APROVECHAMIENTO DE BIOGAS PARA RELLENOS SANITARIOS.....	26
3.1 métodos de estimación de la generación de biogás en rellenos sanitarios.	26
3.1.1 modelo colombiano de biogás	26
3.1.2. Modelo estadístico	27
3.2. Método de colección del biogás	28
3.2.1 chimeneas de extracción y quemado.....	28
3.2.2 campanas extractoras	29
3.3 Métodos de purificación de biogás.	29
3.3.1. Purificación por viruta de hierro	29
3.3.2. Biofiltros de lecho fijo	30
3.3.3. Método de filtración por membrana	30
3.4. Métodos de aprovechamiento del biogás	31
3.4.1 Aprovechamiento del gas metano para calefacción	31

3.4.2 aprovechamiento del gas metano como combustible para automóviles.....	31
3.4.3. Quemador de gas natural para el secado de lodos.....	32
3.4.4. Combustible para producción de energía eléctrica	32
Capítulo 4. Propuesta de aprovechamiento de biogás para el relleno la esmeralda	33
4.1. Profundización del método de filtración por membrana.	33
4.1.1 Diseño básico de un separador por membrana para la purificación de biogás..	34
4.1.2. Resultados de la simulación de purificación con doble etapa y configuración	35
4.2 Método de aprovechamiento de biogás utilizando quemador de gas.	41
Capítulo 5. Evaluación económica de instalación del sistema de aprovechamiento de gas metano para el relleno sanitario La Esmeralda, Manizales.	44
.....	44
5.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN	46
5.3 OPORTUNIDAD ECONÓMICA POSTERIOR A LA INSTALACIÓN	47
Capítulo 6. Conclusiones	52
SUGERENCIAS.....	53
Bibliografía	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Vigilancia tecnológica a través de publicaciones del tema de generación de biogás en rellenos sanitarios, número de artículos que responden a las palabras clave (Relleno sanitario biogás, Metano en rellenos y Tratamiento rellenos), publicados en diferentes bases de datos... 12	12
Figura 2 Combinación de métodos para rellenos sanitarios (Google, 2014)..... 17	17
Figura 3 Fases de descomposición reflejadas en la evolución idealizada de la composición del biogás tomada de (Aguilar, 2007) 19	19
Figura 4 Clasificación de amenazas según su origen. Tomada de (Rivera, 2012) 20	20
Figura 5 Esquema de producción de energía eléctrica a base de biogás proveniente de relleno sanitario tomada de (Reporte Sobre Biomasa, 2012). 21	21
Figura 6 Localización del relleno sanitario La Esmeralda 24	24
Figura 7 Chimeneas de extracción (CNPML, 2008) 28	28
Figura 8 Esquema de membrana para biogás PEEK. (Molino, y otros, 2012)..... 34	34
Figura 9 Esquema del módulo de membrana tomada de (Molino, y otros, 2012) 35	35
Figura 10 El metano en la corriente enriquecida (R) para una alimentación 50% de CH ₄ . (Molino, y otros, 2012) 36	36
Figura 11 Rendimiento del metano para alimentación de 50 % de CH ₄ tomada de (Molino, y otros, 2012) 37	37
Figura 12 El metano en la corriente enriquecida (alimentación 40 kg / h) tomada de: (Molino, y otros, 2012) 37	37
Figura 13 Incremento relativo de la fracción de metano (alimentación 40 kg / h). Adaptado de: (Molino, y otros, 2012) 38	38
Figura 14 Rendimiento de metano (alimentación 40 kg / h) adaptada de: (Molino, y otros, 2012) 39	39
Figura 15 Configuración en fase tándem adaptada de: (Molino, y otros, 2012) 39	39
Figura 16 Sparkgas 30 quemador de gas (BALTUR, 2015) 41	41
Figura 17 Esquema del proceso de aprovechamiento del metano proveniente del relleno sanitario la esmeralda 50	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Generación diaria de toneladas de basura en las principales ciudades de Latinoamérica (Noguera, 2010). 9	9
Tabla 2 Componentes del biogás adaptada (Panesso, 2011)..... 11	11
Tabla 3 Poder calorífico de diferentes combustibles. Adaptado de (NUNES, 2012) 18	18
Tabla 4 Rellenos sanitarios a nivel nacional con su vida útil y capacidad disponible (Publicos, 2010) 22	22
Tabla 5 Resultados numéricos para la configuración de fase 'tándem' Adaptado de: (Molino, y otros, 2012) Figura 15. 40	40
Tabla 6 Composición del Gas natural (INNERGY, 2015)..... 42	42
Tabla 7 Condiciones técnicas SPARKGAS 30 adaptada de: (BALTUR, 2015)..... 42	42
Tabla 8 Análisis de gases quemador SPARKGAS 30 (Grupo EMA , 2015)..... 43	43
Tabla 9 Instrumentación para la generación de aire caliente continuo a base de metano proveniente del relleno sanitario la esmeralda. 45	45
Tabla 10 Características formativas necesarias para el personal operario. 46	46
Tabla 11 Poder calorífico de diferentes gases (Técnica, 2011)..... 46	46
Tabla 12 Análisis económico de la instalación del sistema de aprovechamiento de biogás. 49	49

Tabla 13 Descripción y detalle del esquema del proceso de aprovechamiento del metano proveniente del relleno sanitario la esmeralda.	51
---	----

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1	27
Ecuación 2	27
Ecuación 3	29
Ecuación 4	30
Ecuación 5	35
Ecuación 6	35
Ecuación 7	47
Ecuación 8	47
Ecuación 9	47
Ecuación 10	47
Ecuación 11	48
Ecuación 12	48
Ecuación 13	48
Ecuación 14	48
Ecuación 15	49
Ecuación 16	49

RESUMEN

Se realizó una evaluación técnico-económica sobre la posibilidad de aprovechamiento del biogás generado en el relleno sanitario La Esmeralda, de la ciudad de Manizales. Para ello, se trataron dos aspectos fundamentales: la purificación del gas metano (su principal constituyente) y aprovechamiento del metano para la producción de flujos de aire caliente. Se identificó las tecnologías de purificación del biogás y se desarrolló un estudio ingeniería básica para su posible implementación; posteriormente se evaluó el potencial económico del aprovechamiento de dicho biogás, considerando información previa sobre los niveles de generación, los costos de capital y de operación del sistema.

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos, se propuso una metodología que se desarrolló en dos fases: una fase inicial de vigilancia tecnológica a través de publicaciones y revisión del estado del arte, enfatizando en la presentación comprensiva y crítica de los elementos fundamentales de ingeniería; la segunda fase, consistió en evaluar las tecnologías y técnicas propuestas en la etapa anterior, con miras a identificar las opciones más factibles para ser aplicadas en el relleno sanitario La Esmeralda en la ciudad de Manizales, Caldas. Se aplicó posteriormente y con base en lo anterior, un estudio de ingeniería económica básica del sistema.

Este proyecto de investigación, en la modalidad de proyecto de investigación articulado a un semillero de investigación, obtuvo como resultados un documento técnico detallado que presenta las alternativas tecnológicas actuales más factibles para una operación eficiente y sostenible del relleno sanitario La Esmeralda, en lo concerniente al aprovechamiento del biogás. Adicionalmente, los elementos científicos y de ingeniería que sirven de fundamento a estos desarrollos tecnológicos, fueron aplicados al análisis de un caso de estudio local, con lo que se pretende aportar al mejoramiento de los procesos de saneamiento ambiental y desarrollo sostenible en la región.

Este documento no pretende discutir todas las tecnologías de purificación y aprovechamiento actuales, sino mostrar una opción factible al caso de estudio relleno sanitario La Esmeralda de la ciudad de Manizales.

PALABRAS CLAVES:

Relleno sanitario, biogás, lixiviado, residuos sólidos, captación de biogás, membrana, purificación, aprovechamiento, metano, gas natural, equivalencia, ahorro, rentabilidad.

Capítulo 1. Contextualización y enfoque de la investigación

1.1 Hacia el aprovechamiento energético de los residuos sólidos en rellenos sanitarios

La generación, disposición y tratamiento de residuos sólidos es un tema que influye en cada uno de los habitantes del planeta, ya que debido al consumismo y el aumento poblacional, se viene evidenciando un aumento en la generación de este tipo de residuos. Para ilustrar lo anterior, la Tabla 1, presenta la cantidad de residuos sólidos generados en las ciudades más importantes de Latinoamérica (Noguera, 2010).

Tabla 1 Generación diaria de toneladas de basura en las principales ciudades de Latinoamérica (Noguera, 2010).

País	Capital	Sitio de Disposición Final	Toneladas Diarias	Población # de Habitantes
Argentina	Ciudad Autónoma de Buenos Aires	Centro de Disposición Final Numero 3	5000	2768772
Bolivia	La Paz	Relleno Sanitario de Alpacoma	450	2350466
Chile	Santiago de Chile	Relleno Sanitario Loma los Colorados, Santiago Poniente y Santa Marta	7100	5876013
Colombia	Bogotá	Relleno Sanitario Doña Juana	5891.8	6778691
Cuba	La Habana	Vertedero de la Calle 100	1060	2201600
Ecuador	Quito	Relleno Sanitario el Inga	1500	1839853
Salvador	San salvador	Relleno Sanitario de Nejapa	1609.62	316090
Guatemala	Ciudad de Guatemala	Botadero a Cielo Abierto el Trébol o Zona 3	1500	3762960
México	Distrito federal	Relleno Sanitario del Bordo Poniente	12000	8720916
Perú	Lima	5 Rellenos Sanitarios Autorizados: Casten, Zapallal, Portillo Grande, Huaycoloro y la Cucaracha	8938.5	8445200
Venezuela	Caracas	Relleno Sanitario la Bonanza	4000	2758917

Desde tiempos inmemorables el ser humano ha producido residuos sólidos fruto de sus actividades y quehaceres diarios para su desarrollo y establecimiento de sociedades sin tener un impacto alto en el ambiente, no obstante, los grandes asentamientos humanos desde el siglo XIX han provocado que las grandes generaciones de residuos provoquen daños considerables que no son tratados de forma correcta, provocando daños al aire, suelo, agua y paisaje.

La aplicación del método de relleno sanitario se atribuye a los ingenieros J.C Dawes y M. Call, utilizado por primera vez en Bradford, Inglaterra en la década de 1920 inspirando a los demás rellenos sanitarios conocidos hasta la actualidad. (Vasquez, 1996)

Un relleno sanitario tiene como función contener en el suelo por un tiempo suficiente para asegurar su biodegradación o de forma permanente si el residuo no se degrada los residuos generados por la población, en un terreno especializado para dicha actividad, que no cause molestia ni peligro para la salud o la seguridad pública (Jaramillo, 2003). Esta es una de las técnicas más conocidas y practicadas para la gestión integral de los residuos sólidos, al igual que la utilización de métodos de reducción, reciclaje, reutilización y reusó de residuos (Jaramillo, 2003).

El relleno sanitario es un método sencillo que da una solución práctica a los problemas causados por la generación de residuos ordinarios y sólidos, los cuales pueden generar contaminación del aire por proliferación de olores y emisión de gases generados por la degradación de los residuos, como también puede generar vectores contaminantes y afectación del paisaje en los sitios donde son dispuestos. Sin embargo, se han realizado gran variedad de investigaciones científicas que apuntan al mejoramiento de este tratamiento o método de disposición final, puesto que es una de las tecnologías más improductivas que se han desarrollado, dado que ocupa mucho espacio, generando únicamente costos de operación y dejando infértiles e inhabitables los terrenos cuando llega el momento de clausurarlos (Jaramillo, 2003). Por esto, en las últimas décadas se han desarrollado procesos que hacen de los rellenos sanitarios una actividad más rentable que contribuya aún más a la conservación de ambiente y su interacción con la sociedad. Se han diseñado e investigado nuevos métodos para la optimización de un relleno sanitario y a raíz de esto, se han propuesto opciones como: compostaje, producción de biogás, reutilización de áreas clausuradas con construcciones arquitectónicas de interés social, generación de energía (Jaramillo, 2003; Aguilar & Virgen, 2011).

En particular, los procesos fisicoquímicos y microbiológicos que ocurren en los residuos sólidos depositados en un relleno sanitario, dan lugar de forma espontánea a la formación de lo que se conoce como biogás. El biogás es generado constantemente por el relleno, Su origen es biológico, es decir, producto de la actividad de los microorganismos metabolizando sobre la materia orgánica de los residuos. Es una mezcla gaseosa compuesta fundamentalmente por metano y dióxido de carbono, que le confiere el carácter de gas combustible, con una importante gama de aplicaciones en la actividad humana (Jaramillo, 2003).

El hecho de que el biogás sea combustible y que tenga un considerable valor como portador energético, no significa que todo el que se genera en un relleno se pueda

aprovechar para este fin (Hernández, 1996). La Tabla 2 (Panesso, 2011), presenta las distribuciones porcentuales típicas de los gases que se encuentran en el biogás de un relleno sanitario, las cuales varían según la antigüedad del relleno y las características propias de los residuos. Por esta razón, es necesario hacer un estudio periódico de los residuos para saber cuánto volumen de biogás es aprovechable durante un periodo de tiempo determinado.

Tabla 2 Componentes del biogás adaptada (Panesso, 2011).

Componentes	Símbolo	Base volumen seco (%)
Metano	CH ₄	50-70
Dióxido de Carbono	CO ₂	35-55
Nitrógeno	N ₂	2-5
Oxígeno	O ₂	0,1-1
Sulfuros, Disulfuros, Mercaptanos.	---	0-1
Amoniaco	NH ₃	0,1-1
Hidrogeno	H ₂	0-0,2
Monóxido de Carbono	CO	0-0,2

Basándose en la normativa vigente para Colombia en lo referente a rellenos sanitarios (Decreto 838 de 2005, por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos, Bogotá, 2005), que dicta cuales deben ser los parámetros de ubicación, diseño y control para tales sistemas, se puede evidenciar que en términos de avances tecnológicos, Colombia está siendo rebasado por países como México, Chile, Canadá y Estados Unidos, ya que en algunas zonas del país se puede apreciar la utilización de botaderos a cielo abierto y rellenos sanitarios cuyo único fin es el de prestar el servicio de disposición final, con el respectivo plan de clausura, dejando de lado procesos y adelantos tecnológicos recientes, que deberían ser implementados en los rellenos sanitarios Colombianos (Noguera, 2010).

Por otra parte, es de destacar que el estudio del aprovechamiento del biogás generado en los rellenos sanitarios es importante en el contexto global del cuidado del medio ambiente, ya que las emisiones a la atmosfera de este gas contribuyen al aumento de la concentración de metano en la atmosfera, el cual se sabe que ocasiona efecto invernadero, incluso mayor al causado por el dióxido de carbono para el calentamiento global (Toro, 2009).

La implementación de tecnologías aprovechadoras del biogás no solo está enfocada en la prevención de la contaminación atmosférica, también apuntan a tomar el biogás como materia prima para la generación de energía y utilizarla en un proceso productivo, lo que podría ser fuente de ingresos económicos secundarios para el relleno sanitario. Es importante hacer una valorización al biogás que se emite a la atmósfera o que es quemado en chimeneas salientes de los rellenos sanitarios. Se hace indispensable dar la

importancia necesaria y convertir este residuo del relleno sanitario, en materia prima para procesos que generen desarrollo a las comunidades aledañas y utilidades económicas provenientes del sistema sanitario captador de residuos sólidos.

Colombia ha venido demostrando un atraso tecnológico en materia del tratamiento de los residuos sólidos urbanos. Por tal motivo y con el objeto de determinar el estado de las investigaciones sobre este tema, tanto a nivel nacional como internacional, se procedió a realizar un ejercicio de vigilancia tecnológica a través de publicaciones en cuatro bases de datos científicas (Sciencedirect, American Chemical Society, Scielo y Redalyc). Como se muestra en la Figura 1, el número total de publicaciones registradas con las palabras claves indicadas es de solo 340 en un periodo comprendido entre 1995 y 2014, cifra muy baja que muestra la importancia de adelantar investigaciones en esta área. Por otro lado, solo se encuentran alrededor de cinco a siete artículos que se ocupan del asunto en Colombia, demostrándose con ello muy poco interés al respecto, por lo que resulta pertinente realizar un trabajo de investigación que permita precisar la situación actual externa e interna del país en lo referente a las tecnologías de tratamiento de los residuos sólidos en rellenos sanitarios.

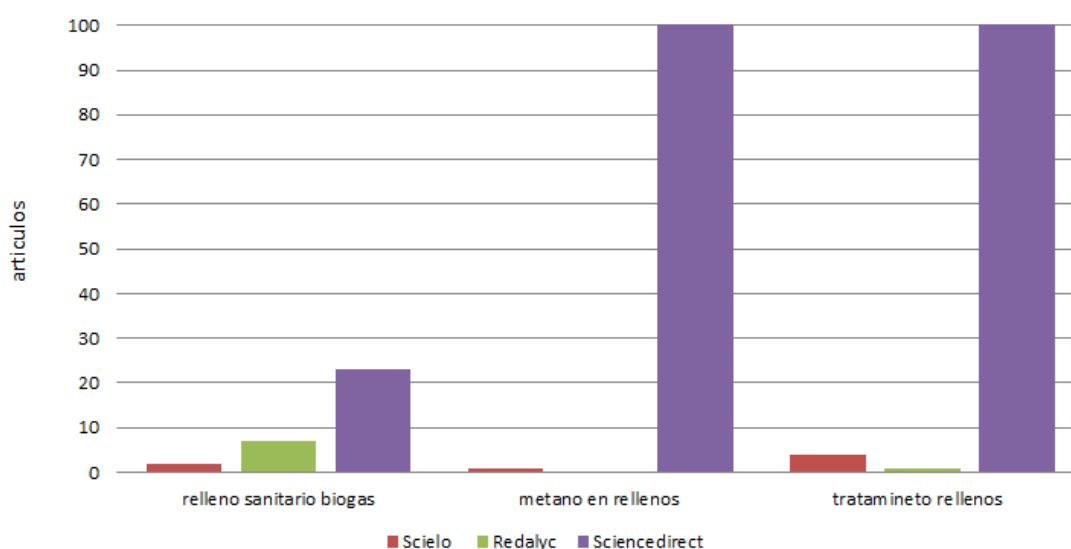


Figura 1 Vigilancia tecnológica a través de publicaciones del tema de generación de biogás en rellenos sanitarios, número de artículos que responden a las palabras clave (Relleno sanitario biogás, Metano en rellenos y Tratamiento rellenos), publicados en diferentes bases de datos.

Entre los aspectos más relevantes a considerar dentro del tema del aprovechamiento del biogás en rellenos sanitarios, se tienen (Jaramillo, 2003; Aguilar & Virgen, 2011):

1. Métodos de estimación de la generación de biogás
2. Métodos de colección de biogás
3. Tratamiento y purificación de metano (CH_4)
4. Técnicas y procesos de aprovechamiento para el metano (CH_4)

En este trabajo se propone abordar las siguientes preguntas de investigación de forma crítica: ¿cuáles son las tecnologías más importantes que existen en el momento para la colección, purificación y aprovechamiento del biogás de rellenos sanitarios? ¿de qué forma podrían adaptarse esas tecnologías para su aplicación al caso del Relleno Sanitario La Esmeralda de la ciudad Manizales? ¿Sería técnica y económicamente viable implementar un sistema de aprovechamiento del biogás en este relleno sanitario? El objetivo será brindar a la comunidad científica e ingenieril, pautas para el aprovechamiento de la energía contenida en este sistema de disposición final.

Es importante el estudio, profundización y puesta en marcha de las diferentes formas de captación, medición, purificación y aprovechamiento del metano que es generado en los rellenos sanitarios, generando así nuevas formas de aprovechamiento de energía que permitan reducir los impactos ambientales que acarrea la quema de combustibles fósiles.

1.2. METODOLOGÍA

Se realiza un trabajo de evaluación con carácter crítico, de naturaleza teórica, que se desarrolla en dos fases: en la primera se recopila y analiza a través de una investigación bibliográfica, la información pertinente a temas de: métodos de estimación de generación de biogás, métodos de colección de biogás, tratamiento de purificación de metano y técnicas y procesos de aprovechamiento para el metano emitido por los rellenos sanitarios.

La segunda fase consiste en analizar teóricamente las tecnologías y técnicas propuestas en la etapa anterior, identificando así las opciones más factibles para ser implementadas en el relleno sanitario “La Esmeralda” de la ciudad de Manizales, Caldas. Esta fase emplea técnicas de modelado matemático y simulación computarizada (MCB, 2014), soportada por datos reales¹ sobre las características físicas y de gestión del relleno. Para cumplir con el desarrollo de esta investigación, se emplea un procedimiento secuencial y sistemático.

Para esto, se realizaron las siguientes actividades dentro de cada una de las fases:

¹ Los datos sobre el relleno sanitario la Esmeralda, fueron tomados de la literatura abierta existente.

Fase 1:

- Sintetizar los métodos que se utilizan dentro de los rellenos sanitarios para colección de biogás.
- Determinar las tecnologías que se utilizan para la purificación de metano, que se obtiene de la emisión de biogás generado en un relleno sanitario.
- Analizar las técnicas aplicadas para el aprovechamiento de biogás y la generación de energía a partir de metano, aplicables a cualquier proceso industrial, comercial, o doméstico.

Fase 2:

- Seleccionar la técnica de recolección de biogás más pertinente para ser implementada al caso del relleno sanitario “La Esmeralda”, y realizar un estudio de pre-diseño e ingeniería básica para su implementación.
- Seleccionar la técnica de purificación de metano más pertinente para ser implementada al caso del relleno sanitario “La Esmeralda”, y realizar un estudio de pre-diseño e ingeniería básica para su implementación.
- Seleccionar la técnica de aprovechamiento de metano para producción de energía, más pertinente para ser implementada al caso del relleno sanitario “La Esmeralda”, y realizar un estudio de pre-diseño e ingeniería básica para su implementación.

La metodología incluye la aplicación de conocimientos de las siguientes áreas del plan de estudios de ingeniería ambiental en la Universidad Católica de Manizales: gestión integral de residuos sólidos, ordenamiento territorial, estudios de impacto ambiental, recurso aire, operaciones unitarias, balances de materia y energía, sistemas de información geográfica y producción más limpia, formulación y evaluación de proyectos.

CAPITULO 2. CONCEPTOS BASICOS SOBRE RELLENOS SANITARIOS Y EL BIOGAS GENERADO.

2.1. RESIDUOS SOLIDOS

Los residuos sólidos (RS) están definidos como cualquier objeto o material desechado después de un proceso de fabricación, transformación o utilización de bienes de consumo (Corantioquia, 2001). Los residuos sólidos son en ocasiones aprovechados en nuevos procesos en los cuales pueden ser reutilizados para su reconversión, dándole otra utilidad o uso directo.

Los residuos sólidos, tienen su origen en las diferentes actividades del día a día, pero la mayor parte es producida en las ciudades, recibiendo así el nombre de residuos sólidos urbanos, los cuales provienen de actividades domésticas y edificios públicos como colegios, oficinas, la demolición y reparación de edificios (Corantioquia, 2001). Según su fuente y actividad generadora puede otorgarse una clasificación a los residuos sólidos (ICONTEC, 2009) según se muestra a continuación:

2.1.1. Residuos sólidos no peligrosos:

Son producidos en cualquier lugar y en desarrollo de su quehacer por parte del generador (persona o actividad); dicho residuo no presenta peligro para la salud pública o medio ambiente.

2.1.2. Biodegradables:

Restos químicos y naturales que se descomponen con mayor facilidad en el ambiente. Lo componen los vegetales, residuos alimenticios no infectados, papel higiénico, papeles no aptos para reciclaje, jabones y detergentes biodegradables, madera y otros residuos que puedan ser transformados con brevedad en materia orgánica.

2.1.3. Reciclables:

No se descomponen con facilidad en el ambiente, y pueden ser utilizados como materias primas en nuevos procesos de producción. Entre estos residuos se encuentran algunos papeles y plásticos, chatarra, vidrio, telas, radiografías, partes y equipos obsoletos o en desuso, entre otros.

2.1.4. Inertes:

Son aquellos que no se descomponen ni se transforman en nuevas materias primas y su degradación natural requiere periodos largos de tiempo, podemos encontrar entre estos residuos se encuentran el icopor, papeles como el papel carbón y algunos plásticos de difícil degradación.

2.1.5. Ordinarios o comunes:

Son aquellos generados en el desempeño normal de las actividades; estos residuos se generan en oficinas, pasillos, áreas comunes, cafetería, salas de espera, auditorios y en general todos los residuos provenientes del generador en cualquier sitio de permanencia. Algunos ejemplos son: servilletas, envolturas de alimentos, bolsas, papel blanco entre otros.

2.1.6. Residuos peligrosos (RESPEL):

Son aquellos que en función de sus características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, volatilidad y patogenicidad, pueden presentar un riesgo significativo sobre la salud pública o causar efectos adversos al medio ambiente. También se consideran peligrosos los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con residuos o materiales considerados como peligrosos, que aunque no sean residuos, exhiben alguna traza de peligrosidad (Corantioquia, 2001) (REPUBLICA, 2008).

2.2. Conceptos técnicos de rellenos sanitarios

Los residuos sólidos en Colombia, se han manejado bajo los parámetros establecidos por el decreto 838 del 2005, que dicta parámetros de ubicación, diseño y control de los rellenos sanitarios, siendo esta la guía fundamental para su construcción y manejo.

El método de disposición final de los residuos sólidos urbanos lo constituye el relleno sanitario. Es el único admisible, ya que los riesgos son bajos para la salud pública. Además, minimiza la contaminación y otros impactos negativos en el ambiente durante su operación y tampoco impacta considerablemente después de su clausura (Jaramillo, 2003). Esa técnica utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en una área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándolas hasta reducir su volumen.

El relleno sanitario moderno se refiere a una instalación diseñada y operada como una obra de saneamiento básico, que cuenta con elementos de control lo suficientemente seguros y cuyo éxito radica en la adecuada selección del sitio, en su diseño y óptima operación. Diferentes tipos de rellenos se encuentran en la actualidad, cada uno dependiente de la población y cantidad diaria de residuos que es captada en dicho relleno. Los tipos de rellenos más utilizados o conocidos son: mecanizado, semi-mecanizado y manual, los cuales manejan una cantidad aproximada entre 40, 30 y 15 toneladas/día de residuos respectivamente, y se diferencian por las ayudas o asistencia de maquinarias pesadas como retroexcavadoras, remolques y tractores orugas para la compactación de los sólidos al interior de los rellenos sanitarios (Jaramillo, 2003).

Existen variados métodos para el diseño y puesta en marcha de un relleno sanitario. Entre ellos se encuentran: zanja o trinchera, método de área y la combinación de los dos métodos mencionados. Estos se diferencian por la zona en la que se desea implementar el relleno, ya que dependen de la cantidad de residuos a tratar, el área dispuesta para la obra y la topografía del lugar (Corantioquia, 2001). En la Figura 2. muestra el esquema de la combinación de métodos, zanja o trinchera y método de área.

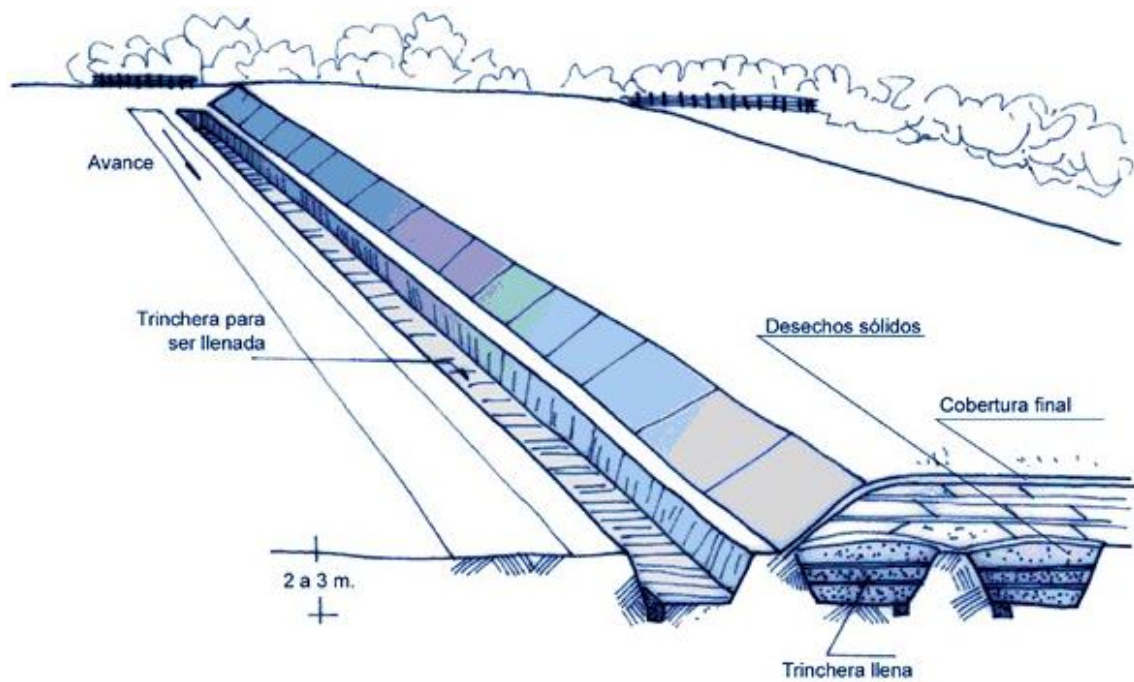


Figura 2 Combinación de métodos para rellenos sanitarios (Jaramillo, 2003)

Uno de los factores más importantes desde el momento de inaugurar el relleno, es la cantidad de gases y lixiviados² que del relleno se generaran por acción de la descomposición de las materias orgánicas que en dicha obra permanecen. Es por esto que el estudio de dichas emisiones y vertimientos toma gran importancia, ya que a lo largo de la vida útil del relleno, se deberá interactuar de forma constante con estos residuos de la operación del sistema. El uso de dichas corrientes de salida del sistema se hace imperativo, la caracterización de dichos flujos debe permitir identificar las oportunidades de aprovechamiento para reconvertirlos de simples residuos a fuentes energéticas considerables, aunque esto demande tratamientos y usos diferentes de los flujos de salida. (Contreras & Suárez Galvez, 2006)

2.3 BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO

El biogás es generado constantemente, es de origen biológico, producto de la actividad de microorganismos vivos. Esta mezcla gaseosa está compuesta fundamentalmente por metano y dióxido de carbono, que le confiere el carácter de gas combustible, con una importante gama de aplicaciones en la actividad humana (calefacción, energía eléctrica, combustible) (Jaramillo, 2003). Sin embargo, el hecho de que el biogás sea un gas combustible y que tenga un considerable efecto como portador energético, no significa que automáticamente todo el biogás que se produzca se pueda aprovechar para este fin, aproximadamente una tercera parte es utilizable, dado de que presentan pérdidas en las técnicas de recolección y el proceso de purificación no tiene el 100% de eficiencia (Hernández, 1996).

² Agua que se ha contaminado por los componentes de los residuos cuando se infiltra a través de un sitio de disposición de residuos. Contiene constituyentes de desecho que son solubles, que no son retenidos por el suelo y que no son degradados química o bioquímicamente (MANAHAM, 2007)

La Tabla 2. (Panesso, 2011) presenta las distribuciones porcentuales típicas de los gases que se encuentran en un relleno sanitario, teniendo en cuenta que la distribución exacta varía según la antigüedad del relleno y las características propias de los residuos. Por esta razón es necesario hacer un estudio periódico de los residuos para saber exactamente cuánto volumen de biogás es aprovechable durante un periodo de tiempo determinado.

Las cantidades de metano generadas en el relleno sanitario tienen un poder calorífico máximo de 52,63 BTU/lb. Comparadas con las características propias de algunos de los combustibles utilizados en actividades diarias se puede ver en la Tabla 3 que es una alternativa viable y eficaz para el remplazo de los combustibles tradicionales. (NUNES, 2012)

Tabla 3 Poder calorífico de diferentes combustibles. Adaptado de (NUNES, 2012)

Combustible	Poder Calorífico Superior³ (a 25°C y 1 atm) Btu/lb	Poder Calorífico Inferior⁴ (a 25°C y 1 atm) Btu/lb
Hidrogeno	134,45	113,67
Metano	52,63	47,40
Propano	47,73	43,22
Gasolina	45,02	42,17
Gasóleo	42,46	40,28
Metanol	18,91	17,14

La formación del biogás se presenta por el proceso de descomposición de los residuos orgánicos, acto que ocurre en diferentes fases y que se ve afectada por las condiciones del medio, principalmente: la cantidad de oxígeno, la temperatura del relleno, la humedad relativa del relleno,. Este proceso se puede identificar en cinco fases (Camargo, 2009):

Fase I: Aeróbica, inicia al momento de la disposición de los residuos sólidos en el relleno con las sustancias más fáciles de degradar en presencia de oxígeno; en esta fase se genera principalmente dióxido de carbono y agua registrando temperaturas entre 35 y 40 °C.

³ Poder calorífico superior: valor máximo alcanzado por el poder calorífico para cada combustible en condiciones normales

⁴ Poder calorífico inferior: valor mínimo alcanzado por el poder calorífico para cada combustible en condiciones normales

Fase II: Aeróbica con el desarrollo de condiciones anaeróbicas, en la que ocurre el proceso de fermentación, actúan los organismos facultativos con la producción de ácidos orgánicos y la reducción significativa del pH, condiciones propicias para la liberación de metales en el agua y la generación de dióxido de carbono (CO_2).

Fase III: Anaeróbica, se termina el oxígeno de las dos primeras fases y empiezan a actuar los organismos generadores de metano, que en condiciones adecuadas reducen la producción de dióxido de carbono y aumentan la generación de gas.

Fase IV: Metanogénica estable, se estabilizan las bacterias que producen metano y se registra la más alta producción de metano oscilando entre 40-60% de metano (CH_4) en volumen.

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

La composición del biogás generado en la fermentación anaerobia se puede visualizar en la Figura 3 (Aguilar, 2007).

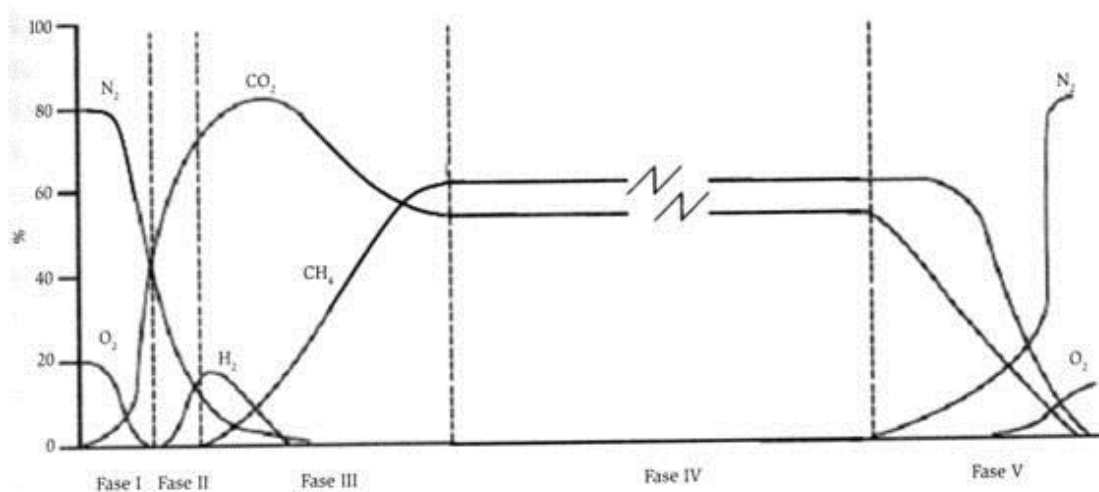


Figura 3 Fases de descomposición reflejadas en la evolución idealizada de la composición del biogás tomada de (Aguilar, 2007)

La calidad del biogás generado en los rellenos sanitarios se puede ver afectado por diferentes fenómenos, los cuales pueden ser de origen antrópico o natural, originando complicaciones en el manejo de la recolección de gas, además de producir nuevas mezclas que modifican la composición normal que se produce en el relleno, lo cual se ilustra en la Figura 4 (Rivera, 2012)

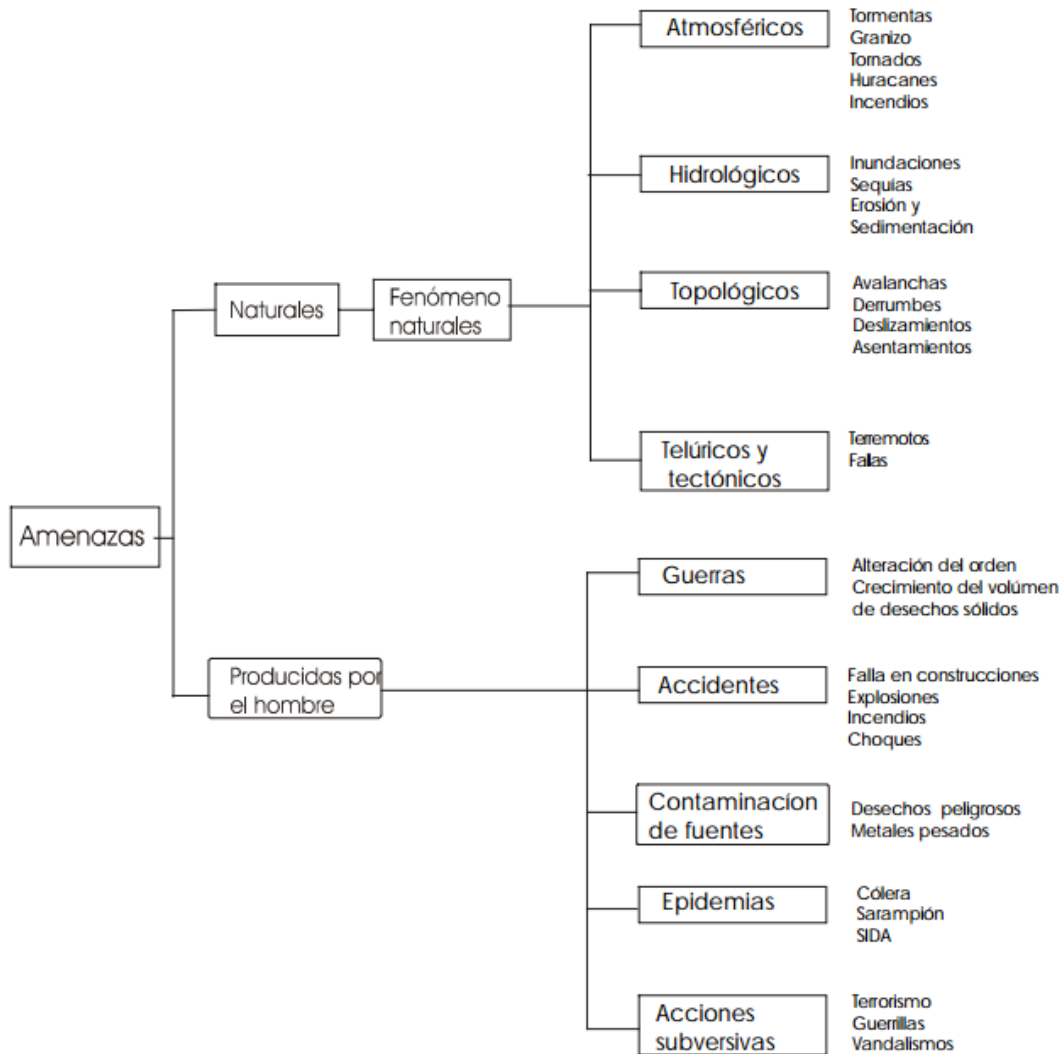


Figura 4 Clasificación de amenazas según su origen. Tomada de (Rivera, 2012)

Métodos y modelos han sido desarrollados para proyectar el potencial de generación del biogás en rellenos sanitarios (Panesso, 2011). La aplicación de estos ha permitido determinar la producción de metano, con lo que puede calcularse un potencial de aprovechamiento del biogás producido en sitios de disposición final. Sin embargo, como el biogás puede contener algunas impurezas y elementos traza, debe ser purificado antes de su utilización, permitiendo obtener gas con una concentración de metano superior al 95%, a estos valores se les puede hacer seguimiento mediante un análisis de gases Transpector XPR3, el cual permite en tiempo real conocer los niveles de contaminación, de desgasificación, la pureza de los gases (Inficon, 2015) y así aumentar su poder calorífico, teniendo valores típicos de 7754,86 hasta 23884,99 Btu/lb (Reporte Sobre Biomasa, 2012).

Las tecnologías tradicionales para la purificación de biogás están basadas fundamentalmente en el empleo de métodos fisicoquímicos siendo los más usados: adsorción, absorción con compuestos de hierro, absorción con compuestos orgánicos, absorción con agua, además de usar también filtros por membrana y métodos biológicos utilizando microorganismos (Varnero, 2012).

La Figura 5 muestra el ciclo del biogás para su conversión o utilización como fuente de energía eléctrica.



Figura 5 Esquema de producción de energía eléctrica a base de biogás proveniente de relleno sanitario tomada de (Reporte Sobre Biomasa, 2012).

2.4 Algunos casos exitosos de rellenos sanitarios en Colombia que utilizan su biogás generado

Los rellenos sanitarios del país han sido manejados buscando siempre que la disposición final de los residuos sólidos se haga de la mejor manera, garantizando que no se presenten afectaciones al ambiente, además se están convirtiendo los botaderos a cielo abierto que tienen afectaciones considerables al ambiente por rellenos sanitarios que cumplan las características requeridas para el manejo adecuado de los residuos sólidos.

Tabla 4 Rellenos sanitarios a nivel nacional con su vida útil y capacidad disponible (Publicos, 2010)

NOMBRE DEL RELLENO SANITARIO REGIONAL	VIDA UTIL (AÑOS)	CAPACIDAD DISPONIBLE (m ³)
Bioagricola del llano S.A	27	5320
Centro Industrial del Sur Cis	246	5160234
El oasis	20	2145531
El Ojito	12	576000
Guayabal	64	6500000
Las Hoyeras	17	80000
Las Margaritas	25	221000
Macondo	41	81773
Parque Ambiental Loma de los Cocos	15	5568357
Parque Ambiental Los Pocitos	29	19862846
Parque Ambiental Villa Karina	NR	270000
Parque ecológico Praderas del Magdalena	11	669612
Relleno Caucasia	2	38000
Relleno Sanitario Guayabal	29	18559802
Relleno Sanitario Aguachica	7	4786
Relleno Sanitario Andalucía	9	190000
Relleno Sanitario Antanas	17	3770342
Relleno Sanitario Buenavista	8	NR
Relleno Sanitario Cristo Rey	3	4050
Relleno Sanitario de Piragua	8	204420
Relleno Sanitario de Sabanalarga	2	900
Relleno Sanitario El Criminal	1	NR
Relleno Sanitario El Cucharo	5	492000
Relleno Sanitario Helechales	20	NR
Relleno Sanitario La Esmeralda	20	NR
Relleno Sanitario La Guaratara	25	8000
Relleno Sanitario La Vega	96	NR
Relleno Sanitario Loma Grande	15	803407
Relleno Sanitario Los Ángeles	43	NR
Relleno Sanitario Miraflores	15	NR
Relleno Sanitario Regional de Aracataca	28	NR
Relleno Sanitario Regional Terrazas Del Porvenir	62	38280
Relleno Sanitario Vera	8	98280
Relleno Sanitario Nuevo Mondoñedo	27	7698592
San Juan Del Barro	27	961085

2.4.1. Relleno Sanitario Doña Juana (Bogotá)

En la ciudad de Bogotá (Colombia), se encuentra una de las plantas de captación de gases de efecto invernadero más grandes del mundo, la cual se encarga del tratamiento de los residuos sólidos de la ciudad. El relleno de Doña Juana es pionero en el aprovechamiento del biogás para la generación de energía limpia. Este proyecto ambiental se encarga de aprovechar los gases generadores del calentamiento global, ayudando así a la reducción de emisiones contaminantes y de efecto invernadero. El proceso se basa en un sistema de cuatro kilómetros de tubería que se encuentra debajo de las montañas de basuras dispuestas en el relleno, que captan los gases que se producen y los separan de los lixiviados. Mientras los gases que emiten las basuras se conducen a través de las tuberías a la planta (que cuenta con tres chimeneas procesadoras de gases), los lixiviados se conducen a una piscina que los trata antes de ser vertidos en las aguas del río Bogotá (Martínez, 2011).

Los residuos sólidos de los hogares bogotanos, producen unos 12.000 metros cúbicos de gases contaminantes por día en condiciones normales, de los cuales el 50% en volumen es metano, parte del cual se usa actualmente para la generación de 350 kW utilizando el mecanismo presentado en la Figura 5 y forma parte de un proyecto de generación de energía eléctrica para la industria ladrillera de la zona de influencia del relleno.

2.4.2. Relleno Sanitario el Tejar (Turbo; Antioquia).

El Relleno Sanitario El Tejar, ubicado en Apartado, Antioquia, Colombia, tiene un informe de prefactibilidad que fue elaborado en base a la información proveída por Futura Aseo E. S. P. El relleno sanitario inicio operaciones en entre 1994 y 2002 como botadero a cielo abierto, luego una porción de los residuos fueron removidos y llevados al vaso actual, los cuales componen gran parte de las celdas clausuradas. Actualmente cuenta con cerca de 445.346 toneladas de residuos dispuestos, y está proyectada su clausura para el 3 de abril de 2020 con una disposición final total de 1.194.860 toneladas. Dadas las proyecciones de biogás, la evaluación preliminar indica que El Tejar podría tener varias alternativas o combinación de alternativas para el aprovechamiento del biogás tales como: generación de energía eléctrica y/o evaporación de lixiviados (CNPML, 2008)

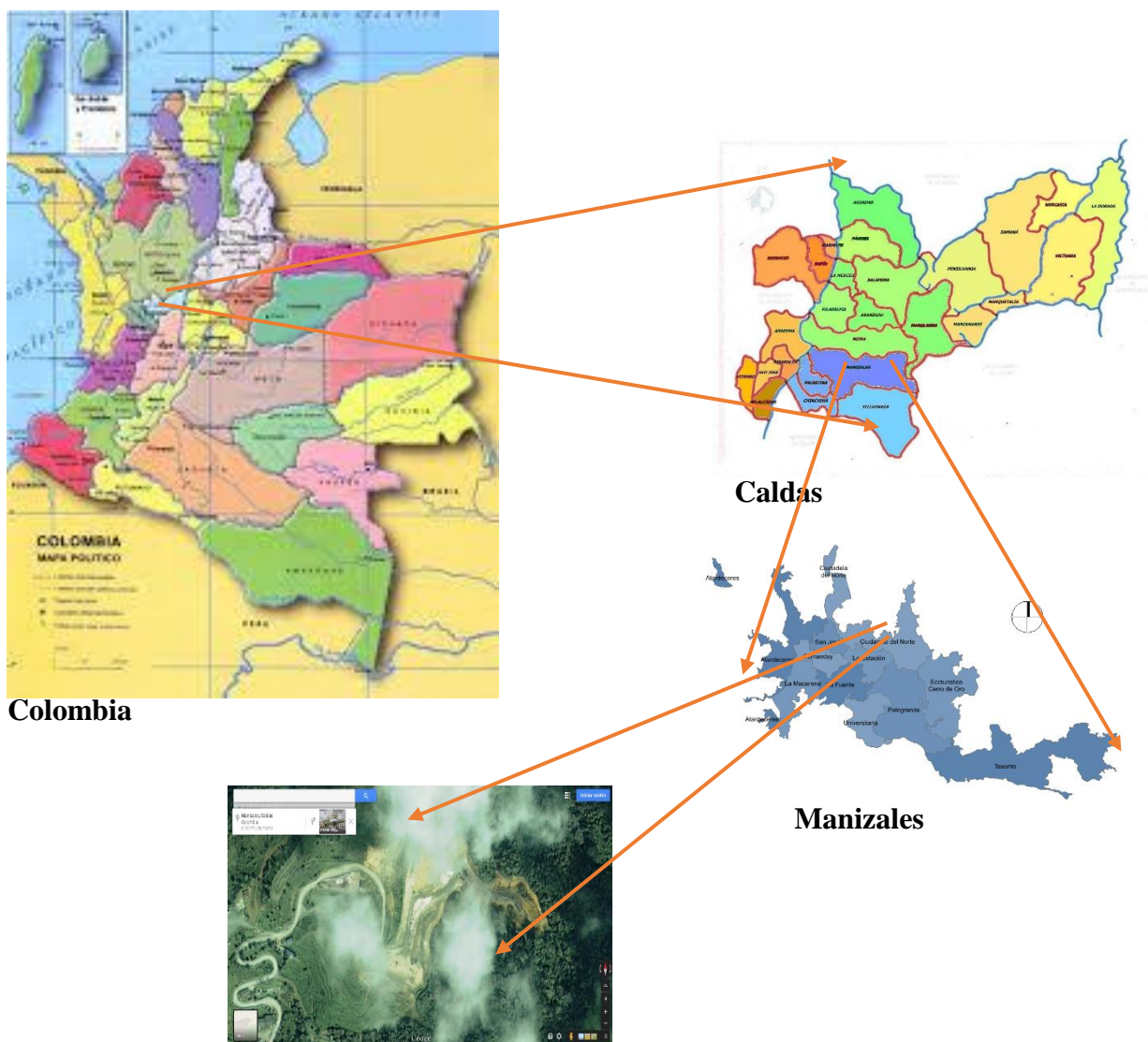
2.5 Caso de Estudio; Relleno la Esmeralda (Manizales, Caldas).

2.5.1. Macro-localización:

El relleno sanitario se encuentra ubicado en Colombia, en el departamento de Caldas, dentro de la ciudad de Manizales.

2.5.2. Micro-localización:

El relleno sanitario La Esmeralda es un relleno de residuos sólidos municipales localizado en el kilómetro 2 de la carretera Manizales-Neira. Con coordenadas: longitud $-75^{\circ}30'25.68''$ y latitud $5^{\circ}4'52.74''$. El lugar cuenta con 55 hectáreas (ha), de las cuales 6.4 ha están dedicadas a la disposición de residuos sólidos. El clima de esta área es considerado semitropical con una precipitación de aproximadamente 2.000 mm/año. (EMAS, 2014)



Colombia

Caldas

Manizales

Relleño sanitario La Esmeralda

Figura 6 Localización del relleno sanitario La Esmeralda

2.5.3. Características de la zona:

2.5.3.1 Clima:

- Manizales tiene un clima templado, con una temperatura promedio de 16°C, en la ciudad se encuentran 8 microclimas; así que el clima puede variar de un área a la siguiente. Su variabilidad climática está compuesta por temporadas secas y temporadas de lluvias y estas producen una precipitación anual de 1491 mm. Su altitud es de 2153 m sobre el nivel del mar.

2.5.3.2 Geología:

Manizales cuenta con una gran variedad de unidades geológicas de diferentes edades y orígenes (POT, 2014):

- Complejo Cajamarca.
- Intrusivo Gnéisico Sin tectónico.
- Complejo Quebradagrande.
- Gabros de Chinchiná-Santa Rosa.
- Complejo Arquía.
- Stock de Manizales.
- Secuencia Volcano-Sedimentaria Tres Puertas.
- Secuencia sedimentaria clástica.
- Secuencia Sedimentaria Volcaniclástica.
- Unidad de Flujos Volcaniclásticos.
- Lavas indiferenciadas.
- Ignimbrita del Guacaica.
- Depósitos de Caída Piroclástica.
- Depósitos recientes.

Las principales ocupaciones que se le dan al suelo de la ciudad de Manizales son: las construcciones urbanas, la ganadería y la agricultura, la ciudad de Manizales tiene sectores destinados para la conservación de parques nacionales y reservas naturales.

2.5.3.3. Tamaño del proyecto:

El proyecto se desarrollara en las instalaciones del GRUPO SALA sede de EMAS (Empresas Metropolitana de Aseo) Manizales, ubicadas en el Km 2 vía Neira, que cuenta con un área de 55 hectáreas y recibe 400 toneladas de basura por día, tiene una vida útil hasta el 2040, restándole algo más de 20 años de servicio, El 78% de las basuras que recibe son de Manizales y el 22% restante proviene de municipios de la región. (Tiempo, 2007)

Capítulo 3: ESTADO DEL ARTE EN TECNOLOGIAS DE APROVECHAMIENTO DE BIOGAS PARA RELLENOS SANITARIOS

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

- Métodos de estimación de la generación de biogás
- Métodos de colección de biogás
- Tratamiento y purificación de metano
- Métodos de caracterización que permitan identificar en tiempo real el grado de purificación del metano.
- Técnicas y procesos de aprovechamiento para el metano

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

3.1 métodos de estimación de la generación de biogás en rellenos sanitarios.

3.1.1 modelo colombiano de biogás

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

El MCB proporciona valores pre calculados para el índice de generación de metano (k) y la generación potencial de metano (L_0), los cuales fueron desarrollados usando datos específicos del clima, datos de la caracterización de residuos y datos específicos sobre el biogás de sitios representativos en Colombia. Estos datos permiten que los usuarios puedan generar índices de generación y recuperación de biogás para rellenos sanitarios localizados en diversas regiones de Colombia (EPA, 2014).

El método colombiano es una hoja de Excel, a la cual cualquier usuario puede tener acceso. El MCB está basado en la ecuación de degradación de primer grado la cual fue tomada de US EPA (Modelo LandGEM versión 3.02) en el 2005 (Stegé & Dávila, 2009). El modelo colombiano de estimación de producción de biogás tiene la gran ventaja de ser un sistema de fácil acceso, ya que este se puede descargar de manera gratuita en la página de la agencia de protección ambiental de los estados unidos, (EPA, United States Environmental Protection Agency), que está basada en la ecuación 1 y es una hoja de Excel que viene con un manual de usuario en PDF fácil de interpretar para el uso adecuado del sistema, esto se encuentra en el siguiente link: <http://www.epa.gov/lmop/international/colombia.html>.

$$Q_{\text{ifg}} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=1}^1 2kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) (e^{-kt_{ij}}) (\text{MCF})(F) \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

Q_{LFG} = Flujo de biogás máximo esperado ($\text{m}^3/\text{año}$)

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 ($1/\text{año}$)

L_0 = Generación potencial de metano (m^3/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

Dentro del manual del usuario y en la hoja de Excel se muestran distintos ejemplos sobre la aplicación de este software y los valores que se deben incluir dentro de cada uno de los logaritmos para así calcular el grado de generación de biogás de un relleno sanitario.

3.1.2. Modelo estadístico

Una forma de realizar una estimación de producción de biogás generado en el relleno sanitario es el promedio estadístico, ya que nos permite evaluar el valor medio de una base de datos de mediciones de caudales obtenidos en un periodo de tiempo determinado, y así tomar decisiones teóricas sobre la ocurrencia de un fenómeno que puede tener muchas variables que influyan en el resultado final (Morales, 2012).

Entonces siendo $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$ el número de valores muestrales, se define el promedio de las observaciones como:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ecuación 2 Modelo estadístico}$$

Hay que tener en cuenta que para utilizar un método estadístico tan sencillo como este, se debe contar con una base de datos reales confiables tomados en campo, que tenga los datos de los últimos cuatro años de producción de biogás con caudales y composiciones, de tal forma que se pueda realizar un análisis de los mismos para establecer valores promedio de generación, según las zonas del relleno en donde se hayan realizado los respectivos muestreos.

3.2. Método de colección del biogás

3.2.1 chimeneas de extracción y quemado

La mejor forma de coleccionar el biogás de un relleno sanitario es el uso de chimeneas utilizadas para su extracción y combustión debido a que normalmente este sistema se utiliza para recoger los gases atrapados en las celdas y llevarlos a la atmosfera. (Monreal, 1999).

Las chimeneas de colección del biogás hacen uso de pozos para extracción empleando tubos de PVC perforados de forma tal que permitan el flujo ascendente del biogás. No obstante, los cambios en la masa del relleno sanitario y la rigidez del PVC, provocan rupturas en las tuberías que, por lo general, no presentan alto grado de resistencia, lo que hace que en cortos periodos de tiempo se deterioren.

Estudios realizados en el relleno sanitario El Errazuriz y La Feria, llevados a cabo en Santiago de Chile, mostraron que la utilización de tuberías de acero, aunque resistentes, no combaten de forma efectiva la corrosión, así cuentan con el reforzamiento y cubrimiento catódico (el cual resultaba más costoso), además no se garantizaba su óptimo funcionamiento por largos periodos de tiempo, ya que la saturación de residuos y creación de biopelículas obstruyen las ranuras de evacuación del biogás haciendo inviable la utilización de dicho método (Monreal, 1999).

La adaptación de las chimeneas como mecanismo de colección se hace relevante ya que esta alternativa permite acceder a toda la sección vertical del relleno sanitario, lo cual favorece una mayor captación del biogás generado y al estar diseñada para la evacuación del gas presente en el relleno, tiene la capacidad de evacuar de forma controlada, la mayor parte del gas que se genere a lo largo del tiempo en el interior del relleno, lo cual hará posible su purificación y aprovechamiento óptimo (Monreal, 1999). Ilustraciones de una chimenea de extracción se presentan en la Figura 7.



Figura 7 Chimeneas de extracción (CNPML, 2008)

3.2.2 campanas extractoras

La extracción del biogás en un relleno sanitario se hace de forma controlada con la utilización de chimeneas para hacer posible su quemado en los casos que no se cuenta con un sistema de aprovechamiento del biogás. Un método adecuado para la colección del biogás generado en un relleno sanitario es el cubrimiento de las chimeneas con un sistema de campanas de extracción, las cuales capturan el biogás que generalmente se quemaría en las chimeneas y lo transportan hasta el punto de purificación para posterior aprovechamiento (So, Valdes Salas, Schorr Wiener, & Carrillo Beltran , 2013).

Las campanas de extracción se instalan formando una red que recolecta y transporta el biogás generado en el interior del relleno sanitario hacia los cuartos de purificación y posterior aprovechamiento. Las campanas de extracción deben garantizar que no se presenten fugas de gases, ni la entrada de sustancias que puedan desencadenar inconvenientes en las redes de transporte y purificación. Las campanas se anclan en cada una de las chimeneas del relleno sanitario, garantizando la colección total del biogás y se instalan por medio de perforaciones en la capa superior del recubrimiento del relleno sanitario.

Las características propias del biogás proveniente de un relleno sanitario, obliga a los sistemas de colección a contar con una capa de protección ante la corrosión, producida por el sulfuro de hidrogeno, corrosión microbiónológica y corrosión asistida por efectos mecánicos (So, Valdes Salas, Schorr Wiener, & Carrillo Beltran , 2013), al contacto con el biogás, lo cual demanda para su implementación una protección y revestimiento catódico, evitando así, daños en los sistemas de captación y transporte del fluido a tratar.

3.3 Métodos de purificación de biogás.

3.3.1. Purificación por viruta de hierro

La purificación por viruta de hierro se utiliza para limpiar el biogás del sulfuro de hidrogeno (H_2S), ya que este es un compuesto que siempre está presente, aunque sus concentraciones pueden variar dependiendo de la basura dispuesta. La cantidad de sulfatos inorgánicos depende de los residuos con alto contenido en proteínas con aminoácidos que estén basados en azufre (DESOTEC, 2015)

El método consiste en usar una esponja de hierro, que se fabrica generalmente con viruta de hierro, en algunas ocasiones se puede hacer con astillas de madera que se encuentren impregnadas con óxido de hierro hidratado; aunque el método elimina el H_2S se producen sulfuros de hierro mediante la siguiente ecuación 3: (DESOTEC, 2015)



La esponja de hierro gastada en el sistema de purificación se debe retirar, al momento de hacer este procedimiento el material queda expuesto a las condiciones ambientales de la zona, ocasionando la reoxidación del material dando lugar al óxido de hierro y a azufre en estado puro mediante la siguiente ecuación. (DESOTEC, 2015)



Esta última reacción es exotérmica por lo cual se deben tener algunas medidas especiales para prevenir combustiones y así minimizar los riesgos para los encargados de la disposición de este residuo final; además con un buen método de recolección del azufre puro, este puede ser reutilizado nuevamente a un sistema productivo o sistema comercial (DESOTEC, 2015).

3.3.2. Biofiltros de lecho fijo

Este tipo de tratamiento consiste en un reactor, donde el flujo de gas debe atravesar una recámara que contiene un material de soporte fijo y húmedo donde se desarrolla la actividad microbológica que crea una biopelícula, la cual cumple la función de transformar los contaminantes en CO_2 y en H_2O (Varnero, Caru, & gallellios, 2011).

Los filtros constan de un material filtrante que puede ser sintético u orgánico; algunos de los materiales filtrantes que pueden utilizarse son rocas porosas, tierra de diatomeas, perlita, tierra, trozos de maderas, así como diferentes tipos de compostas o residuos orgánicos. Los biofiltros se construyen con una altura de no más de 1,2 m, con el objetivo de limitar el aumento de presión a través del biofiltro a 10 cm de agua.

La eficiencia del sistema de biofiltros depende de las concentraciones de los contaminantes, para lo cual se debe tener en cuenta el coeficiente de Henry⁵ y la solubilidad en el agua del biogás; las remociones que se han encontrado de H_2S oscilan entre los 90 y 100%, para los compuestos orgánicos volátiles las remociones normalmente oscilan entre 20 y 90% (Varnero, Caru, & gallellios, 2011).

3.3.3. Método de filtración por membrana

El sistema tiene como finalidad purificar una corriente gaseosa, dirigiendo el flujo de forma ascendente por una columna, en el interior de la cual se encuentra una membrana que es selectiva al paso de algunos de los componentes de la mezcla. La separación ocurre debido a la fuerza motriz generada por la diferencia de presión a ambos lados de la membrana, aunque el factor determinante de la separación es la permeabilidad de los componentes del gas al paso por la membrana.

El paso por una membrana polimérica involucra varios pasos: adsorción del gas en una interfase de la membrana, Solución del gas en la membrana, Difusión del gas a través de la membrana, Desprendimiento del gas de la solución por la interfaz opuesta, desorción del gas en la última interfase. (Varnero, Caru, & gallellios, 2011)

Este es un método que representa costos de inversión altos por la capacidad tecnológica necesaria y los sistemas operativos necesarios para su óptimo funcionamiento, por ello no es recomendable aplicarlo a pequeña escala, aunque para grandes producciones se pueden conseguir resultados en remoción de hasta 90% de CO_2 y separación de CH_4

⁵ Ley de Henry: La disolución gaseosa en líquidos es regida por una ley conocida como la Ley de Henry. Esa ley dice que la solubilidad de un gas en agua depende de la presión parcial en esa ley varía con el gas y la temperatura, y revive el nombre de constante de Henry. (Gonzales , 2011)

3.4. Métodos de aprovechamiento del biogás

El aprovechamiento del biogás generado en los rellenos sanitarios tiene relación directa con la utilización de otras energías alternativas con características similares como el gas natural. El gas natural es una mezcla de compuestos de hidrógeno y carbono y pequeñas cantidades de compuestos no hidrocarburos en fase gaseosa o en solución con el petróleo crudo que hay en los yacimientos (Petroleo, 2005). El poder calorífico del gas natural y del metano es comparable, lo que permite hacer comparaciones y adecuaciones a los sistemas de aprovechamiento que actualmente usan gas natural.

3.4.1 Aprovechamiento del gas metano para calefacción

La calefacción de lugares amplios o con requerimientos de temperaturas fijas como invernaderos, requieren una demanda alta de combustible para su constante mantenimiento, lo cual representa un costo significativo para los intereses de quien quiera mantener las condiciones climáticas óptimas en los sistemas que son perjudicados en épocas de invierno o climas adversos.

La calefacción a partir de gas metano, es una opción eficiente para el mantenimiento de las temperaturas requeridas en cualquier ambiente, representando un beneficio al medio ambiente, al utilizar un gas de importancia ambiental.

3.4.2 aprovechamiento del gas metano como combustible para automóviles

Estudiando las alternativas de aprovechamiento, y viendo las necesidades actuales de usar combustibles fósiles para suplir la necesidad de transporte, surge la idea de utilizar el gas metano como fuente energética que reemplace el actual uso de combustibles a base de petróleo, tratando así de mitigar la escasez futura en las sociedades actuales de seguir con el mismo modelo de consumo de combustibles a base de petróleo.

La idea de un combustible ecológico proveniente de los residuos sólidos dispuestos en un relleno sanitario, busca de una forma eficiente reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, además de hacer uso de su potencial calorífico para generar energía capaz de abastecer la demanda de un vehículo promedio cumpliendo con unas condiciones de rendimiento comparables a las obtenidas por un auto impulsado por combustible fósil.

Impulsar un vehículo a base de gas metano es posible teniendo una fuente que provea de gas metano constantemente al sistema que lo purificará y lo comprimirá, lo cual, le permitirá cumplir con los requerimientos de un combustible de rendimiento y potencial calorífico aceptable para competir con el rendimiento promedio del combustible fósil.

Grandes compañías automovilísticas le han apuntado al desarrollo del metano como fuente de combustible para sus automóviles de vanguardia. Marcas como Fiat, Renault, Volkswagen han diseñado modelos con motores bi-fuel que permite al coche ser impulsado por gas metano comprimido para su funcionamiento, haciendo uso también de gasolina, como forma alterna de combustible, en caso de terminarse la reserva de gas (GISBERT, 2010).

A pesar de que los avances en esta tecnología, solo se ha llevado a cabo en países desarrollados, el uso del metano como fuente combustible para automóviles es muy relevante, ya que la generación del gas metano es favorable económicamente en comparación a las demás fuentes de combustible.

3.4.3. Quemador de gas natural para el secado de lodos

La empresa Baltur S.p.A., activa desde más de 60 años, ha incursionado en la innovación de los sistemas de calentamientos convencionales, esta industria italiana ha suministrado un catálogo de productos especializados en el aprovechamiento del potencial calorífico y térmico de diferentes materiales, tales como: gas natural, gasóleo, fuel y mixtos. (S.p.A., 2000)

El quemador Sparkgas es un motor que utiliza ignición eléctrica y un flujo de gas natural, gas propano o un sistema combinado para generar una corriente de aire caliente que puede ser dirigida hacia diferentes tipos de materiales para elevar su temperatura.

Ya que el aire se comporta como un fluido caliente, se puede dirigir por una tubería, cuyo material sea de una alta conductividad calorífica, como medio de transferencia de calor para así modificar las propiedades físicas de un sólido, un líquido o un gas.

Del almacenamiento de residuos sólidos en los rellenos sanitarios se generan por escurrimiento lixiviado, a los cuales se le debe realizar un tratamiento de descontaminación antes de verterlos a su destino final (ríos), de estos tratamientos se produce un excedente de lodos y a estos se necesitan pasar a un tratamiento posterior.

Para el secado de lodos se debe asegurar el contacto de la sustancia con la irradiación directa de la tubería, cuyo material asegure la mayor transferencia de calor (la temperatura mínima del vapor debe ser de 100°C) (Separation , 2015), cumpliendo un papel similar al de un horno, que calienta los lodos hasta el punto de cambiar las propiedades físicas del agua transformándola en vapor, dejando únicamente los sólidos secos y listos para su disposición.

3.4.4. Combustible para producción de energía eléctrica

Uno de los principales usos para el aprovechamiento de gas metano es la generación de energía eléctrica. Se reconoció el potencial calorífico que presentan los gases provenientes de los rellenos sanitarios, los cuales después de pasar por procesos de purificación anteriormente mencionados, adquieren condiciones óptimas para surtir un sistema generador de energía que pueda cumplir las demandas de energía de las comunidades locales cercanas al relleno sanitario intervenido (Reporte Sobre Biomasa, 2012).

La generación de energía es posible, gracias a un sistema de motores generadores de energía, los cuales son impulsados por motores de combustión interna que utilizan el gas metano como combustible para su funcionamiento, como se puede apreciar en la Figura 5.

Dependiendo de la cantidad requerida de energía y la capacidad de entrada de gas metano, se instalan motores y generadores en serie, para mantener un rendimiento óptimo y tener un suministro constante tanto de energía como de gas metano en condiciones de purificación adecuadas para su combustión en los motores, garantizando así la generación de la energía eléctrica.

La energía eléctrica generada a partir del uso de gas metano puede ser vinculada a las redes de energía convencionales, lo que facilita hacer un uso comercial de la energía generada.

Capítulo 4. Propuesta de aprovechamiento de biogás para el relleno la esmeralda

Las alternativas para cada uno de los procesos necesarios desde la estimación hasta el aprovechamiento final del gas metano son muy variadas, tal como se ilustró en el capítulo anterior.

Los procesos para llevar a cabo el aprovechamiento deben de ser estudiados y seleccionados según las características propias de cada caso de estudio. Debido a lo anterior, se hace necesario hacer un estudio profundizando en las propiedades que se tienen en cada relleno sanitario, lo que permitiría la selección adecuada de las alternativas óptimas para la estimación, captación, purificación y aprovechamiento del biogás generado en cada relleno sanitario que se desee intervenir.

Para las características del relleno sanitario La Esmeralda mencionadas en el capítulo uno y atendiendo las necesidades presentes en las instalaciones del relleno sanitario como lo son el secado de lodos generados en el relleno se profundiza en las siguientes alternativas para el proceso integral de aprovechamiento del gas metano.

1. Purificación: separación por membranas
2. Aprovechamiento: secado de lodos

4.1. Profundización del método de filtración por membrana.

La purificación con membrana es un método de pretratamiento clave para aumentar la pureza del metano. Además de esto es uno de los sistemas de los cuales cuentan con soporte y empresas que se especializan en procesos de separación industrial.

Algunas empresas nacionales proveedoras y prestadoras del servicio o soporte son:

- Quimiservi
- Best
- Actiquim
- Casa Franco
- Omb química

Algunas empresas a nivel latinoamericano son:

- Conosur y Cia
- Polímero especiales
- Barnices y resinas BYR
- Ingprosin
- Polymat
- Cenmex
- Productos químicos Pholser

Porogen Corporation empresa líder estadounidense en membranas poliméricas, para la purificación de biogás proveniente de los rellenos sanitarios brinda una membrana de fibra hueca compuesta de poli-éter-cetona, este mecanismo está diseñado para eliminar gases ácidos y vapores de agua a partir de gas natural bruto o biogás, para así lograr mejorar la calidad del metano aumentando su pureza. (Molino, y otros, 2012)

Porogen Corporation se realizan sus membranas con VITREX PEEK que es un material de una combinación de alta resistencia térmica y química. La membrana puede ajustarse en tamaño y composición química para satisfacer las necesidades del sistema en el que es instalado, la membrana está diseñada para operar a temperaturas de hasta 200°C sin verse afectada sus características químicas. El sistema consiste en un tubo de doble membrana, tal cual se muestra en la Figura 4.1.1. (Molino, y otros, 2012)



Figura 8 Esquema de membrana para biogás PEEK. (Molino, y otros, 2012)

Este método se selecciona debido a que su información detallada del proceso se encuentra de manera simple en artículos publicados, su implementación no es excluyente con ningún tipo de biogás generado en los rellenos sanitarios, ya que su tecnología es reprogramable para las necesidades del sistema, sus costos de implementación no se consideran altos y brinda un gran porcentaje de purificación, necesario para el funcionamiento óptimo de la cadena de aprovechamiento de metano.

4.1.1 Diseño básico de un separador por membrana para la purificación de biogás

Las entradas y salidas del flujo circundante por un módulo de membranas se muestran con mayor claridad en la Figura 9, donde el flujo purificado se representa como R y el remanente se denomina como permeado P y F es el flujo de biogás natural.

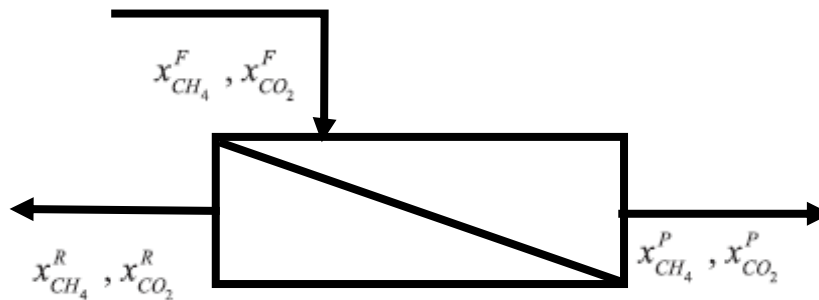


Figura 9 Esquema del módulo de membrana tomada de (Molino, y otros, 2012)

Con los flujos R Y P se puede calcular la relación de la pureza de biogás a diferentes condiciones de proceso, expresándolas como fracción molar de metano. Igualmente se puede calcular el rendimiento en base de hidrocarburos Y, con respecto a la composición de metano a la entrada F y a la salida R, como se puede ver en la ecuación 5.

Ecuación 5 Rendimiento en base de hidrocarburos. (Molino, y otros, 2012)

$$Y = \frac{R \cdot x_{CH_4}^R}{F \cdot x_{CH_4}^F}$$

Al variar el contenido de metano en el biogás de entrada, se puede evaluar el porcentaje de purificación del metano de salida en el flujo R con la ecuación 6.

Ecuación 6 Porcentaje de purificación de metano (Molino, y otros, 2012)

$$\Theta = \frac{x_{CH_4}^R - x_{CH_4}^F}{x_{CH_4}^F} \cdot 100$$

Las variables que se deben variar para hacer un cálculo estimado de la productividad del módulo de membranas son:

- La composición del gas de entrada (de 40% a 70% en metano; con intervalos de 10%).
- La presión de alimentación (de 5 a 30 bar; con intervalos 5 bar)
- La velocidad de flujo de masa (de 5 a 80 kg / h)

4.1.2. Resultados de la simulación de purificación con doble etapa y configuración

4.1.2.1 Efecto de la presión de alimentación

En la figura 10 se reportan los resultados de simulación y los porcentajes de remoción (BP) con una entrada de alimentación de metano de 50% (mol/mol), con distintas velocidades de flujo y diferentes presiones de entrada en el flujo de alimentación.

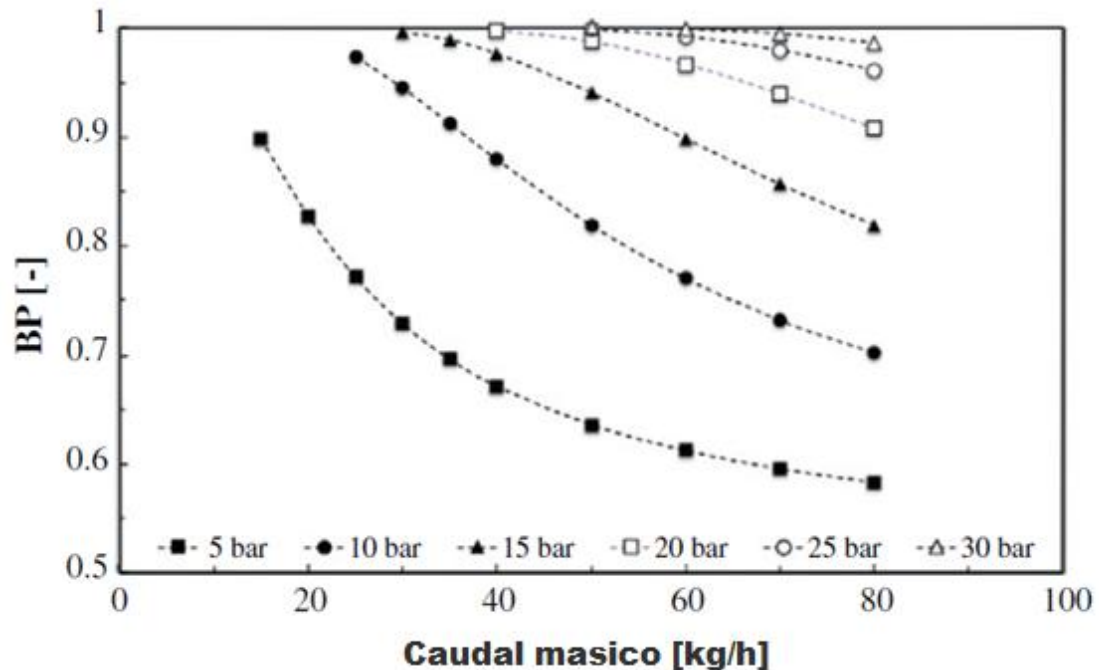


Figura 10 El metano en la corriente enriquecida (R) para una alimentación 50% de CH₄. (Molino, y otros, 2012)

Las simulaciones muestran que se presentan caídas en la eficiencia cuando se presenta un aumento en la tasa de flujo de entrada de biogás a la membrana, este efecto es menos evidente cuando se presentan presiones mayores a 20 bar, no obstante la recuperación de metano se mejora con presiones de entrada bajas con respecto a las más altas (véase la Figura 11) (Molino, y otros, 2012)

Este efecto puede explicarse si la cantidad de permeado P y flujo purificado R son considerados: a aumentar la presión, la velocidad del flujo de permeado se incrementa y la cantidad de retenido se disminuye, por lo tanto, a pesar del aumento en la purificación, debido a la reducción de la velocidad de entrada, el rendimiento del metano es mejor que en condiciones de presión alta.

4.1.2.2. Efecto de la composición del flujo de alimentación

En la Figura 12. Se presentan los valores de las fracciones molares de retenido para diferentes composiciones de la corriente de entrada y diferentes presiones del gas, manteniendo siempre una alimentación fija de 40 kg/h.

Las figuras muestran un aumento en la fracción de hidrocarburos cuando se aumenta la presión del proceso. (Molino, y otros, 2012)

En condiciones operacionales de presión baja, el metano contenido en la alimentación es menor y menor será la fracción de hidrocarburos del biogás purificado. Por el contrario, al aumentar la presión del proceso, la fase de enriquecimiento se ve perjudicada en altas presiones, efecto que se puede ver en la Figura 13. para presiones mayores a 20 bar.

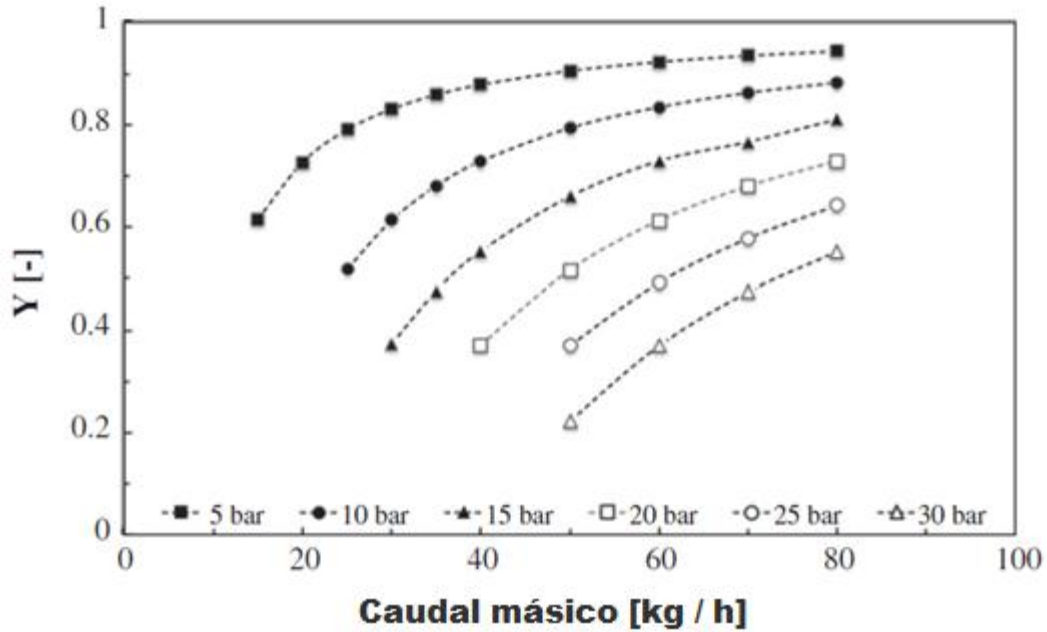


Figura 11 Rendimiento del metano para alimentación de 50 % de CH_4 tomada de (Molino, y otros, 2012)

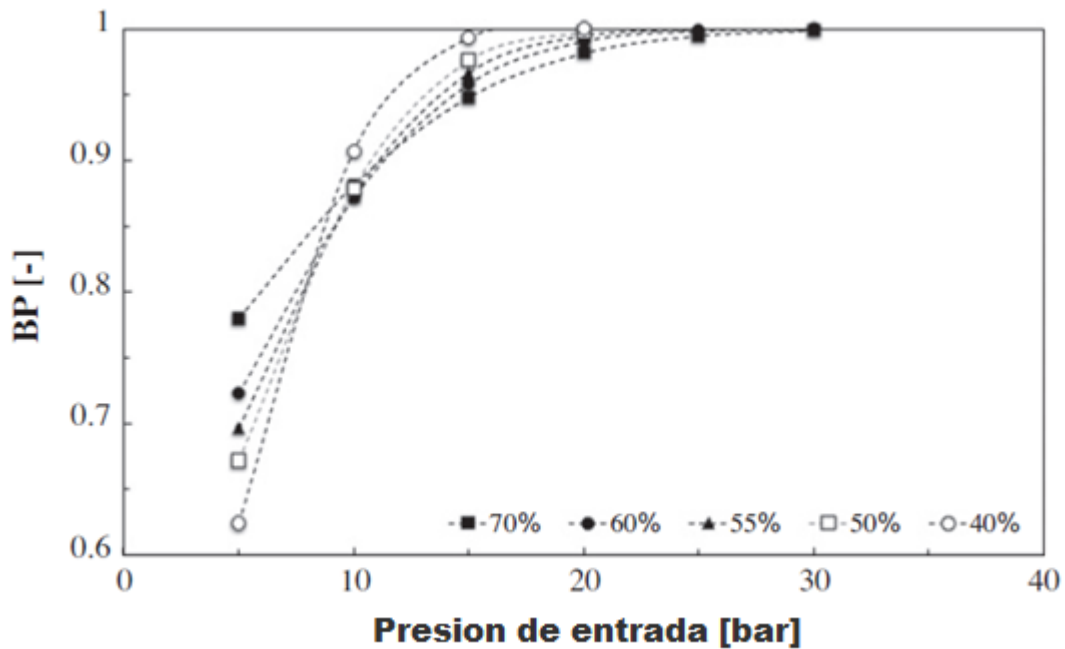


Figura 12 El metano en la corriente enriquecida (alimentación 40 kg/h) tomada de: (Molino, y otros, 2012)

También en este caso se debe tener en cuenta que el caudal de retenido disminuye al aumentar la presión de funcionamiento, por lo tanto se debe llegar a una condición que garantice la alta pureza y una productividad alta en términos de velocidad de flujo.

Si se considera el rendimiento de metano (Figura 14) se confirma que un aumento en la presión operativa provoca una disminución en el rendimiento del proceso y esta evidencia no es dependiente de la composición de alimentación.

Por otra parte, si este parámetro del proceso es considerado, una pureza alta del biogás de entrada tendrá un impacto favorable en la recuperación de hidrocarburos recuperados en todas las condiciones de presión investigadas. (Molino, y otros, 2012)

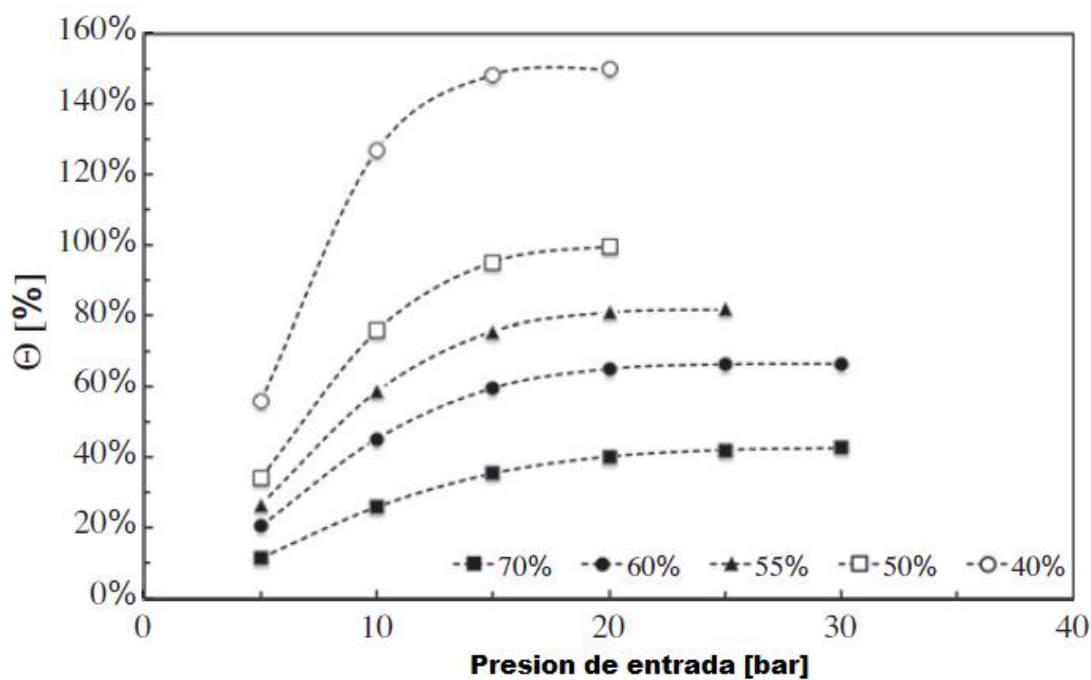


Figura 13 Incremento relativo de la fracción de metano (alimentación 40 kg / h). Adaptado de: (Molino, y otros, 2012)

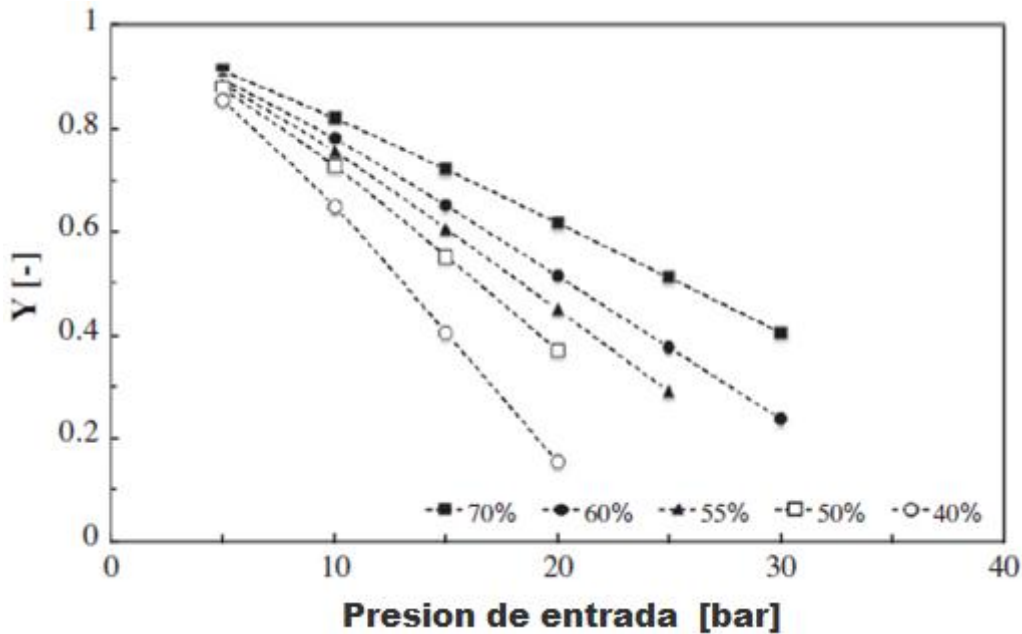


Figura 14 Rendimiento de metano (alimentación 40 kg / h) adaptada de: (Molino, y otros, 2012)

Según PoroGen Corporation el proceso que tiene mayor rendimiento en cuanto a purificación de biogás natural, es una configuración con doble membrana donde se tiene una boquilla de salida final de metano purificado, un permeado que es recirculado a la segunda membrana; donde la segunda membrana tiene un flujo de salida de permeado final y un flujo de metano purificado que es recirculado al flujo de entrada de la membrana número uno, tal cual se ve en la Figura 15.

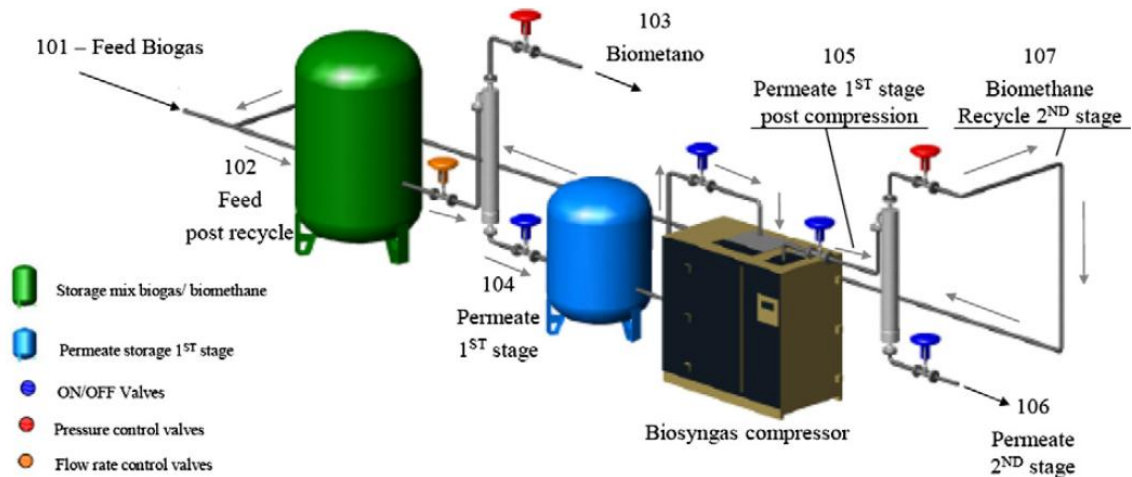


Figura 15 Configuración en fase tándem adaptada de: (Molino, y otros, 2012)

La tabla 5. muestra que con un flujo másico de 35 kg/h de biogás se puede llegar a obtener hasta un flujo de 12.36 kg/h con una pureza del 95.4% de metano. Lo cual indica que con el sistema de configuración tándem de doble membrana un tercio del flujo inicial se puede utilizar como biocombustible útil.

Tabla 5 Resultados numéricos para la configuración de fase 'tándem' Adaptado de: (Molino, y otros, 2012) Figura 15.

Componentes	Entradas y salidas	
	101	102
Metano (vol. %)	55	55.08
Dióxido de Carbono (vol. %)	39	38.89
Hidrogeno (vol. %)	5	4.81
Nitrógeno (vol. %)	1	1.23
Biogás de alimentación (kg/h)	35	48.59
Presión (bar)	31	31
Temperatura (C)	30	27
	103 metano	104
Metano (vol. %)	95.40	28.79
Dióxido de Carbono (vol. %)	2.98	62.30
Hidrogeno (vol. %)	0.022	7.8
Nitrógeno (vol. %)	1.4	1.11
Biogás de alimentación (kg/h)	12.36	36.23
Presión (bar)	31	1.72
Temperatura (C)	15	15.1
	105	106
Metano (vol. %)	28.79	6.99
Dióxido de Carbono (vol. %)	62.30	81.81
Hidrogeno (vol. %)	7.8	10.68
Nitrógeno (vol. %)	1.11	0.52
Biogás de alimentación (kg/h)	36.23	22.91
Presión (bar)	31	1.72
Temperatura (C)	19	19
	107	
Metano (vol. %)	55.27	
Dióxido de Carbono (vol. %)	38.60	
Hidrogeno (vol. %)	4.29	
Nitrógeno (vol. %)	1.83	
Biogás de alimentación (kg/h)	13.31	
Presión (bar)	31	
Temperatura (C)	19	

Una de las opciones para la purificación de biogás es la propuesta comercial ofrecida por la corporación PoroGen, debido a que es un sistema que se puede adaptar a diferentes concentraciones y mezclas de biogás generado en los rellenos sanitarios.

4.2 Método de aprovechamiento de biogás utilizando quemador de gas.

El potencial energético presente en el gas metano proveniente del proceso de purificación del biogás, es comparable con su semejante el gas natural, el cual en condiciones normales, presenta características similares al metano, permitiendo la importación de tecnologías para el aprovechamiento del metano, el cual no ha sido ampliamente aprovechado comercialmente.

El gas natural comercial es de origen fósil, se encuentra normalmente en el subsuelo continental o marino, se forma por la descomposición de materia orgánica proveniente de animales y plantas atrapadas en arena y lodo de antiguos lagos y océanos que produjeron las condiciones de temperatura y presión óptimas para que lentamente se transformara en petróleo crudo y en gas natural. El gas se acumula en yacimientos, compuestos por bolsas de gas atrapadas en el subsuelo por rocas solidas que evitan el flujo y escape de los gases.

La composición del gas natural incluye aparte de metano que lo compone en un 90 %, hidrocarburos gaseosos, y en proporciones menores etano, propano, butano, pentano y pequeñas proporciones de gases inertes como dióxido de carbono y nitrógeno (INNERGY, 2015)

La tecnología sugerida para el aprovechamiento del biogás en las condiciones de composición mencionadas en la Tabla 6 es un quemador de gases SPARKGAS 30 de la marca BALTUR. (Ver Figura 16) El cual utiliza el gas natural para la combustión y generación de flujos de aire caliente utilizados en diferentes procesos como calefacción, impulsar calderas y hornos además de secado de materiales y sustancias.



Figura 16 Sparkgas 30 quemador de gas (BALTUR, 2015)

Tabla 6 Composición del Gas natural (INNERGY, 2015)

HIDROCARBURO	COMPOSICIÓN QUIMICA	RANGO PORCENTAJE
Metano	CH ₄	91-95
Etano	C ₂ H ₆	2-6
Dióxido de Carbono	CO ₂	0-2
Propano	C ₃ H ₈	0-2
Nitrógeno	N	0-1

Las condiciones de trabajo para el quemador y sus especificaciones técnicas se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7 Condiciones técnicas SPARKGAS 30 adaptada de: (BALTUR, 2015)

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
Potencia Térmica Mínima	60	kW
Potencia Térmica Máxima	300	kW
Caudal Gas Mínimo	6	m ³ /h
Caudal Gas Máximo	30	m ³ /h
Potencia eléctrica motor	0,37	kW
Alimentación Eléctrica Fase	1	N
Alimentación Eléctrica Frecuencia	50	Hz
Alimentación Eléctrica Tipo Corriente	AC	
Alimentación Eléctrica Voltaje	230	V
Longitud	460	Mm
Profundidad	835	Mm
Peso	22	Kg
Potencial nominal	1000000	Btu/h
Consumo anual de gas	64 512	m ³

Las características del quemador se adaptan a las condiciones requeridas de combustión y temperatura de salida deseada, el termostato regulador de temperatura puede ser regulado para que su funcionamiento pueda ser adaptable a diferentes usos y aprovechamientos del flujo de aire caliente.

Para generar una columna de aire caliente continua a una temperatura de 170°C en las condiciones ambientales de la ciudad de Manizales a partir de gas natural, se obtienen los siguientes resultados obtenidos en el estudio técnico realizado por el grupo EMA INGENIERIA⁶.

⁶ Grupo EMA Ingeniería brinda soluciones integrales de ingeniería. Sitio web: <http://www.grupoema.co/>

Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 8. (Grupo EMA , 2015)

Tabla 8 Análisis de gases quemador SPARKGAS 30 (Grupo EMA , 2015)

PARAMETRO	RESULTADO DE MEDICIÓN
O₂	4.2%
CO	12ppm
Eficiencia	83.6%
CO₂	9.4%
Temperatura de salida	170 °C

Capítulo 5. Evaluación económica de instalación del sistema de aprovechamiento de gas metano para el relleno sanitario La Esmeralda, Manizales.

Según la Tabla 2 de componentes del biogás (Panesso, 2011).el porcentaje de volumen seco de metano está en el rango de 50% y 70%, esto brinda la base mínima de producción de biogás proveniente de los rellenos sanitarios, siendo esta el 50 % del total del biogás generado en el relleno sanitarios.

Según POROGEN CORPORATION y su método de purificación por membranas con configuración tándem de doble etapa (ver figura 14 y Tabla 5) donde se expresan las tasas de purificación para un flujo de biogás con un porcentaje de metano del 55%, estando estos valores en los rangos establecidos en la tabla 2 (Panesso, 2011).

Para el relleno sanitario La Esmeralda, y teniendo como base la información presentada en las Tablas 2 y 5 además de la información obtenida del caso exitoso del relleno sanitario Doña Juana de la ciudad de Bogotá DC, donde se expresa que el 50% del biogás generado está compuesto por gas metano.

Para el desarrollo de la evaluación económica de los costos y gastos de instalación del sistema de aprovechamiento de biogás purificado, se toman los valores porcentuales del biogás como se referencia anteriormente y se adopta una base del 55% de gas metano contenido en los flujos de biogás generados en el relleno sanitario la Esmeralda.

Para la instalación de los sistemas de purificación y aprovechamiento del metano será necesaria la intervención de las áreas del relleno sanitario, utilizando zonas comprendidas entre el área de disposición final y un terreno cercano para instalar los sistemas de purificación por medio de membranas y el quemador a base de metano para la producción de un flujo de aire caliente continuo.

Para esto se necesitaran los siguientes insumos:

- Una caseta de 100 m² para la instalación del sistema de aprovechamiento.
- Un sistema de monitoreo de presiones para los rangos de seguridad.
- Tres técnicos encargados del mantenimiento y monitoreo de los equipos.
- Un ingeniero a cargo del personal técnico.
- Sistema de membranas de purificación.

Los costos se estimaron según las necesidades que surgen para la instalación de un sistema completo de aprovechamiento de biogás, teniendo en cuenta los materiales e instrumentos para la instalación, operación y seguimiento del sistema de generación de calor a base de metano, tal como se ve en la Tabla 9.

Tabla 9 Instrumentación para la generación de aire caliente continuo a base de metano proveniente del relleno sanitario la esmeralda.

INSTRUMENTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO EN PESOS	OPERARIO Y ENCARGADO	PROVEEDORES	COSTO TOTAL EN PESOS
Sistemas de purificación (membranas)	Unidades	1	100 000 000	Ingeniero encargado	PoroGen Corporation	100 000 000
Bombas extractoras	Unidades	2	2 115 561	Técnico	Solostocks	4 231 122
Manómetros	Unidades	15	250 000	Técnico	Mundial de manómetros	3 750 000
Tubería PVC de 3 pulgadas de diámetro por 6 metros de longitud	Unidades	200	35 500	Ingeniero a cargo y técnico	Homecenter	7 100 000
Accesorios de tubería	Unidades	300	12 000	Ingeniero a cargo y técnico	Tubos y accesorios CELTA	3 600 000
Quemador Sparkgas 30	Unidades	1	4 000 000	Técnico	Baltur	4 000 000
Costos de instalación	Unidad	1	40 000 000	Contratista	PoroGen Corporation, Baltur	40 000 000
Total en pesos						162 681 122

Para que la instalación, operación y seguimiento del sistema de aprovechamiento del biogás es necesario contar con recursos humanos que cumplan al menos con los requisitos que se muestran en la tabla 10 o estudios a fines.

Tabla 10 Características formativas necesarias para el personal operario.

Cargo	Especificaciones
Ingeniero a cargo	Título profesional y estudios actuales sobre implementación de sistemas ambientales y obras civiles o estudios afines.(título universitario)
Mantenimiento técnico	Estudios técnicos sobre manipulación, mantenimiento y adaptación de sistemas PVC y estudios afines.
Mantenimiento del sistema de aprovechamiento	Estudios técnicos para la instalación, puesta en marcha, mantenimiento y reparación del sistema quemador de gas metano y estudios afines.

Cabe aclarar que el sistema de aprovechamiento para el relleno sanitario se va a implementar con el personal existente en la empresa, ya que en las instalaciones se cuenta con el personal con las competencias necesarias para desarrollar tal labor, garantizando así que no se encarezcan los costos de instalación.

5.2 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las condiciones de operación para el sistema de purificación y aprovechamiento del gas metano contenido en el biogás efluente del relleno sanitario La Esmeralda serán consideradas teniendo en cuenta las condiciones ambientales del lugar, y las características de composición del biogás, entre los parámetros a seguir están:

- poder calorífico
- densidad
- caudales
- flujos máxicos
- pureza
- eficiencia de los sistemas (purificación y aprovechamiento)

El sistema de purificación por membranas y el aprovechamiento con el quemador SPARKGAS 30 se diseñó en base a la Tabla 11 que presenta las diferencias encontradas en los valores del poder calorífico de los diferentes gases. (Gas natural, gas metano, biogás).

Tabla 11 Poder calorífico de diferentes gases (Técnica, 2011)

TIPO DE GAS	PARAMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
GAS NATURAL	PODER CALORIFICO	8800	kcal/m ³
GAS METANO	PODER CALORIFICO	7880	kcal/m ³
BIOGAS	PODER CALORIFICO	5500	kcal/m ³

Debido a que el metano que se estima obtener del sistema de purificación tiene una pureza aproximada del 90 %, si el poder calorífico del metano puro es de 7880 kcal/m³ (Lima, 2015). El poder calorífico esperado será de 7090 kcal/m³ según de la ecuación 7.

$$\text{poder calorífico esperado} = 0.9 * 7880 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} = 7090 \text{ kcal/m}^3 \quad \text{Ecuación 7}$$

En base al poder calorífico del gas natural, utilizado comercialmente como combustible abastecedor del sistema quemador SPARKGAS 30 y el poder calorífico del sistema de purificación se obtiene una relación igual a un metro cubico de gas metano equivalente a 0,805 m³ de gas natural según la ecuación 8.

$$\text{equivalencia de gas} = \frac{7090 \text{ kcal/m}^3}{8800 \text{ kcal/m}^3} = 0.805 \quad \text{Ecuación 8}$$

Según la Tabla 7 que presenta el análisis de gases del SPARKGAS 30 con un flujo continuo de 16 horas se necesita entrada de gas natural de 14 m³/h de combustible.

Según la Tabla 5 para obtener un flujo másico de metano igual a 12,36 kg/h se necesitan 35 kg/h de biogás en la entrada del sistema de purificación de doble etapa y configuración tándem. Entonces:

$$\text{Densidad del metano: } \rho_{\text{CH}_4} = 0,66 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Técnica, 2011})$$

$$\text{Densidad del biogás: } \rho_{\text{biogás}} = 0,75 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{Técnica, 2011})$$

$$\text{Caudal de salida de metano} = \frac{12.36 \text{ kg/h}}{0,66 \text{ kg/m}^3} = 18,727 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\text{Caudal de entrada de biogás} = \frac{35 \text{ kg/h}}{0,75 \text{ kg/m}^3} = 46,66 \text{ m}^3/\text{h} \quad \text{Ecuación 10}$$

Ya que un metro cubico de metano purificado al 90 % equivale a 0,805 m³ de gas natural comercial, se hacen necesarios 17,391 m³/h de gas metano para remplazar el desempeño total del flujo de 14 m³/h de gas natural necesario para la producción de un flujo de aire caliente continuo de 170°C.

Según la ecuación 10 se debe garantizar un caudal de 46,66m³/h al sistema de purificación y aprovechamiento de gas metano, para que dicha cantidad de biogás, otorgue al sistema de quemado, un flujo de gas metano purificado al 90 % para que su combustión remplace la inyección de 14 m³/h de gas natural requeridos para que el sistema tenga un flujo de salida de aire caliente continua de 170°C.

5.3 OPORTUNIDAD ECONÓMICA POSTERIOR A LA INSTALACIÓN

El aprovechamiento del metano contenido en el biogás generado en el relleno sanitario La Esmeralda, pretende otorgar a la empresa un flujo continuo de aire caliente de 170°C que puede ser utilizado en diferentes formas en el interior de la empresa, puede ser el

sustento energético de sistemas como el secado de lodos del relleno, calefacción, calderas y demás tecnologías posibles que la empresa EMAS S.A pueda implementar.

Siguiendo el orden cronológico de la investigación, y haciendo relación de los datos obtenidos a partir del análisis de la información obtenida teóricamente para el caso de estudio, se obtiene un estimado del beneficio económico que traería la implementación del sistema de purificación y aprovechamiento por cada metro cubico de biogás aprovechado en el relleno sanitario La Esmeralda.

El beneficio económico se calcula en base a los 14 m³/h de gas natural que requiere el quemador en condiciones normales de operación para generar la columna de aire caliente esperada, teniendo un rango de operación de 16 horas diarias continuas como se muestra en los cálculos siguientes.

Metro cúbicos por día= cantidad de m³por hora de gas natural * número de horas laboradas en el día

$$\text{Metros cúbicos por día: } 14 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 16 \frac{\text{h}}{\text{día}} = 224\text{m}^3/\text{día} \quad \text{Ecuación 11}$$

La tarifa variable para el metro cubico de gas natural en la ciudad de Manizales para junio de 2015 es de 1253.44 pesos, el cual es ofrecido por la empresa EFIGAS S.A. E.S.P

Ahorro mensual del gas natural= cantidad de m³de gas natural/día de trabajo * número de días trabajados al mes

$$\text{Ahorro mensual del gas natural: } 224 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 24 \frac{\text{día}}{\text{mes}} * 1253 \frac{\text{pesos}}{\text{m}^3} = 6\,736\,128 \text{ pesos/mes}$$

Ecuación 12

Ahorro = costos sin aprovechamiento + gastos sin aprovechamiento - costos con aprovechamiento - gastos con aprovechamiento

$$\text{Ahorro} = 6\,736\,128 \text{ pesos/mes} + 0 - 0 - 60\,000 = 6\,676\,128 \text{ pesos/mes}$$

Ecuación 13

Beneficio económico= ahorro + ingreso

$$\text{Beneficio económico} = 6\,676\,128 \text{ pesos/mes} + 0 = 6\,676\,128 \text{ pesos/mes}$$

Ecuación 14

Periodo de recuperación de la inversión: inversión / beneficio económico

Periodo de recuperación de la inversión: $\frac{162\ 681\ 122\ \text{pesos}}{6\ 676\ 128\ \text{pesos/mes}} = 24,3\ \text{meses}$
Ecuación 15

Rentabilidad de la inversión= $\left(\frac{\text{beneficio económico} - \text{la inversión}}{\text{la inversión}} + 1\right) * 100$

Rentabilidad de la inversión= $\left(\frac{6\ 676\ 128\ \text{pesos/mes} - 162\ 681\ 122\ \text{pesos}}{162\ 681\ 122\ \text{pesos}} + 1\right) * 100 = 4,10\ \%$

Ecuación 16

La tabla 12 muestra los datos obtenidos en la de las ecuaciones anteriores, la cual se realiza para tener una percepción más clara del análisis económico de la instalación del sistema de biogás para el relleno sanitario La Esmeralda de la ciudad de Manizales.

Tabla 12 Análisis económico de la instalación del sistema de aprovechamiento de biogás.

VARIABLES	Ahorro de gas natural
Inversión(I)	162 681 122 pesos
Ingresos (Y)	0,00
Costos sin aprovechamiento	6 736 128 pesos/mes
Gastos sin aprovechamiento	0,00
Costos con aprovechamiento	60 000 pesos/mes
Gastos con aprovechamiento	0,00
Beneficio económico (BE)	6 676 128 pesos/mes
Tiempo de recuperación(PRI)	24,7 meses
Rentabilidad sobre la inversión(ROI)	4.04%

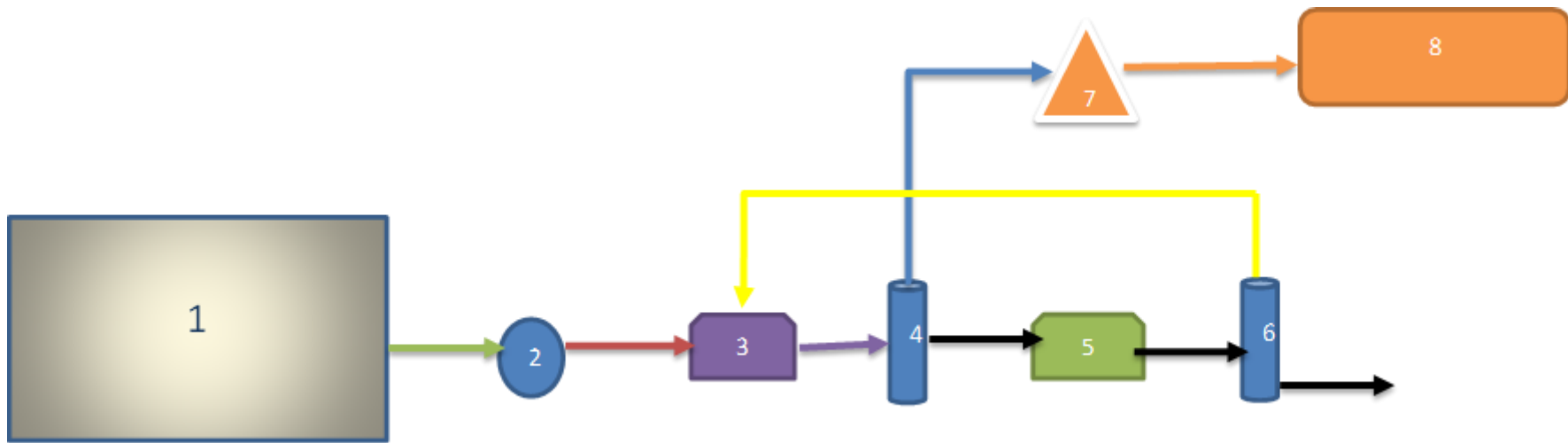









Figura 17 Esquema del proceso de aprovechamiento del metano proveniente del relleno sanitario la esmeralda

En la Tabla 13 se presenta de manera más clara de codificación del esquema de flujos del sistema de aprovechamiento del biogás generado el relleno sanitario la esmeralda con el fin de ilustrar un poco la investigación.

Tabla 13 Descripción y detalle del esquema del proceso de aprovechamiento del metano proveniente del relleno sanitario la esmeralda.

código	Descripción
1	Relleno sanitario
2	Tanque de homogeneización de biogás
3	Mezclador de biogás con metano recirculado proveniente de membrana Peek 2
4	Membrana Peek 1
5	Compresor de biogás
6	Membrana Peek 2
7	Quemador Sparkgas 30
8	Uso final
	Biogás con diferentes concentraciones
	Biogás homogenizado
	Mezcla de biogás con metano proveniente de la membrana Peek 2
	Permeado
	Recirculación de metano
	Metano purificado al 95%
	Flujo de aire caliente (aproximadamente 170°C)

Capítulo 6. Conclusiones

- Existen diferentes métodos de colección del biogás generado en rellenos sanitarios de los cuales, en su gran mayoría consisten en aislar el gas en tuberías o campanas para conducir el gas hasta las instalaciones de pretratamiento para su posterior aprovechamiento.
Generalmente la conducción del gas no requiere sistemas de extracción que incrementen los costos de colección, no obstante, en condiciones anormales del relleno sanitario por compactación, se hace preciso utilizar campanas de extracción que ayuden en el proceso de colección.
- El método de purificación sugerido al caso de estudio para la purificación del biogás generado es la membrana tipo PICK que ofrece la corporación POROGEN, ya que sus condiciones químicas pueden ser adaptadas a las características propias del relleno sanitario de la ciudad de Manizales, además de ofrecer tasas de purificación de hasta el 95 % en remoción de hidrocarburos en el biogás tratado.
- El quemador SPARKGAS 30 cumple con las condiciones necesarias para el aprovechamiento del metano contenido en el biogás generado en el relleno sanitario La Esmeralda, ya que no tiene restricción para ser operado con base a este combustible y ha sido un caso exitoso en empresas que lo han implementado en sus procesos productivos en la ciudad de Manizales (MABE, 2015).
- El costo de inversión inicial del proyecto de aprovechamiento de biogás es alto no obstante la tasa de rentabilidad muestra que mensualmente se puede recuperar el 4% de la inversión inicial, permitiendo consigo recuperar el gasto inicial en un periodo de 25 meses, generando después de dicho plazo, ahorros mensuales a la empresa que lo ejecuta.
- Un tercio del flujo de biogás que es liberado al ambiente es utilizado dentro del sistema de aprovechamiento reduciendo así la tasa de contaminación por emisión del relleno sanitario La Esmeralda. Además de permitir que el sobrante del biogás no aprovechado este canalizado y pueda ser fuente de investigación para su tratamiento y neutralización evitando la liberación de contaminantes al ambiente.
- El sistema de aprovechamiento tiene la capacidad de producir 18,7 m³ de metano al 95 % de pureza por cada 46,66m³/h de biogás generado por la descomposición de materiales orgánicos dispuestos en las celdas diarias del relleno sanitario La Esmeralda de la ciudad de Manizales.
- La investigación da base a la conversión de tecnologías que utilizan combustibles de origen fósil a nuevas alternativas de aprovechamiento que permitan el desarrollo de las comunidades sin dependencia total de los yacimientos de gas natural.
- Existen tecnologías para el monitoreo continuo de las características físico-químicas que facilitan conocer en un proceso experimental, las condiciones de purificación del biogás que es generado en los rellenos sanitarios y así asegurar las buenas practicas operación de los quemadores y no ocasionar daños a futuro.

SUGERENCIAS

- Debe incentivarse la investigación de nuevas alternativas energéticas y dar más apoyo a nivel nacional a los proyectos de aprovechamiento energético que utilicen fuentes de energía no convencionales, además de promover la producción limpia de energía y sin perjuicios ambientales.
- El compromiso de la empresa es vital para continuar con las investigaciones y labores en búsqueda de hacer del relleno sanitario La Esmeralda un sistema de recolección de residuos sólidos productivo y responsable ambientalmente.
- Se deben buscar ayudas a nivel local y nacional para llevar a cabo las inversiones necesarias para la ejecución de proyectos que busquen la sostenibilidad ambiental y generación de beneficios y avances tecnológicos. además de ejecutar las obras necesarias e instalaciones del sistema aprovechamiento de gas metano generado en el relleno sanitario La Esmeralda.
- Promover los proyectos de aprovechamiento de biogás generado en rellenos sanitarios por parte de las empresas prestadoras del servicio de aseo que permitan la generación de energías no fósiles, permitiendo un avance tecnológico en el aprovechamiento y garantizando el equilibrio ambiental evitando la emisión de gases contaminantes que pueden ser utilizados como fuente de energía.
- Se debe mostrar iniciativa hacia las nuevas investigaciones en el campo de los materiales de recolección del biogás, ya que los existentes son vulnerables en temas de oxidación y fragilidad del componente; es por esto que se invita a dar paso a la consulta de este tema.
- Continuar con la investigación de la implementación del biogás permeado, proveniente de los sistemas de purificación, en cadenas de valor para lograr aumentar los beneficios que aportan estas prácticas operacionales a las organizaciones nacionales.

Bibliografía

- INNERGY, S. (10 de 07 de 2015). *INNERGY soluciones energeticas*. Recuperado el 18 de Julio de 2015, de <http://www.innergy.cl/quees.htm>
- Mabe , C. (10 de 06 de 2015). Informe de chimenas para corpocaldas. Manizales.
- Aguilar, G. K. (27 de 08 de 2007). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición fina. MEXICO. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/gacetas/497/kiss.html>
- BALTUR. (10 de 07 de 2015). *Detalles Tecnicos SPARKGAS 30*. Obtenido de Detalles Tecnicos SPARKGAS 30: http://www.baltur.it/es/es/Catalogo/Sistema/15685410/SPARKGAS_30_W_60Hz
- Camargo, & V. (2009). EMISIONES DE BIOGAS PRODUCIDAS EN RELLENOS SANITARIOS. *Grupo de Investigación en Modelación de Sistemas Ambientales- GIMSA. Instituto de Investigaciones Tropicales-*, 2-4.
- CNPML, C. N. (30 de 05 de 2008). informe de prefactibilidad. *Methane to Markets*. Medellin, Colombia: U. S. Environmental Protection Agency.
- DESOTEC. (24 de 03 de 2015). *desotec.com*. Obtenido de desotec.com: <http://www.desotec.com/es/carbonology-es/eliminacion-del-sulfuro-de-hidrogeno-en-el-biogas-parte-1/4651/>
- EMAS. (20 de 10 de 2014). *EMAS.COM* . Obtenido de EMAS.COM: <http://emas.com.co/centro-de-tecnologia-ambiental-la-esmeralda/>
- EPA. (15 de 5 de 2014). *environmental protection agency* . Obtenido de environmental protection agency : <http://www.epa.gov/lmop/international/colombia.html>
- GISBERT, A. P. (2010). *Ingenieria del Medio Ambiente* . España: Editorial Club Universitario.
- Grupo EMA , i. (19 de 06 de 2015). *Estudio Tecnico de Mantenimiento*. Obtenido de Estudio Tecnico de Mantenimiento.
- ICONTEC. (29 de 05 de 2009). NTC GTC 024 Gestión Ambiental. Residuos Solidos. Guia para la Separación en la Fuente . Bogota , COLOMBIA .

- Lima, A. (10 de 04 de 2015). Generacion Termica. Brasil:
<http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>.
- MCB. (20 de 10 de 2014). *MODELO COLOMBIANO DE BIOGAS* .
- Molino, A., Migliori, M., Ding, Y., Bikson, B., Giordano, G., & Braccio, G. (2012). Biogas upgrading via membrane process: Modelling of pilot plant scale and the end uses for the grid injection. (E. U. ENEA, National Agency for New Technologies, , E. C.-8. University of Calabria, Department of Chemical , & 6. PoroGen Corporation, Edits.) *Elsevier Ltd*.
- Monreal, J. C. (septiembre de 1999). *La Recuperación De Biogas En Rellenos Sanitarios De santiago de Chile*. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal/xxxvi.pdf>
- Morales, A. E. (2012). *Estadística y Probabilidades* . CHILE : Universidad Católica de la Santísima Concepción .
- NUNES, V. M. (12 de 04 de 2012). Química dos Biocombustíveis . Tomar, Portugal : Instituto Politecnico de Tomar.
- Petroleo, M. d. (2005). *PDVSA*. Obtenido de http://www.pdvs.com/PESP/Pages_pesp/aspectostecnicos/gasnatural/queeselgas.html
- POT. (27 de 9 de 2014). *plan de ordenamiento territorial*. Obtenido de plan de ordenamiento territorial: <file:///C:/Users/fernando/Downloads/captulo%201%20suelo%20rural.pdf>
- Publicos, S. I. (2010). *Super Intendencia De Servicios Publicos*. Obtenido de <http://www.superservicios.gov.co/content/download/901/13765/version/1/file/%282011%29+SITUACION+DE+LA+DISPOSICION+FINAL+DE+RESIDUOS+SITUACION+DE+COLOMBIA+-+DIAGNOSTICO+2011.pdf>
- REPUBLICA, C. D. (27 de 11 de 2008). por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones . Bogota., COLOMBIA .
- S.p.A., B. (04 de 2000). *BALTUR.COM*. Obtenido de BALTUR.COM:
http://pdfretriever.com/ref_sien.php?ID=2427251&lg=S&h=d41d8cd98f00b204e9800998ecf8427e&src=15
- Separation , A. (12 de 05 de 2015). Proceso de secado de lodos.
http://www.andritzgouda.com/uploads/docs/AG_Sludge_drying_brochure_def_web.pdf.
- So, A., Valdes Salas, B., Schorr Wiener, M., & Carrillo Beltran , M. (2013). *corrosion y preservacion de la infraestructura industrial*. barcelona: omniascience.
- Stege, G. A., & Dávila, J. L. (1 de 9 de 2009). *U.S. EPA* . Obtenido de U.S. EPA:
<http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/ManualdeUsuarioModeloColombiano.pdf>
- Técnica, J. (18 de 12 de 2011). Usos del biogás y la cogeneración . Tàrrega, España : Generalitat de Catalunya.
- Tiempo, E. (18 de 04 de 2007). Emas de Manzales creará el primer relleno sanitario de Ciudad de Panamá. *EL TIEMPO* .

- Varnero, M. T., Caru, M., & gallellios, K. (2011 de 09 de 2011). *Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica*. Obtenido de Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642012000200005
- Vasquez, R. (1996). *Procesamiento de la basura urbana*. Mexico DF: Trillas .
- Corantioquia. (2001). Corantioquia. Recuperado el 15 de mayo de 2014, de www.corantioquia.gov.co/docs/LOGROS/GIRS.htm
- Hernández, A. F. (1996). Recuperado el 15 de mayo de 2014, de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia20/HTML/articulo03.htm>
- María T. Varnero, M. C. (2012). *Biotecnología*. Recuperado el 16 de mayo de 2014, de *Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica*: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642012000200005
- Panesso, a. f. (2011). Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica. *Scientia Et Technica* 2011 XVII (47), 24.
- Alvarez Contreras, A. J. (2006). Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario "el guayabal" de la ciudad san José de Cúcuta. *Ingeniería y Desarrollo*, núm. 20.
- Jaramillo, J. (2003). Guía para el diseño, construcción y operación de los rellenos sanitarios. En J. Jaramillo, *Guía para el diseño, construcción y operación de los rellenos sanitarios* (págs. 19-36). Medellín: OPS/CEPIS.
- Relleno Doña Juana, C. d. (2014). CGRDONAJUANA. Recuperado el 21 de 5 de 2014, de CGRDONAJUANA: <http://www.cgrdonajuana.com/index.php/el-relleno/acerca>
- Katia M. Noguera, J. T. (2010). Los Rellenos Sanitarios en Latinoamérica: Caso Colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 349.
- Secretaria de Planeación de Manizales, S. D. (3 de 2012). *Indicadores Manizales*. Recuperado el 21 de 5 de 2014, de INDICADORES MANIZALES: <http://www.indicadoresmanizales.com/files/PERFIL%20MANIZALES.pdf>
- Quetzalli Aguilar &Virgen, P. T.-G. (2011). Potencial de producción eléctrica. *Ingeniería e Investigación* VOL. 31 No. 3, DECEMBER 2011 (56-65).
- Reporte Sobre Biomasa. (13 de 03 de 2012). Proceso de aprovechamiento del biogás generado en un relleno sanitario. Recuperado el 21 de mayo de 2014, de http://isea.webcindario.com/index_archivos/biomasa.htm
- Toro, M. R. (26 de 03 de 2009). Secretaria de medio ambiente; Jalisco. Recuperado el 28 de 05 de 2014, de secretaria de medio ambiente; Jalisco : <file:///C:/trabajos/octavo%20semestre/rellenos/metano%20cambio%20climatico.pdf>
- Martínez, M.A. (11 de 07 de 2011). ADN Bogotá. Recuperado el (08/08/2014), ADN Bogotá : <http://diarioadn.co/bogot%C3%A1/mi-ciudad/biogas-una-alternativa-de-proteccion-al-medio-ambiente-en-bogot%C3%A1-1.10741>

Betancourth, Lorena Marin. "Evaluación del proyecto de quemado de biogás enfocado a los mecanismos de producción más limpia en el relleno esmeralda, manizales (caldas), basado en los resultados obtenidos en el relleno sanitario de antanas, pasto (nariño)" (2011).

Rivera, J. O. (2012). PD MIDSOC (Plan Director de Manejo Integral del Desechos Sólidos del Cusco). Obtenido de PD MIDSOC (Plan Director de Manejo Integral del Desechos Sólidos del Cusco): <http://www.bvsde.paho.org/bvsade/e/fulltext/uni/ponen27.pdf>

Inficon. (23 de 08 de 2015). *Sistema de análisis de gases Transpector XPR3*. Obtenido de <http://products.inficon.com/es-es/Product/Detail/Transpector-XPR3-Gas-Analysis-System?path=Products%2Fpg-RGA-MassSpectrometers>