

EVALUACIÓN DEL PROYECTO DE QUEMADO DE BIOGÁS ENFOCADO
A LOS MECANISMOS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN EL RELLENO
LA ESMERALDA, MANIZALES (CALDAS), BASADO EN LOS
RESULTADOS OBTENIDOS EN EL RELLENO SANITARIO DE ANTANAS,
PASTO (NARIÑO)

LORENA MARÍN BETANCOURTH
DIANA MARCELA VILLADA MARÍN

UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS CONTABLES, ECONÓMICAS Y
ADMINISTRATIVAS
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
MANIZALES
2013

EVALUACIÓN DEL PROYECTO DE QUEMADO DE BIOGÁS ENFOCADO
A LOS MECANISMOS DE PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA EN EL RELLENO
LA ESMERALDA, MANIZALES (CALDAS), BASADO EN LOS
RESULTADOS OBTENIDOS EN EL RELLENO SANITARIO DE ANTANAS,
PASTO (NARIÑO)

MODALIDAD INVESTIGACION

LORENA MARÍN BETANCOURTH
DIANA MARCELA VILLADA MARÍN

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Asesor.
JHON FREDY BETANCUR PEREZ
Esp. Biología Molecular y Biotecnología. PhD Ciencias Agropecuarias.

UNIVERSIDAD DE MANIZALES
FACULTAD DE CIENCIAS CONTABLES, ECONÓMICAS Y
ADMINISTRATIVAS
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
MANIZALES
2013

Nota de aceptación

Firma presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Manizales, Noviembre 2013

A la Empresa Metropolitana de Aseo (EMAS) S.A. E.S.P., por su apoyo constante para realización de este proyecto.

A nuestras familias.

CONTENIDO

	pág.
1. DISEÑO TEÓRICO	14
1.1 INVESTIGACIÓN	14
1.2 INTRODUCCIÓN	14
1.3 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	15
1.4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA	15
1.5 ALCANCES INVESTIGATIVOS	16
1.6 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	17
1.7 JUSTIFICACIÓN	22
1.8 OBJETIVOS	23
1.8.1 Objetivo general	23
1.8.2 Objetivos específicos	23
1.9 HIPÓTESIS Y VARIABLES	24
2. MARCO TEÓRICO	25
2.1 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	25
2.2 PROPIEDADES DE LOS RSU	28
2.2.1 Propiedades físicas	28
2.2.1.1 Peso específico	28
2.2.1.2 Contenido de humedad	29

2.2.1.3 Permeabilidad de los residuos compactados	29
2.2.2 Propiedades químicas	30
2.2.3 Análisis físico	30
2.2.4 Análisis elemental de los componentes de residuos sólidos	30
2.2.4 Propiedades biológicas	31
2.3 ¿QUÉ ES EL BIOGÁS?	33
2.4 PROCESO DE GENERACION DE BIOGÁS EN UN RELLENO SANITARIO	35
2.4.1 Fase I - Ajuste inicial	36
2.4.2 Fase II - Fase de transición	36
2.4.3 Fase III - Fase ácida	37
2.4.4 Fase IV - Fase de fermentación del metano	37
2.4.5 Fase V - Fase de maduración	37
2.4.6 Sistemas de extracción del biogás en un relleno sanitario	38
2.5 MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS	40
2.5.1 Descripción del sistema de gasificación	43
2.5.2 Gestión y control de operación	43
2.6 MODELO DEL IPCC	44
2.7 BONOS DE EMISIÓN DE REDUCCIÓN DE EMISIONES (CERs)	48
2.8 MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO (MDL)	49
2.9 PLANES DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS (PGIRS)	53
3. DISEÑO METODOLÓGICO	56

3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN	58
3.2	POBLACIÓN Y MUESTRA	58
3.3	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	60
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	64
4.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS RSU DEL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA	64
4.2	COMPARACIÓN DEL MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS <i>VERSUS</i> LA APLICACIÓN DEL MODELO DEL IPCC PARA MODELOS MDL	67
4.3	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS ARROJADOS DEL MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS APLICADO EN EL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA DE MANIZALES <i>VERSUS</i> LOS ARROJADOS EN EL RELLENO SANITARIO ANTANAS DE PASTO	69
4.4	EVALUACIÓN EL MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS FRENTE A LAS OPORTUNIDADES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EN COLOMBIA	74
4.5	EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DEL MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS EN LOS RELLENOS SANITARIOS DEL PAÍS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA GESTIÓN AMBIENTAL Y LOS PGIRS	76
5.	CONCLUSIONES	78
6.	RECOMENDACIONES	80
	BIBLIOGRAFÍA	81

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Fuentes y tipos de residuos sólidos en la comunidad	26
Tabla 2. Distribución de componentes de los RSU domésticos en países de bajos, medianos y altos ingresos, excluyendo materiales reciclados.	27
Tabla 3. Peso específicos según el tipo de residuos.	29
Tabla 4. Datos típicos del análisis elemental de los componentes combustibles de los RSU domésticos.	30
Tabla 5. Datos sobre la fracción biodegradable de componentes seleccionados de residuos orgánicos basándose en el contenido de lignina.	31
Tabla 6. Transformaciones físicas, químicas y biológicas de los residuos sólidos.	32
Tabla 7. Porcentaje de gas (%) de un relleno captado.	38
Tabla 8. Relleno sanitario La Esmeraldas vs relleno Antanas.	70

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Metodología y etapas del cálculo para las emisiones de GEI, años 2000 y 2004. IDEAM.	18
Figura 2. Figura 2 Estructura de cálculo de las emisiones de GEI, años 2000 y 2004. IDEAM.	19
Figura 3. Comportamiento de las emisiones por fuente de emisión en unidades de Gg CO ₂ eq, años 1990, 1994, 2000 y 2004.	20
Figura 4. Emisiones por gas en unidades de Gg CO ₂ eq, años 1990, 1994, 2000 y 2004.	21
Figura 5. Elementos funcionales de una gestión de residuos sólidos.	28
Figura 6. Ruta de producción de metano y dióxido de carbono.	36
Figura 7. Chimenea actual del relleno sanitario para drenaje pasivo del biogás del relleno sanitario La Esmeralda, Manizales, 2012.	39
Figura 8. Conector de gas y pozos de desfogue sistemas de drenaje activo relleno sanitario Antanas, Pasto, 2012.	40
Figura 9. Hoja de cálculo en Excel del Modelo Colombiano de Biogás.	41
Figura 10. Mapa conceptual de las emisiones de CH ₄ en un relleno sanitario.	45
Figura 11. Hoja de cálculo del modelo del IPCC para el cálculo de emisiones.	47
Figura 12. Beneficios para los promotores de proyectos MDL.	50
Figura 13. Demanda de principales compradores de bonos CERs.	51
Figura 14. Tipo de proyectos (% del volumen contratado).	52

Figura 15. Metodología del PGIRS.	54
Figura 16. Alcance de los objetivos propuestos en la investigación.	57
Figura 17. Metodología general de la investigación.	59
Figura 18. Relleno sanitario La Esmeralda, Manizales, 2012.	62
Figura 19. Relleno Sanitario Antanas, Pasto, 2011.	63
Figura 20. Resumen toneladas mes/año 2008-2012 dispuestas en el relleno sanitario La Esmeralda.	65
Figura 21. Caracterización física de los RSU del relleno sanitario La Esmeralda 2008-2012.	66
Figura 22. Comparación de porcentajes de RSU La Esmeralda vs. Antanas.	71
Figura 23. Comparación del tonelaje de residuos dispuestos en el relleno La Esmeralda vs. Antanas, 2008-2012.	72
Figura 24. Cantidad de biogás proyectados por Bionergis en ambas ciudades.	73
Figura 25. Biogás proyectado vs. Biogás real Antanas / Pasto.	74

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Normatividad colombiana.	85
ANEXO B. Panorámica general del Relleno Sanitario La Esmeralda, Manizales.	86
ANEXO C. Plano del relleno sanitario La Esmeralda, Manizales.	87
ANEXO D. Plano de distribución del relleno sanitario Antanas , Pasto.	88
ANEXO E. Resumen de disposición final de residuos relleno sanitario La Esmeralda, Manizales.	89
ANEXO F. Resumen de disposición final de residuos relleno sanitario Antanas, Pasto.	90
ANEXO G. Muestreo de gases relleno sanitario La Esmeralda, Manizales, 2004.	91
ANEXO H. Estimado de reducción de gases de efecto invernadero con el proyecto de quemado de biogás en el relleno sanitario La Esmeralda	92
ANEXO I. Registro fotográfico relleno sanitario La Esmeralda, Manizales.	93

RESUMEN

Los residuos sólidos urbanos son un problema para todas las ciudades del mundo independiente de su tamaño por lo que requieren de un adecuado manejo ya que su producción es inherente a cualquier actividad humana; dentro de los procesos de manejo que se realizan en los rellenos sanitarios esta la transformación anaeróbica de los residuos a través de bacterias en ausencia de aire generando una mezcla de gases conocida como Biogás, cuyo componente principal es el dióxido de carbono; debido a la contaminación generada por este gas el relleno Sanitario La Esmeralda se decidió poner en marcha el proyecto de quemado de biogás a través de chimeneas que mejorarían la combustión del mismo. Conociendo este proyecto esta investigación busca desde un punto de vista de la gestión ambiental evaluar sus componentes para identificar la viabilidad de que en los rellenos sanitarios del país se apliquen este tipo de proyectos y también analizar el modelo Colombiano de biogás y su potencial económico a través de la emisión de bonos de carbono.

Palabras clave: residuos sólidos, biogás, relleno sanitario, contaminación, potencial.

ABSTRACT

Municipal solid waste is a problem for all cities in the world regardless of their size and therefore require proper management of their production and is inherent in any human activity within management processes that take place in landfills this anaerobic transformation of waste by bacteria in the absence of air producing a mixture of gases known as biogas , whose main component is carbon dioxide , due to pollution from the gas filling La Esmeralda Health decided to launch burning the biogas project through chimneys that would improve fuel combustion . Knowing this research project looking from the point of view of environmental management to evaluate its components to identify the viability of that country's landfills apply this type of project and analyze the Colombian model and its economic potential biogas through of carbon emissions .

Keywords: solid waste, biogas, landfill pollution potential.

1. DISEÑO TEÓRICO

1.1 INVESTIGACIÓN

Evaluación del proyecto de quemado de biogás y mecanismos de producción más limpia en el relleno sanitario La Esmeralda, Manizales (Caldas), con énfasis en la gestión ambiental del proceso de implementación del modelo colombiano de biogás y las repercusiones en la emisión de bonos de Reducciones Certificadas de Emisiones (CERs) de gases invernadero.

1.2 INTRODUCCIÓN

La generación y manejo de residuos sólidos urbanos (RSU) es cada día un problema de mayor envergadura para las ciudades ya sean grandes o pequeñas, dado que se genera a un mayor volumen diario y los rellenos sanitarios deben disponer adecuadamente de estos residuos y en la medida de lo posible implementar técnicas que hagan más eficiente los procesos o que los residuos depositados no generen cargas contaminantes tan altas; dentro de estos procesos se tiene el reciclaje y el compostaje de los residuos orgánicos como alternativas viables para el manejo de residuos antes de que lleguen al relleno sanitario, pero el interrogante se genera con los residuos que llegan mezclados al relleno sanitario, que no se pueden o son difícil física y económicamente de separar y que generan procesos posteriores a la disposición final y compactación como lo son los lixiviados y los gases de efecto invernadero (GEI).

Dentro de los procesos de conversión de los residuos sólidos urbanos o basura que se dan en el relleno sanitario, se da la transformación anaerobia de estos a través de bacterias, donde se descompone de manera natural la parte orgánica de la de residuos en ausencia de aire, de este proceso se genera una mezcla de gases conocida como biogás cuyo componente principal es el metano (CH_4), también encontrado en el gas natural y el segundo gas más importante de efecto invernadero equivalente a 21 veces el dióxido de carbono (SCS Engineers, 2005). Debido a las condiciones de generación de biogás el relleno sanitario La Esmeralda decidió poner en marcha un proyecto de quemado de este biogás a través de unas chimeneas que mejorarían la combustión de dicho gas, esto también con el fin de emitir bonos de Reducciones Certificadas de Emisiones (CERs) de gases invernadero.

Conociendo el desarrollo de este proyecto en el relleno sanitario La Esmeralda, esta investigación busca desde el punto de vista de la gestión ambiental evaluar todos los componentes de dicho proyecto, para identificar la viabilidad de los rellenos sanitarios en Colombia que apliquen proyectos de quema de biogás, así como también analizar el modelo colombiano de biogás y las condiciones actuales para la emisión de bonos de reducciones certificadas de emisiones (CERs) como una fuente de ingreso económico para la empresa que maneja el relleno sanitario de La Esmeralda (Anexo H).

1.3 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué tan viable son los mecanismos de producción más limpia y generación de bonos de reducciones certificadas de emisiones (CERs), a partir del proyecto de quemado de biogás en el Relleno Sanitario La Esmeralda, tomando como referente los resultados obtenidos en el Relleno Sanitario de Antanas.

1.4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA

El relleno sanitario La Esmeralda es un relleno de residuos sólidos municipales localizado en el kilómetro 2 de la carretera Manizales-Neira. El lugar cuenta con 54 hectáreas (ha), de las cuales 6.4 ha serán dedicadas a la de disposición de residuos sólidos. El clima en esta área es considerado semitropical con una precipitación anual de aproximadamente 2.000 mm/año.

El relleno comenzó a recibir residuos en 1991. Hasta la fecha, aproximadamente 1.25 millones de toneladas de residuos han sido aceptadas. El relleno tiene un capacidad total de aproximadamente 2.84 millones de toneladas. Actualmente, el relleno sanitario acepta cerca de 400 toneladas diariamente. Considerando un aumento anual de 1.0 por ciento en la disposición, el relleno sanitario alcanzará su máxima capacidad en 2015.

La apertura del relleno sanitario fue en 1991. Hasta la fecha, aproximadamente 1.25 millones de toneladas de residuos han sido aceptadas. El relleno tiene un capacidad total de aproximadamente 2.84 millones de toneladas. Actualmente, el relleno sanitario acepta cerca de 400 toneladas diariamente, considerando su capacidad de recepción el relleno alcanzara su capacidad actual en el 2015. Sin embargo el relleno sanitario está contemplando una expansión, la cual extendería

la vida hasta el 2035 y incrementaría la capacidad total de 6.1 millones. (Ver anexos B y C)

La construcción del relleno sanitario consistió en excavar hasta los tres metros de profundidad del nivel existente y la instalación de una capa de arcilla de baja permeabilidad en la base. Sobre esta capa de arcilla, una geomembrana de 60 mil fue instalada. Los taludes del relleno sanitario tienen una inclinación del talud aproximadamente 4 Verticales a 1Horizontales. Actualmente, los residuos sólidos municipales son depositados en las celdas numero 2 y 3 y estas tiene una profundidad promedio de 25 metros (Anexo I).

Las operaciones relleno sanitario son manejadas por la Empresa Metropolitana de Aseo S.A. E.S.P. (EMAS) y son consideradas como operaciones modernas en Colombia. (www.emas.com.co).

1.5 ALCANCES INVESTIGATIVOS

Por medio de esta investigación y con el acompañamiento de la empresa Metropolitana de aseo EMAS se busca evaluar el proyecto de quemado de biogás como está planteado en el relleno sanitario La Esmeralda y comparar su efectividad en cuanto a niveles de producción con otros rellenos en los cuales se aplique el modelo colombiano de biogás.

El grupo SALA del cual hace parte EMAS viene desarrollando a nivel nacional diferentes programas con el fin de mejorar la eficiencia de los programas de gestión de residuos sólidos y de generar estrategias para mitigar los agentes contaminantes principales que se dan después de la disposición final de los residuos sólidos en el relleno, los cuales son la generación de lixiviados y de biogás, ambos a partir de la descomposición anaeróbica de dichos residuos.

Conociendo estos programas y específicamente el desarrollado en La Esmeralda de Manizales, esta investigación tiene como alcance la evaluación del proyecto de quemado de biogás y la generación a partir de éste, de bonos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (CERs) y la posibilidad de replicación de este modelo en otros rellenos sanitarios del país.

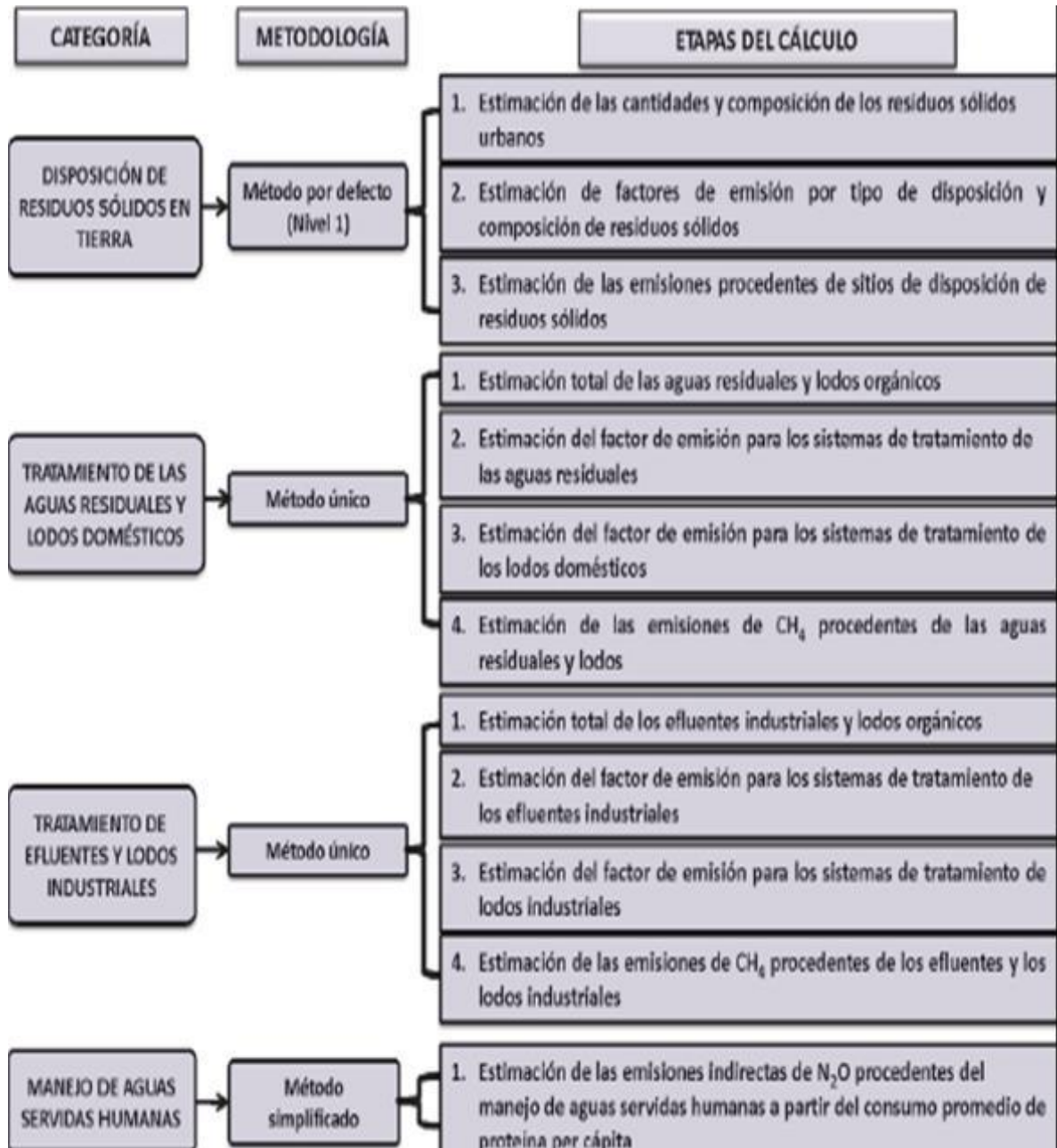
1.6 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

El instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales (IDEAM) realizo conjuntamente con el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial un inventario que evaluaba el período 2000–2004 sobre los Gases de Efecto Invernadero (GEI) generados por la disposición final de los RSU en los rellenos sanitarios del país, plantas de tratamiento de aguas residuales, efluentes industriales y aguas servidas.

Los rellenos sanitarios constituyen uno de los métodos más utilizados para la mitigación de impactos ambientales como es la sobre producción de residuos sólidos urbanos en todo tipo de asentamientos y núcleos poblacionales; pero es a su vez una fuente importante de emisión de sustancias contaminantes al medio atmosférico; durante la descomposición anaeróbica de los materiales orgánicos se producen grandes cantidades de metano (CH_4), pero esta fuente de energía normalmente se vuelve a oxidar, como sucede en la mayoría de ambientes acuáticos, o se pierde a la atmósfera, como ocurre en gran parte de ambientes terrestres, lo que genera procesos de contaminación derivados de los procesos del relleno sanitario, así este se encuentre manejado bajo la normatividad vigente, es un proceso inherente a los RSU y no se puede evitar.

Las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático o IPCC por sus siglas en ingles para los inventarios nacionales de GEI, describen dos métodos para estimar las emisiones de metano (CH_4) procedentes de los sitios de disposición de residuos sólidos: el método por defecto u omisión (nivel 1), con el supuesto de que la totalidad del CH_4 potencial se libera durante el año en el que se produce la disposición de los desechos, y el método de descomposición de primer orden (DPO, nivel 2), el cual produce un perfil de emisión que depende del tiempo transcurrido y que refleja mejor las verdaderas pautas del proceso de degradación a lo largo del tiempo (Pedraza *et al*, 2009). (Ver figura 1).

Figura 1. Metodología y etapas del cálculo para las emisiones de GEI, años 2000 y 2004. IDEAM.

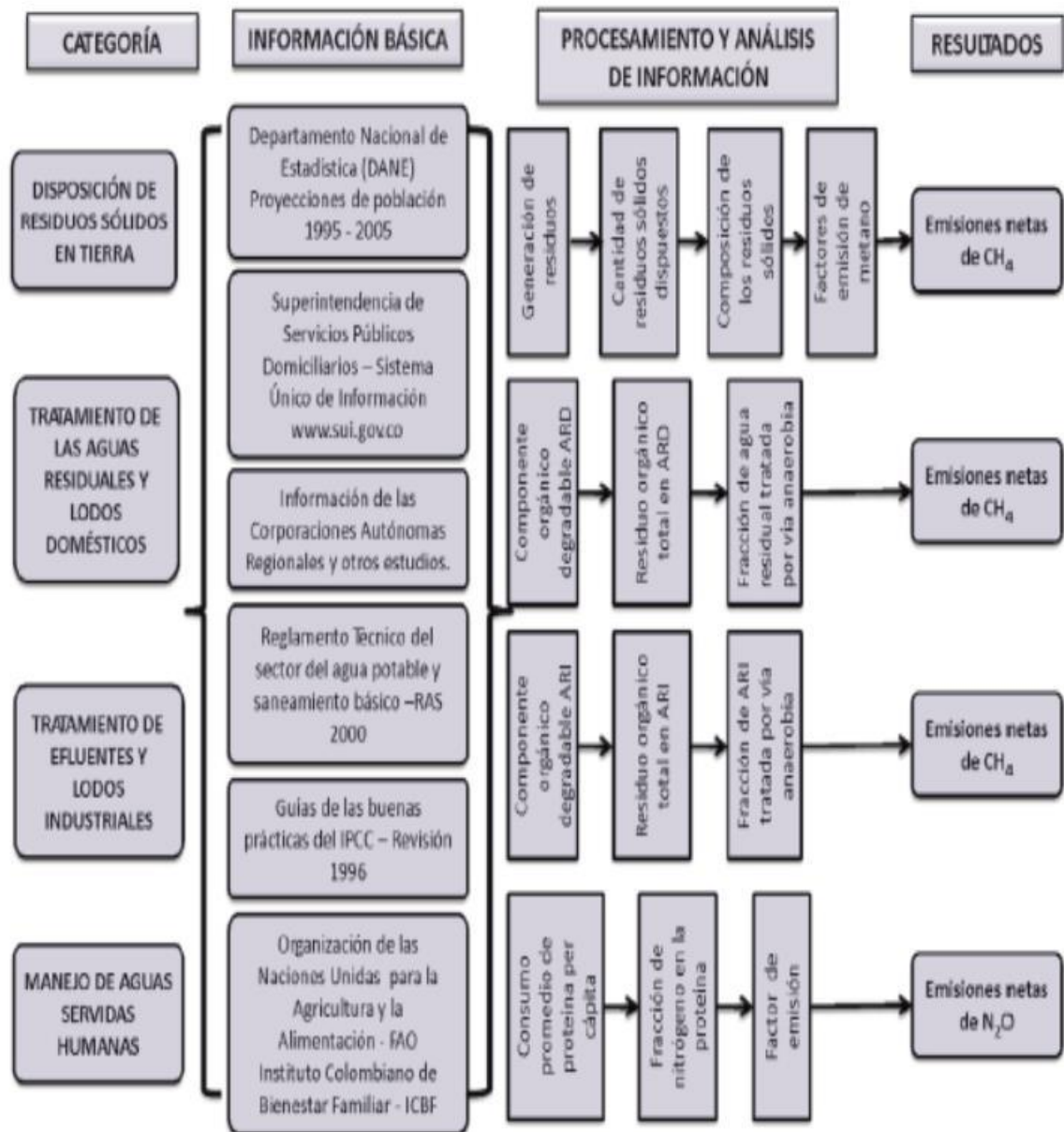


Fuente: Pedraza *et al.*, 2009.

Los resultados del cálculo de emisiones de metano se obtuvieron a partir de la aplicación de los factores de emisión propuestos por el IPCC para la disposición

de residuos sólidos teniendo en cuenta los datos de las cantidades tratadas y dispuestas, la fracción de componente orgánico degradable, la fracción de carbono liberado como metano y los factores de corrección de emisión de metano por tipo de disposición o tratamiento (ver figura 2).

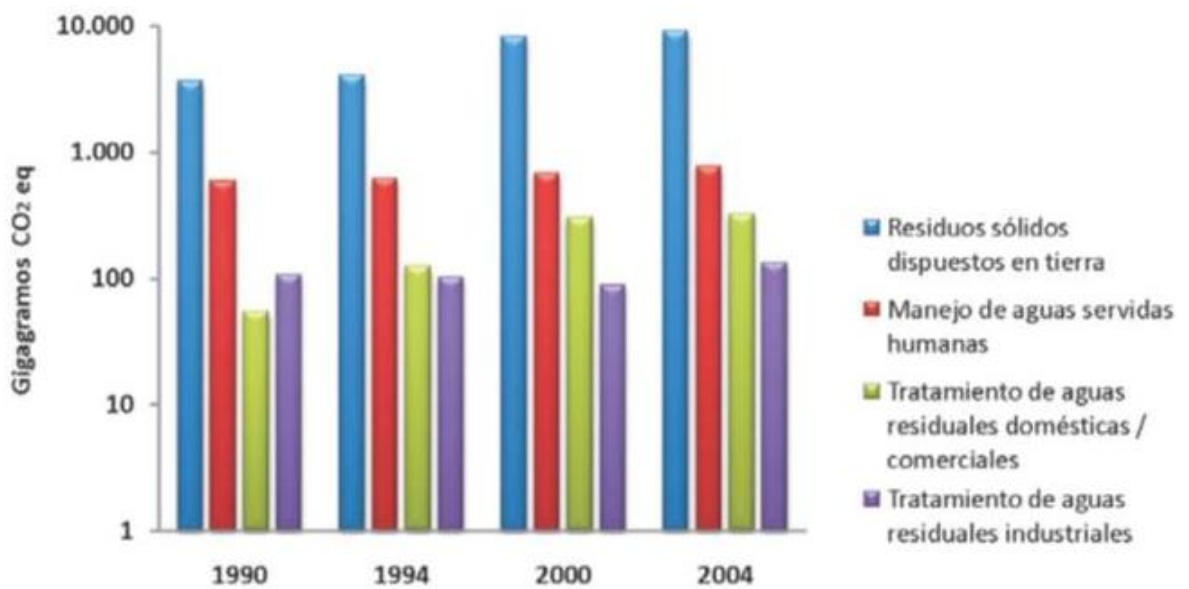
Figura 2. Estructura de cálculo de las emisiones de GEI, años 2000 y 2004. IDEAM.



Fuente: Pedraza *et al.*, 2009.

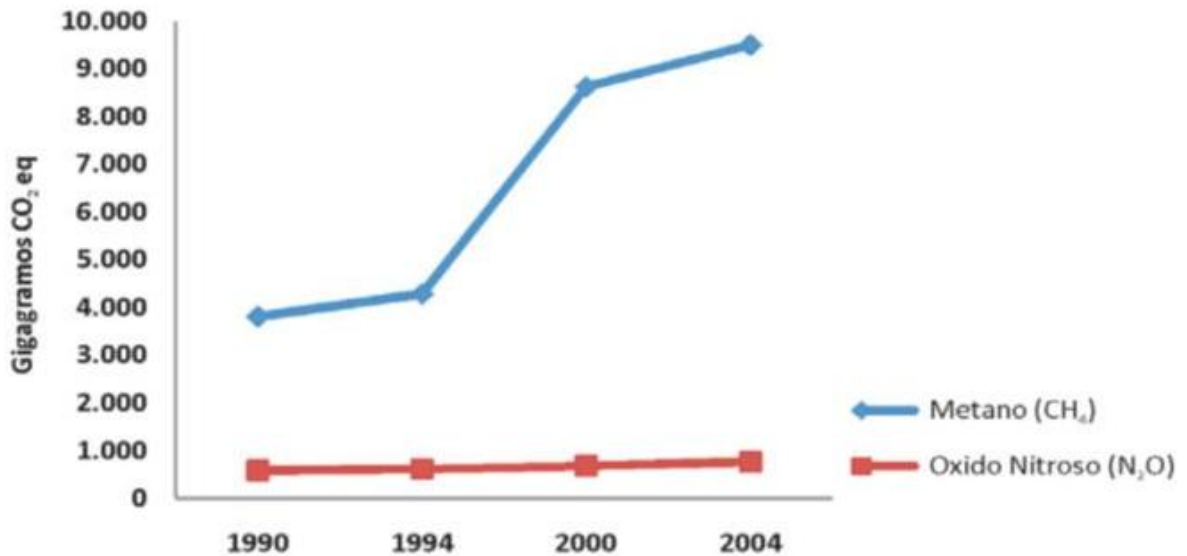
Con base en estos estudios el IDEAM en el período 2000-2004 determino la cantidad de GEI que se producían en cada una de las actividades objetos del estudio encontrándose que la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios es que mayor niveles de metano (CH₄) emite a la atmósfera, sin importar que esté manejado de acuerdo a las condiciones exigidas por la ley como lo muestran las figuras 3 y 4.

Figura 3. Comportamiento de las emisiones por fuente de emisión en unidades de Gg CO₂ eq, años 1990, 1994, 2000 y 2004.



Fuente: IDEAM, 2008.

Figura 4. Emisiones por gas en unidades de Gg CO₂ eq, años 1990, 1994, 2000 y 2004.



Fuente: IDEAM, 2008.

El Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero para el año 2000 se estimó con 410,86 Gigagramos (Gg) de metano y para el año 2004 con 452,67 Gg de metano, lo cual representa un incremento de 10,2% en las emisiones generados por la disposición en tierra de residuos sólidos (Pedraza *et al.*, 2009).

Por lo que se hace necesario desarrollar metodologías de tratamiento para estos subproductos de los proceso de los rellenos sanitarios en la búsqueda de reducir la emisión de los GEI.

Dentro de estas alternativas se encuentra el quemado de biogás; el biogás se escapa del relleno sanitario naturalmente de dos maneras: migración por el terreno adyacente o ventilación por la cubierta; en ambos casos, sin controles y sin captura, el biogás (y el metano) alcanzará la atmósfera. El volumen e índice de las emisiones del metano de un relleno es relacionado con la cantidad total de materia orgánica dispuesta en el relleno y su contenido húmedo, técnicas de compresión, temperatura, tipo de residuos sólidos y tamaño de las partículas. Aunque el índice de emisión de metano disminuye con la clausura del relleno (según la materia orgánica vaya siendo agotada), el relleno usualmente continua emitiendo metano por años (20 años o más) después ser clausurado.

Un método común para controlar las emisiones del biogás es la instalación de un sistema de colección y control del biogás. Estos sistemas tienen aparatos diseñados para la destrucción (o tratamiento) del metano y compuestos orgánicos volátiles (VOC) antes de ser emitidos a la atmósfera.

El biogás considerado de buena calidad es aquel con alto contenido de metano y bajos niveles de oxígeno y nitrógeno, éste puede ser utilizado como combustible para desplazar el uso de hidrocarburos convencionales u otros tipos de combustibles. El poder calorífico del metano cae entre los 400 y 600 BTUs (por sus siglas en inglés, *British Thermal Unit*, unidades térmicas británicas) por pies cúbico estandarizado (scf), la cual es aproximadamente la mitad del poder calorífico del gas natural. Existen cientos de instalaciones de recuperación de energía de biogás actualmente operando en los Estados Unidos. Los usos para el biogás caen entre las siguientes categorías: generación eléctrica, uso directo como combustible para calentamiento/calderas, tratamiento para convertirlo a gas de alto BTU y otros usos tales como combustible para vehículos (SGS *Engineers*, 2005).

1.7 JUSTIFICACIÓN

La disposición final de los RSU es una compleja actividad donde los procesos de tratamiento de los subproductos generados del mismo, generan dificultades en la labor de controlar las emisiones de sustancias contaminantes al medio atmosférico, para así intentar garantizar que las operaciones del relleno sanitario no causen estragos en el ambiente de poblaciones aledañas.

Partiendo de la problemática mundial generada por los gases de efecto de invernadero (GEI) y de los altos niveles que de éstos se generan por la transformación anaeróbica de los residuos sólidos urbanos (RSU) en los rellenos sanitarios, se hace importante el desarrollo de proyectos de transformación de este biogás generado en gases menos contaminantes y a futuro en que éstos se vuelvan en una fuente de energía y así disminuir los niveles de contaminación y generar alternativas de producción más limpia para incluir dentro de los programas de manejo de los rellenos sanitarios.

La Empresa Metropolitana de Aseo EMAS S.A. E.S.P. del municipio de Manizales perteneciente al grupo SALA, tiene a su cargo el proceso de gestión de residuos sólidos urbanos del casco urbano y rural de la ciudad y algunos municipios aledaños, los cuales son depositados técnicamente en el relleno sanitario La

Esmeralda, éste se maneja dentro de las políticas y normas de cumplimiento establecidas en los Reglamentos técnicos del sector Agua potable y Saneamiento básico (RAS) y PGIRS. Dentro de sus lineamientos internos de mejora se desarrollo un programa de quemado de biogás con el fin de mitigar los impactos generados por el mismo.

La generación de programas de transformación de biogás generado por los rellenos sanitarios es una alternativa viable en aras de disminuir los GEI y puede ser una alternativa dentro de los planes gubernamentales para medir y posteriormente disminuir la huella de carbono de una ciudad.

1.8 OBJETIVOS

1.8.1 Objetivo general

- Evaluar el proyecto de quemado de biogás en el Relleno Sanitario La Esmeralda desde el punto de vista de la gestión en producción más limpia y la posibilidad de replicación en otros rellenos sanitarios del país de Modelo Colombiano de Biogás.

1.8.2 Objetivos específicos

- Caracterizar de forma física los tipos de residuos sólidos depositados en el relleno sanitario La Esmeralda.

- Comparar el modelo colombiano de biogás con la aplicación del IPCC para modelos de MDL.

- Relacionar los resultados del modelo Colombiano de biogás del relleno Sanitario La Esmeralda con los arrojados en el relleno sanitario Antanas de Pasto con el fin de comparar la capacidad de producción de biogás en dos ciudades de características similares.

- Analizar el modelo colombiano de biogás frente a las oportunidades de generación de energía en Colombia.

- Evaluar la aplicabilidad del modelo colombiano de biogás en los rellenos sanitarios del país desde el punto de vista de la gestión ambiental y los Planes de Gestión de Residuos Sólidos.

1.9 HIPÓTESIS Y VARIABLES

Es viable la generación de bonos de Reducciones Certificadas de Emisiones (CERs) a partir del proyecto de quemado de biogás desarrollado en el Relleno Sanitario La Esmeralda de Manizales y su posterior aplicación en otros rellenos sanitarios del país.

2. MARCO TEÓRICO

El relleno sanitario La Esmeralda es un relleno de residuos sólidos municipales localizado en el kilómetro 2 de la carretera Manizales-Neira. El lugar cuenta con 54 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.

2.1 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Los residuos sólidos urbanos, consisten en residuos sólidos orgánicos que se vuelven combustibles después de la transformación anaeróbica a través de bacterias e inorgánicos comunes (sin contar con los llamados residuos peligrosos) incombustibles de zonas residenciales y de establecimientos comerciales; típicamente la fracción orgánica de los residuos sólidos domésticos y comerciales está formado por materiales como residuos de comida, papel y todo tipo de cartón, plástico de todo tipo, textiles, goma, cuero, madera y residuos de jardín. La fracción inorgánica está formada por artículos como vidrio, cerámica, latas, aluminio, metales féreos. Los residuos sólidos totales de una comunidad están compuestos por, la porción doméstica y porción comercial, constituyen cerca de un 50 a 75% del total de los RSU generados en una comunidad. La distribución porcentual dependerá de 1) la extensión de las actividades de construcción demolición, 2) la extensión de los servicios municipales suministrados, 3) tipos de procesos de tratamientos de agua y aguas negras que son utilizados. La amplia variedad en la categoría de residuos especiales (3 al 12%) es debida a que en muchas comunidades los residuos de jardín son recogidos separadamente. El porcentaje de residuos de la construcción y de demolición varía considerablemente según la parte del país y la salud general de la economía local, estatal y nacional. El porcentaje de fangos de las plantas de tratamiento también variará según la extensión y el tipo de tratamiento suministrado para el agua y las aguas negras (Tchobanoglous, George *et al.*, 1998). Ver tabla 1.

Tabla 1. Fuentes y tipos de residuos sólidos en la comunidad

Fuente	Instalaciones, actividades o localización donde se generan	Tipos de residuos sólidos
Doméstica	Viviendas aisladas y bloques de baja, mediana y elevada altura, unifamiliares y multifamiliares.	Residuos de comida, papel, cartón, plásticos, textiles, cuero, residuos de jardín, madera, vidrio, latas de aluminio, cenizas, hojas de la calle, residuos especiales (artículos voluminosos, electrodomésticos, baterías, pilas, aceite, neumáticos) residuos domésticos peligrosos.
Comercial	Tiendas, restaurantes, mercados, edificios de oficinas, hoteles, moteles, imprentas, gasolineras, talleres de mecánica, etc.	Papel, cartón, plásticos, madera, residuos de comida, vidrio, metales, residuos especiales, residuos peligrosos, etc.
Institucional	Escuelas, hospitales, cárceles, centros gubernamentales.	Como en comercial.
Construcción y demolición	Lugares nuevos de construcción, lugares de reparación/renovación de carreteras, derribos de edificios, pavimentos rotos.	Madera, acero, hormigón, suciedad, etc.
Servicios municipales (excluyendo plantas de tratamiento)	Limpieza de calles, paisajismo, limpieza de cuencas, parques, playas, y otras zonas de recreo.	Residuos especiales, basuras, barraduras de la calle, recortes de árboles y plantas, residuos de cuencas, residuos generales de parques, playas y zonas de recreo
Plantas de tratamiento, incineradoras municipales	Agua, aguas residuales y procesos de tratamiento industrial	Residuos de plantas de tratamiento compuestos principalmente de fangos.
Residuos sólidos urbanos	Todos los citados.	Todos los citados.
Industrial	Construcción, fabricación ligera y pesada, refinerías, plantas químicas, centrales térmicas, demolición, etc.	Residuos de procesos industriales, materiales de chatarra etc., residuos no industriales incluyendo residuos de comida, basuras, ceniza, residuos de demolición, y construcción, residuos especiales y peligros.
Agrícolas	Cosechas de campo, árboles frutales, viñedos, ganadería intensiva, granjas etc.	Residuos de comida, residuos agrícolas, residuos peligrosos (envases de agroquímicos)

Fuente: Tchobanoglous, George *et al.*, 1998.

La generación de residuos por parte de todas las actividades humanas pero en especial los generados en el ámbito urbano representan un alto potencial de contaminación que afecta y deteriora el medio ambiente en varios niveles, por lo tanto su gestión debe ser considerada de acción prioritaria.

El conocimiento de las cantidades de residuos generados, aprovechados, tratados y dispuestos, permite su manejo integral, con este tipo de manejo se facilita la determinación de prioridades de gestión, ubicación espacial de los generadores, identificación de oportunidades de inversión en infraestructura y aprovechamiento, evaluación del potencial del impacto social y ambiental (Saldarriaga *et al.*, 2009).

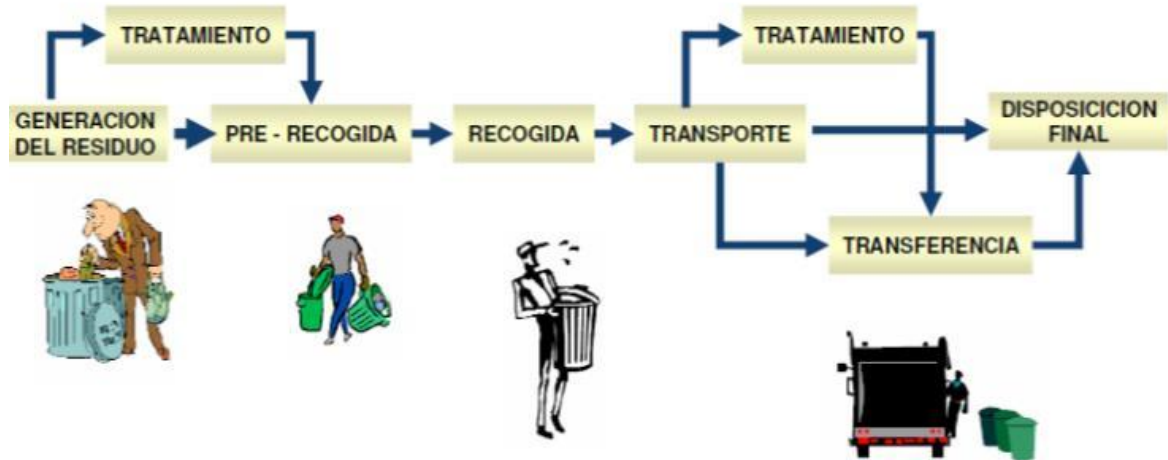
Tabla 2. Distribución de componentes de los RSU domésticos en países de bajos, medianos y altos ingresos, excluyendo materiales reciclados.

Componente	Países de ingresos		
	Bajos	Medianos	Altos
Orgánicos			
Residuos de comida	40-85%	20-65%	6-30%
Papel y cartón	1-10%	8-30%	20 – 45%
Textiles	1-5%	2-6%	2 – 8%
Cuero	1-5%	2-10%	2 – 6%
Residuos de jardín, madera, orgánicos misceláneos	1-5%	1-10%	0-2%, 0-2%, 10-20%, 1-4%
Inorgánicos			
Vidrio	1-10%	1-10%	4-10%
Latas de hojalata	-	-	2-8%
Aluminio	1-5%	1-5%	0-1%
Otros metales	-	-	1-4%
Suciedad, cenizas, etc.	1-40%	1-30%	0-10%

Fuente: Tchobanoglous, George *et al.*, 1998.

Históricamente el relleno sanitario se ha aceptado desde el punto de vista económico como la forma más adecuada del manejo de los residuos sólidos urbanos (RSU); el relleno sanitario debe contar con unas celdas preparadas mediante compactación, impermeabilización y nivelación de forma tal que se puedan instalar sistemas de drenajes que evitan la percolación de los lixiviados y extracción del biogás generados por los residuos sólidos en descomposición (Tchobanoglous, George *et al.*, 1998).

Figura 5. Elementos funcionales de una gestión de residuos sólidos.



Fuente: Szanto, 2010.

2.2 PROPIEDADES DE LOS RSU

2.2.1 Propiedades físicas

2.2.1.1 PESO ESPECÍFICO. Se define como el peso de un material por unidad de volumen. Las unidades que más se utilizan son: Gramo fuerza por centímetro cúbico (gf/cm^3) y Kilogramo fuerza por metro cúbico (Kg/m^3). Numéricamente, el peso específico es igual que la densidad.

El peso específico de los RSU debe ser indicado si está referido a residuos sueltos, compactados o semicompactados. Ver tabla 3.

Tabla 3. Peso específicos según el tipo de residuos.

Tipos de residuos	Peso específico Kg/cm ³	
	Rango	Típico
Domésticos (no compactados)		
Residuos de comida (mezclados)	13 – 481	291
Papel	42 – 131	89
Cartón	42 – 80	50
Plásticos	42 – 131	65
Textiles	42 – 101	131
Cuero	10 – 261	160
Residuos de jardín	59 – 225	101
Madera	131 – 320	237
Vidrio	160 – 481	196
Latas de hojalata	50 – 160	89
Aluminio	65 – 240	160
Otros materiales	131 – 1.151	320

Fuente: Tchobanoglous, George *et al.*, 1998.

2.2.1.2 CONTENIDO DE HUMEDAD. Éste se puede expresar de dos formas:

Como peso-húmedo, donde la humedad de una muestra se expresa como el porcentaje de material húmedo. Como peso-seco, se expresa como un porcentaje de peso seco de material (Fernández, 2005).

2.2.1.3 PERMEABILIDAD DE LOS RESIDUOS COMPACTADOS.

Es la conductividad hidrológica de los residuos compactados. Esta propiedad influye en el movimiento de líquidos y gases dentro de un vertedero (Fernández, 2005)

2.2.2 PROPIEDADES QUÍMICAS. Las propiedades químicas son importantes para evaluar las opciones de procesamiento y recuperación de los RSU. (Fernández, 2005).

2.2.3 Análisis físico

- Humedad: es la pérdida de agua de la muestra cuando se calienta a 105°C durante una hora.

- Materia volátil combustible: es la pérdida de peso adicional a 950°C en un crisol cubierto.

- Carbono fijo: es el rechazo combustible dejado después de retirar la materia volátil.

- Ceniza: es el peso del rechazo después de la incineración en un crisol abierto.

2.2.4 ANÁLISIS ELEMENTAL DE LOS COMPONENTES DE RESIDUOS SÓLIDOS.

Implica la determinación del porcentaje de los elementos C, H, O, N, S y ceniza. Se puede incluir la determinación de halógenos en el AE (ver tabla 4). Este análisis se utiliza para caracterizar la composición química de la materia orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU). (Tchobanoglous, George *et al.*, 1998).

Tabla 4. Datos típicos del análisis elemental de los componentes combustibles de los RSU domésticos.

Componentes	Porcentaje en peso (base seca)					
	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
Orgánicos						
Residuos de comida	48	6,4	37,6	2,6	0,4	5
Papel	43,5	6	44	0,3	0,2	6

Cartón	44	5,9	44,6	0,3	0,2	5
Plásticos	60	7,2	22,8			10
Textiles	55	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
Cuero	60	8	11,6	10	0,4	10
Residuos de jardín	47,8	6	38	3,4	0,3	4,5
Madera	49,5	6	42,7	0,2	0,1	1,5
Inorgánicos						
Vidrio	0,5	0,1	0,4	<0,1		98,9
Metales	4,5	0,6	4,3	<0,1		90,5
Suciedades, etc.	26,3	3	2	0,5	0,2	68

Fuente: Tchobanoglous, George *et al.*, 1998.

Nutrientes esenciales y otros elementos: Este análisis es importante cuando la fracción orgánica de los RSU se va a utilizar como alimentación para la elaboración de productos biológicos de conversión como por ejemplo, compost, metano y etanol (Tchobanoglous, George *et al.*, 1998).

2.2.4 PROPIEDADES BIOLÓGICAS. La característica biológica más importante de la fracción orgánica es que sus componentes orgánicos pueden ser convertidos biológicamente en sólidos orgánicos e inorgánicos relativamente inertes. (Fernández, 2005).

La biodegradabilidad se determina en función al contenido de lignina de un residuo (ver tablas 5 y 6).

Tabla 5. Datos sobre la fracción biodegradable de componentes seleccionados de residuos orgánicos basándose en el contenido de lignina.

Componente	Sólidos volátiles (SV) porcentaje de residuos sólidos totales (ST)	Contenido de lignina (CL) porcentaje de SV	Fracción biodegradable (FV) ^a
Residuos de comida		0.4	0.82

Papel periódico	94	21.9	0.22
Papel de oficina	96.4	0.4	0.82
Cartón	94	12.9	0.47
Residuos de jardín	50 – 90	4.1	0.72

Fuente: Tchobanoglous, George *et al.*, 1998.

Tabla 6. Transformaciones físicas, químicas y biológicas de los residuos sólidos.

Proceso de transformación	Medio o método de transformación	Productos principales de la conversión o transformación
Físico		
Separación de componente.	Separación manual y/o mecánica.	Componentes individuales encontrados en los residuos urbanos no seleccionados.
Reducción en volumen.	Aplicación de energía en forma de fuerza o presión.	Reducción de volumen de los residuos originales.
Reducción de tamaño.	Aplicación de energía en forma de trituración.	Alteración de la forma y reducción de tamaño de los componentes residuales. originales
Químico		
Combustión.	Oxidación técnica.	Dióxido de carbono (CO ₂), dióxido de azufre (SO ₂) y otros productos de oxidación.
Pirólisis.	Destilación destructiva.	Una corriente de gas que contiene una variedad de gases, alquitrán y/o aceite y un combustible carbonoso.
Gasificación.	Combustión con defecto de aire.	Un gas de bajo poder calórico, un combustible que contiene carbono e inertes, originalmente en el combustible y aceite pirólico.
Biológico		
Aeróbico.	Conversión biológica aeróbica.	Compost (material utilizado como adicionador de suelo).

Digestión anaerobia (baja o alto contenido de sólidos).	Conversión biológica aeróbica.	Metano (CH ₄), dióxido de carbono (CO ₂), trazas de otros gases, humus o fangos digeridos.
Aeróbico.	Conversión biológica aeróbica utilizando lombrices.	Humus de lombriz.

Fuente: TCHOBANOGLOUS, George *et al.*, 1998.

2.3 ¿QUÉ ES EL BIOGÁS?

Es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismo y otros factores, en ausencia de oxígeno (ambiente anaeróbico). La producción de biogás por descomposición anaeróbica es un modo considerado útil para tratar residuos biodegradables, ya que produce un combustible de valor además de generar un efluente que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono genérico.

El resultado es una mezcla constituida por metano (CH₄) en una proporción que oscila entre un 40% y un 70%, y dióxido de carbono (CO₂), conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H₂), nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S). El biogás tiene como promedio un poder calorífico entre 18,8 y 23,4 mega julios por m³. (Hoffman, 2010)

Existen básicamente dos procesos de conversión de basura en energía, éstos son los de tipo biológico y los de tipo térmico. Los primeros son efectuados por bacterias mediante el proceso de digestión anaerobia, donde descomponen de manera natural la parte orgánica de la basura en ausencia de aire. Este proceso ocurre en rellenos sanitarios así como en tanques o reactores donde se acelera el proceso anterior, en el que se genera una mezcla de gases mejor conocida como biogás cuyo componente principal es el metano (CH₄), También encontrado en el gas natural y el segundo gas más importante de efecto invernadero equivalente 21 veces al dióxido de carbono. Los procesos térmicos como la incineración, la pirólisis, la gasificación a baja temperatura y la gasificación en arco de plasma se caracteriza por la conversión del carbono contenido en la basura bajo diferentes condiciones de temperatura y presencia de aire, sin embargo la tecnología es muy cara para su fácil implementación en el país.

El biogás generado en los rellenos sanitarios es una mezcla de gases que contiene un 50% de metano, 45% de bióxido de carbono y menores cantidades de

oxígeno, nitrógeno, vapor de agua y ácido sulfhídrico, así como una variedad de gases en cantidad de trazas (Arvizu, 2010).

Este puede ser recuperado mediante la instalación de un sistema de captura de biogás que generalmente quema el biogás en antorchas. Alternativamente, el biogás capturado puede ser usado benéficamente como combustible en equipos como motogeneradores de combustión interna, microturbinas, calderas, y otros que usan el biogás para generación de energía eléctrica o térmica. Además de los beneficios energéticos del uso del biogás, la captura de este biogás ayuda a reducir las emisiones que son emitidas al ambiente. La Agencia Norteamericana de Protección del Medio Ambiente (USEPA, por sus siglas en inglés) ha determinado que las emisiones de biogás de rellenos sanitarios municipales causan o contribuyen significativamente a la contaminación del aire que potencialmente puede causar daños a la salud pública. Algunos de los contaminantes contenidos en el biogás se suponen son carcinógenos, o pueden causar otros efectos adversos a la salud. Algunos problemas para el bienestar público incluyen el mal olor del biogás y el potencial de migración del mismo dentro y fuera de la propiedad del relleno sanitario que podría causar incendios y/o explosiones, el metano emitido por rellenos sanitarios también causa problemas por ser un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático global (Stegel, 2011).

La composición típica del biogás consiste en:

- Metano (CH_4): 50 a 60%.
- Dióxido de carbono (CO_2): 40 a 45%.
- Compuestos orgánicos no metánicos (NMOCs): Trazas.
- Poder calórico: 4166 Kcal/ Nm^3 (condiciones normales de presión/ m^3).
- Contenido de humedad: Saturado.

Factores principales que afectan la producción de biogás (Weihs-ARS, 2010):

- Cantidad de residuos depositados por año.
- Composición de los desechos.
- Contenido de desechos orgánicos (fracción biodegradable).
- Humedad en los desechos.
- Tasa de degradación de los residuos.
- Temperatura de la masa de los residuos.
- Precipitación anual del sitio.
- Operación y mantenimiento que afectan al generación del biogás:
- Compactación.
- Cobertura diaria.
- Control de lixiviados
- Cobertura final.

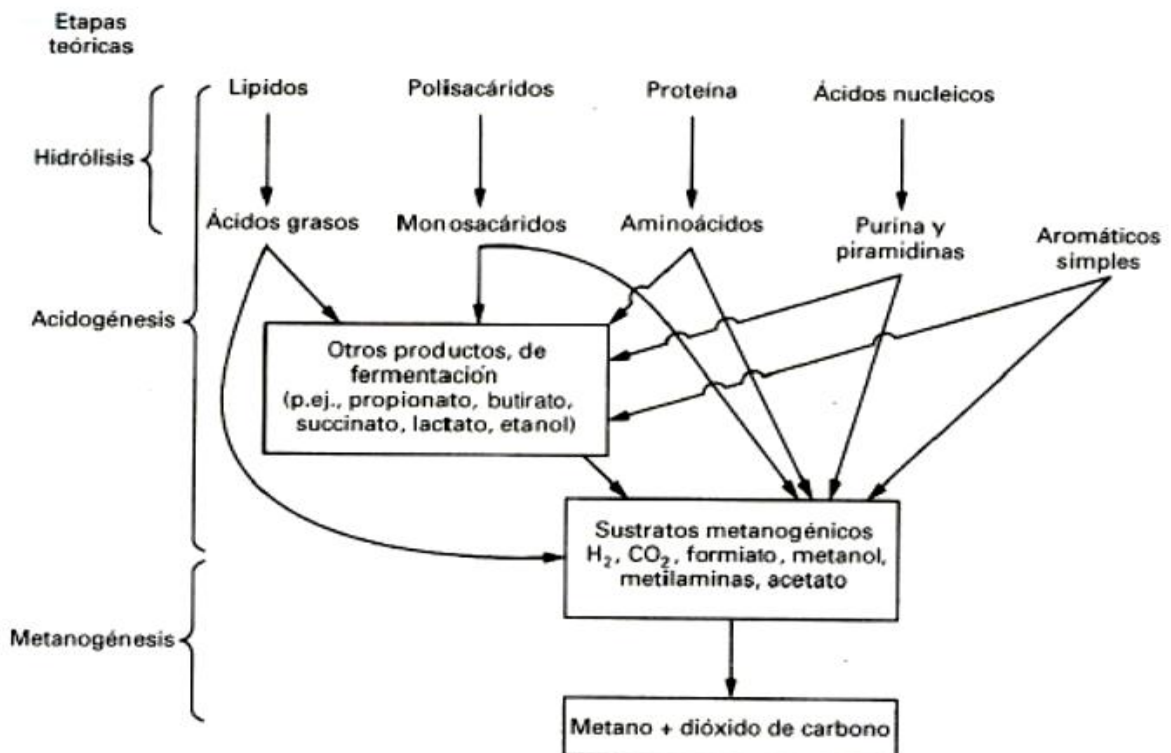
2.4 PROCESO DE GENERACIÓN DE BIOGÁS EN UN RELLENO SANITARIO

Se considera que la generación de los principales gases del relleno se produce en cinco o menos fases secuenciales. A continuación se describe cada una de ellas:

2.4.1 FASE I - AJUSTE INICIAL. Es la fase, en la cual los componentes orgánicos biodegradables de los RSU sufren descomposición microbiana. En esta fase, la descomposición biológica se da bajo condiciones aerobias, porque hay cierta cantidad de aire atrapado dentro de las celdas del relleno sanitario donde son depositados los residuos. La fuente principal de organismos, aerobios y anaerobios, responsables de la descomposición de los residuos, es el suelo que se utiliza como cobertura diaria y final (ver figura 6)

2.4.2 FASE II - FASE DE TRANSICIÓN. En esta fase se reduce el oxígeno y comienzan a desarrollarse las condiciones anaerobias. Mientras la celda se convierte en anaerobio. Los miembros de la comunidad microbiana, responsables de la conversión orgánica de los RSU en metano y dióxido de carbono, empiezan un proceso de tres pasos que se inicia con la conversión del material orgánico complejo en ácidos orgánicos y otros productos intermedios.

Figura 6. Ruta de producción de metano y dióxido de carbono.



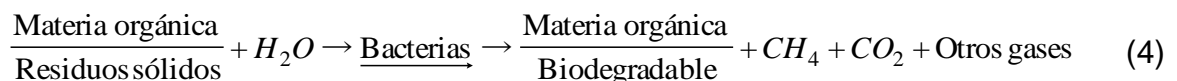
Fuente: Tchobanoglous, 1994.

2.4.3 FASE III - FASE ÁCIDA. Durante esta fase se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase II, con la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de hidrógeno. El primer paso implica la transformación, mediada por enzimas (hidrólisis), de compuestos con alto peso molecular (por ejemplo, lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos) en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos, como fuentes de energía y de carbono celular. El segundo paso (acidogénesis) implica la conversión microbiana de los compuestos resultantes del primer paso, en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el ácido acético (CH₃COOH) y las pequeñas concentraciones de ácido fúlvico y otros ácidos más complejos; el dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas generado durante la fase III, aunque también se producen cantidades más pequeñas de hidrógeno (H₂), los microorganismos implicados en esta conversión, llamados colectivamente no metanogénicos, son bacterias anaerobias.

2.4.4 FASE IV - FASE DE FERMENTACIÓN DEL METANO. En esta fase predomina un segundo grupo de microorganismos, que convierten el ácido acético y el hidrógeno (producidos en la fase ácida) en CH₄ y CO₂. En algunos casos, estos organismos comenzarán a desarrollarse hacia el final de la fase III; los microorganismos responsables de esta conversión son estrictamente anaerobios y se llaman metanogénicos o formadores de metano. En la fase IV la formación de metano y ácido se produce simultáneamente, aunque la velocidad de formación de ácidos es considerablemente más reducida.

2.4.5 FASE V - FASE DE MADURACIÓN. Se produce después de convertirse el material inorgánico biodegradable en CH₄ y CO₂ durante la fase IV. Mientras la humedad sigue migrando a través de los residuos, porciones del material biodegradable que anteriormente no estaban disponibles se van convirtiendo. Durante la fase V la velocidad de generación del gas del relleno, disminuye significativamente; porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado en las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el relleno son de una degradación lenta. Los principales gases del relleno que han evolucionado en la fase V son CH₄ y CO₂. Según las medidas de sellado de las celdas del relleno también pueden encontrarse pequeñas cantidades de nitrógeno y oxígeno en el gas.

La reacción química generalizada para la descomposición anaerobia de residuos sólidos puede escribirse de la forma siguiente:



Hay que resaltar que esta reacción requiere la presencia esencial del agua. (Tchobanoglous, 1994)

2.4.6 SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DEL BIOGÁS EN UN RELLENO SANITARIO. El gas de relleno producido se puede evacuar mediante drenaje activo o pasivo. El drenaje activo consiste en la succión del gas mediante un soplador. Cuando se hace el drenaje pasivo, se controla la difusión natural de los gases, con el fin de evacuarlos sólo por los lugares previstos. Se logra una mayor eficiencia con el drenaje activo, pero los costos del drenaje pasivo son mucho más bajos (ver tabla 7).

Tabla 7. Porcentaje de gas (%) de un relleno captado.

Porcentaje de gas de relleno que se puede captar (%)	Tipo de relleno
0	Relleno sin ningún sistema de drenaje de gas.
10-20	Relleno con drenaje puntual pasivo (chimeneas u orificios), mal compactado y sin cobertura suficiente.
25-50	Relleno con drenaje activo (soplador), mal compactado y sin cobertura suficiente.
30-60	Relleno con drenaje pasivo, bien compactado y con cobertura diaria suficiente.
40-70	Relleno con drenaje activo, bien compactado y con cobertura diaria suficiente.
70-100	Relleno cerrado con taludes y capa final impermeable y bien compactada, drenaje pasivo o activo.

Fuente: Roben, 2002.

Si se realiza el drenaje pasivo con pozos de desfogue, es muy importante que se queme el biogás que sale de las chimeneas, de lo contrario estas constituyen un peligro importante para los obreros en el relleno, porque los gases que salen pueden causar dolores de cabeza, náuseas (exposición corta, impacto a corto plazo), asfixia (casos extremos), daños al cerebro y al sistema nervioso (exposición durante largo tiempo) y graves daños al medio ambiente (Anexo G).

Los pozos de desfogue se pueden construir de dos maneras: La primera es una jaula de malla con cuatro puntales de madera y la segunda es un tubo perforado, ambos llenos de piedra o grava, esto para el drenaje pasivo. El relleno La

Esmeralda – Manizales cuenta con un sistema de quemado por chimeneas o pozos pasivos que permiten la salida con posterior combustión del gas generado para evitar explosiones por acumulación del mismo. (Ver figura 7)

Figura 7. Chimenea actual del relleno sanitario para drenaje pasivo del biogás del relleno sanitario La Esmeralda, Manizales, 2012.



Fuente: Las autoras, 2012.

En los sistemas de drenaje activo, se succiona el gas con un soplador que se conecta con los colectores de gas y los pozos de desfogue. Posteriormente los gases van por un sistema de tubería a un quemador ó a un sistema que consume de gas pobre (con mucha cantidad de CO₂ y otros gases) o a una planta de tratamiento de biogás para aprovecharlo posteriormente como gas dulce (con poca concentración de CO₂ y otros gases) en la generación de energía eléctrica. Este sistema es con el que se cuenta en el relleno sanitario de Antanas – Pasto. (Ver figura 8).

Figura 8. Conector de gas y pozos de desfogue sistemas de drenaje activo relleno sanitario Antanas, Pasto, 2012.



Fuente: Relleno Sanitario Antanas – Pasto, EMAS. 2012

Este quemado del biogás también se plantea como una alternativa económica para las empresas prestadoras del servicio de recolección y disposición de residuos sólidos urbanos (RSU) ya que uno de los objetivos es la venta de Reducciones Certificadas de Emisiones (CERs, por sus siglas en inglés), dado que los demás usos dados al biogás en estos momentos como combustible

2.5 MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS

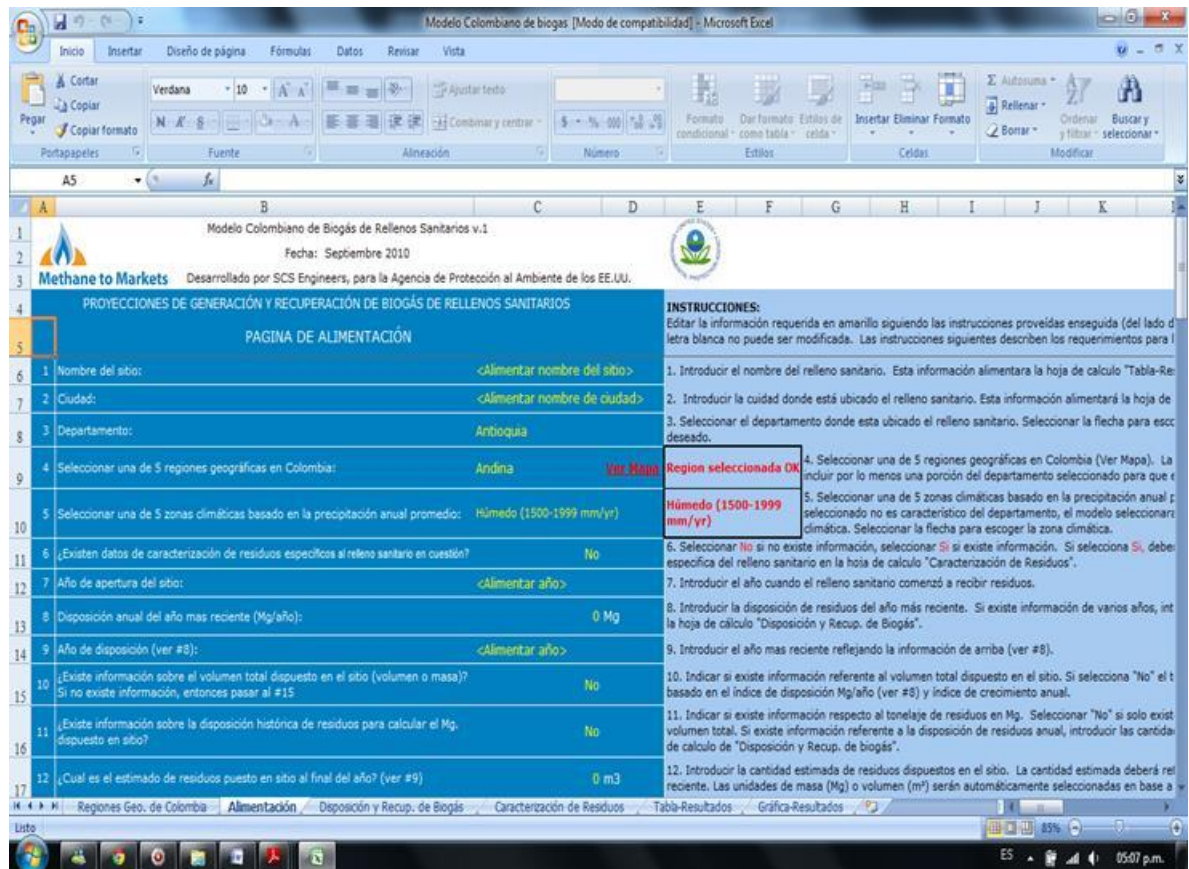
El programa LMOP (*Landfill Methane Outreach Program*) de la EPA de Estados Unidos desarrolló el Modelo Colombiano de Biogás para ayudar a operadores y dueños de rellenos sanitarios a evaluar la viabilidad y los beneficios en la captación y uso del biogás como fuente de energía. El modelo incorpora la estructura del Modelo de Desechos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático o Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) con algunas revisiones para que refleje de mejor forma las condiciones del clima y condiciones de los sitios de disposición final en Colombia.

El modelo proporciona valores precalculados 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.

El modelo, el cual es una hoja de cálculo en Excel, está acompañado por un Manual del Usuario (ver figura 9).

Figura 9. Hoja de cálculo en Excel del Modelo Colombiano de Biogás.



Fuente: <http://www.epa.gov/lmop/international/colombia.html>

El modelo usa la siguiente información para estimar la generación y recuperación del biogás en un relleno sanitario:

- La cantidad de residuos depositados en el relleno sanitario anualmente.

- El año de apertura y clausura del sitio.
- Índice de generación de metano (k).
- El factor de corrección de metano (MCF).
- El factor de ajuste por incendios (F).
- La eficiencia de recuperación del sistema de captura.

El modelo estima el índice de generación de biogás para cada año usando la ecuación de degradación de primer grado, la cual fue modificada por US EPA en el Modelo LandGEM versión 3.02 en el 2005 (SCS ENGINEERS, 2005).

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

- Donde:
- Q_{LFG} = Flujo de biogás máximo esperado (m³/año)
 - i = Incremento en tiempo de 1 año
 - n = (año del cálculo) - (año inicial de disposición de residuos)
 - j = Incremento de tiempo en 0.1 años
 - k = Índice de generación de metano (1/año)
 - L_0 = Generación potencial de metano (m³/Mg)
 - M_i = Masa de residuos dispuestos en el año i (Mg)
 - t_{ij} = Edad de las 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

La ecuación anterior estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a través de un año. La generación de biogás total es igual a dos veces la generación de metano calculada. La función de degradación exponencial asume que la generación de biogás está a su máximo un período antes que la generación de metano. El modelo asume un período de seis meses entre la colocación de los residuos y la generación de biogás. Por cada unidad de residuos, después de seis meses el modelo asume que la generación de biogás desciende exponencialmente conforme la fracción orgánica de los residuos es consumida. El año de generación máxima normalmente ocurre en el

año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales).

El modelo estima la generación y recuperación de biogás en metros cúbicos por hora (m^3/hr) y en pies cúbicos por minuto (pies^3/min). También estima el contenido de energía del biogás recuperado (en millones de unidades térmicas británicas por hora [mmBtu/hr]), la eficiencia de captura, la capacidad máxima de la planta de energía en megavatios (MW), y las toneladas de reducción de emisiones de CO_2 equivalente (CERs) (Stege, 2009).

2.5.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE GASIFICACIÓN. El sistema cuenta con una cubierta instalada sobre los residuos para así permitir optimizar la tasa de recuperación del gas del relleno, un sistema de tuberías recolectoras de gas, pozos, bombas de extracción y una antorcha de alta temperatura, un sistema de supervisión y un sistema de control de las variables de operación. El sistema de recolección del biogás está constituido por una red de pozos y tuberías interconectados, funcionando a partir de una depresión forzada (por medio de bombas de extracción acopladas a la antorcha desarrollada por la empresa suiza Hofstetter Umwelttechnik, unos de los líderes mundiales en esta tecnología y fabricantes de las antorchas más eficientes en el mercado).

2.5.2 GESTIÓN Y CONTROL DE OPERACIÓN. Para una adecuada operación y mantenimiento del sistema es necesario optimizar el funcionamiento del sistema con obtención de reducción de emisiones proyectadas a mantener o incrementar la capacidad operativa del sistema, demostrar la capacidad operativa mediante el control de las variables y minimizar la posibilidad de accidentes (Stege, 2009).

La definición y el cumplimiento de programas de operación y mantención, como los mencionados a continuación permiten un buen control y operación del sistema, actividades y proceso como:

- Chequeo y verificación de las variables en terreno.

- Registros de todas las variables operativas.

- Evaluación de condiciones operativas de acuerdo a procedimientos de operación.

Regulación de la red de recolección de biogás.

- Calibración de equipos de medición de gases en el sistema y analizador portátil.
- Registros de calibración de equipos.
- Verificación y análisis de datos adquiridos en el sistema de adquisición de datos.
- Validación de información de acuerdo a registros de terreno.

Con el cumplimiento de estos procesos, el control y la operación del sistema de desgasificación tendrán seguramente un funcionamiento óptimo del sistema y validación de información obtenida durante el proceso.

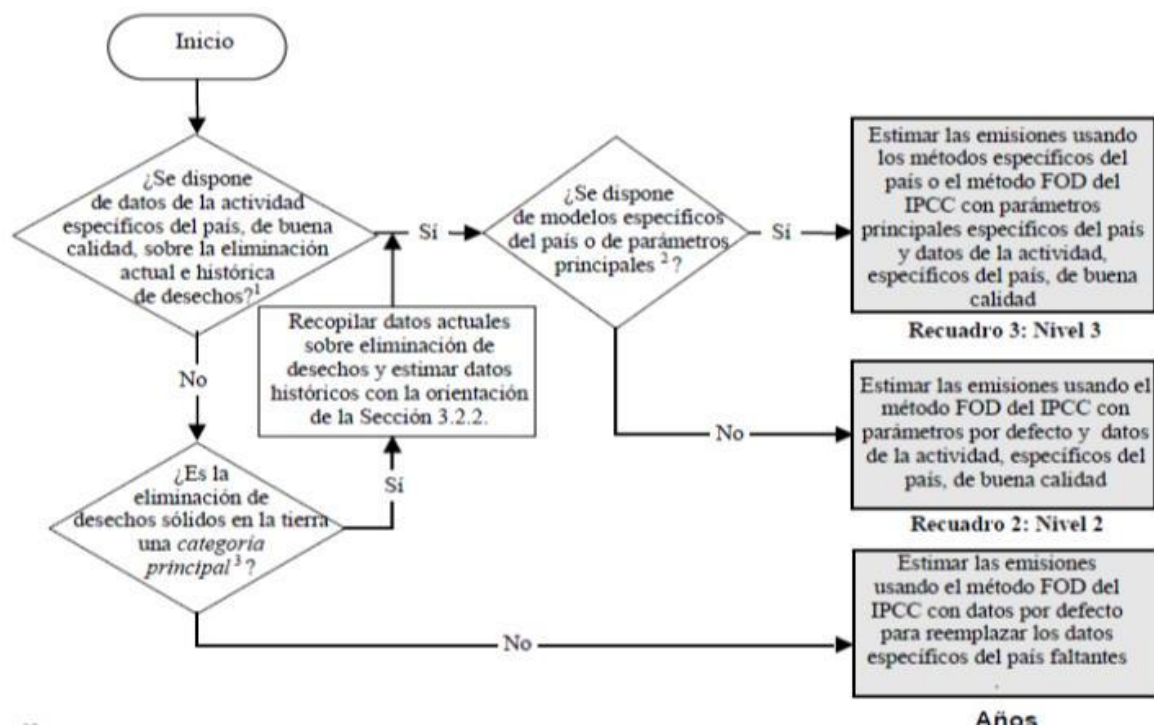
La valorización del biogás generado por los residuos sólidos urbanos, es controlada y supervisada desde el año 2005 por Bionersis S.A. una empresa franco-chilena especializada en el desarrollo de proyectos de valorización energética del biogás proveniente de residuos sólidos urbanos depositados en rellenos sanitarios o vertederos. Bionersis S.A. ingresó en la bolsa de París en julio de 2007; y desarrolla su trabajo en América Latina y Asia del Suroeste. Cuenta con sedes regionales en Chile, Argentina, Perú, Bolivia, República Dominicana, Brasil y Colombia. (SGS Engineers, 2005).

2.6 MODELO DEL IPCC

La metodología del IPCC (Panel intergubernamental del cambio climático por sus siglas en inglés) para estimar las emisiones de CH₄ provenientes de los RSU se basa en el método de descomposición de primer orden (FOD). En este método se formula la hipótesis de que el componente orgánico degradable (carbono orgánico degradable, COD) de los desechos se descompone lentamente a lo largo de unas pocas décadas, durante las cuales se forman el CH₄ y el CO₂. Si las condiciones permanecen constantes, el índice de producción del CH₄ depende únicamente de la cantidad de carbono restante en los desechos. De aquí resulta que las emisiones de CH₄ generadas por los desechos depositados en un relleno sanitario son las más altas durante los primeros 5 años siguientes a la eliminación y que, luego, éstas decaen a medida que el carbono degradable de los desechos es

consumido por las bacterias responsables de la descomposición. La transformación de la materia degradable de los RSU en CH₄ y CO₂ se produce a través de una cadena de reacciones y de reacciones paralelas. Un modelo completo tiende a ser muy complejo y varía con las condiciones prevalecientes en los RSU. Sin embargo, los datos de las observaciones de laboratorio y de campo sobre la generación de CH₄ sugieren que el proceso global de descomposición puede aproximarse por una cinética de primer orden y esto ha sido ampliamente aceptado. El IPCC ha adoptado, por lo tanto, el relativamente simple modelo FOD como base para la estimación de las emisiones de CH₄ generadas por los RSU (ver figura 10).

Figura 10. Mapa conceptual de las emisiones de CH₄ en un relleno sanitario.



Fuente: IPCC, 2006

En una reacción de primer orden, la cantidad de producto es siempre proporcional a la cantidad de material reactivo. Esto significa que el año en el cual el material de desecho fue depositado en el Relleno sanitario no es pertinente para determinar la cantidad de CH₄ generado cada año, lo único que cuenta es la masa total de material en descomposición que existe actualmente en el sitio. (IPCC, 2006)

Esto significa también que cuando se conoce la cantidad de material en descomposición en los rellenos sanitarios al comienzo del año, en el método de estimación, cada año puede considerarse como el año 1 y los cálculos básicos de primer orden pueden efectuarse con estas dos ecuaciones simples, donde la reacción de descomposición comienza el 1° de enero de cada año posterior a la eliminación. (IPCC, 2006)

DDOC_m acumulado en los SEDS al término del año T:

$$DDOCma_T = DDOmd_T + (DDOma_{T-1} \cdot e^{-k}) \quad (6)$$

$$DDOCm_{descomp_T} = DDOma_{T-1} \cdot (1 - e^{-k}) \quad (7)$$

Donde:

T = Año del inventario.

$DDOma_T$ = DDOC_m acumulado en los SEDS al final del año T , Gg

$DDOma_{T-1}$ = DDOC_m acumulado en los SEDS al final del año $(T-1)$, Gg

$DDOmd_T$ = DDOC_m depositado en los SEDS durante el año T , Gg

$DDOm_{descomp_T}$ = DDOC_m descompuesto en los SEDS durante el año T , Gg

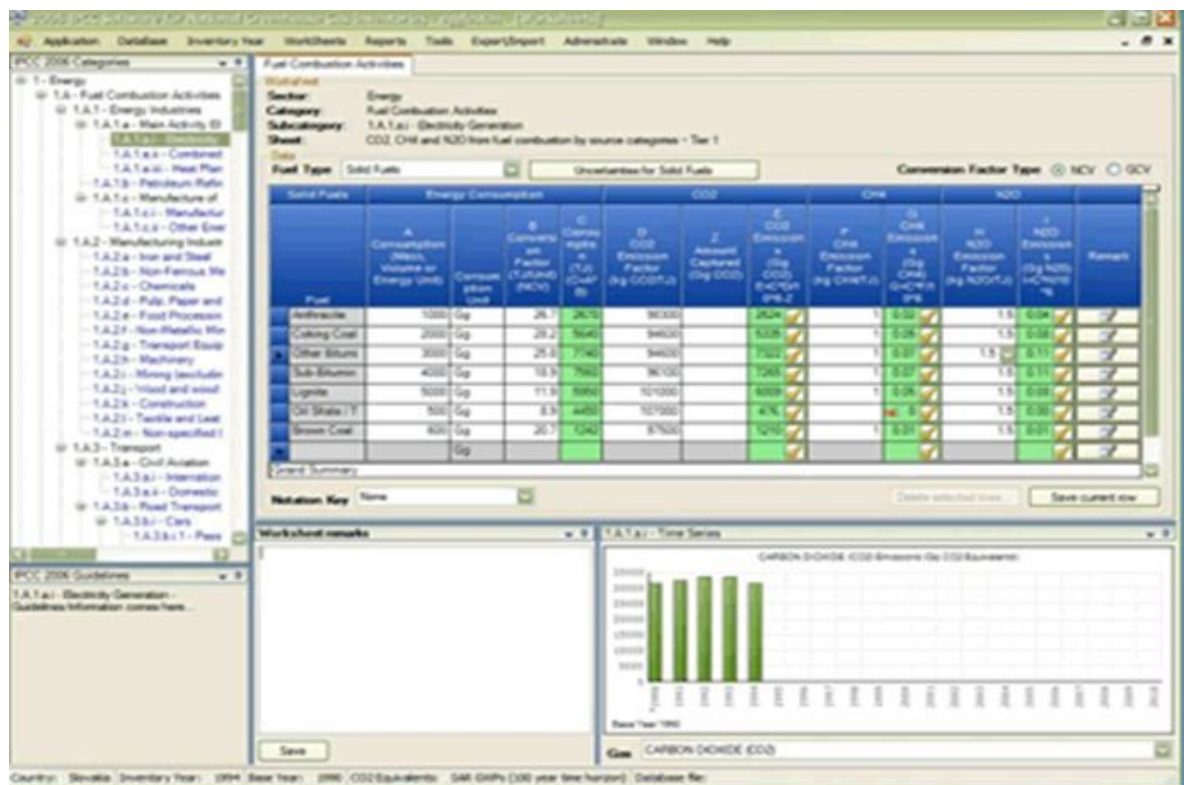
k = Constante de reacción, $k = \ln(2)/t_{1/2}$ (años⁻¹)

$t_{1/2}$ = vida media (años)

Al igual que el modelo colombiano de biogás el modelo del IPCC trabaja sobre una hoja de cálculo para el FOD; El modelo proporciona dos alternativas para estimar

las emisiones a partir de los RSU, entre las cuales se puede escoger según la disponibilidad de los datos de la actividad. La primera opción es un modelo por fases múltiples basado en datos sobre la descomposición de los desechos. Las cantidades de cada tipo de material de desecho degradable (alimentos, desechos de jardines o parques, papel y cartón, madera, textiles, etc.) en los DSM se registran de manera separada. La segunda opción es un modelo por fase única basado en los desechos brutos. Las emisiones provenientes de los desechos y lodos industriales se estiman de una manera similar que para los RSU brutos. Los países que escogen la utilización del modelo de hoja de cálculo pueden emplear, ya sea la opción de la composición de los desechos o la de los desechos brutos, según el nivel de los datos disponibles. Cuando la composición de los desechos es relativamente estable, ambas opciones dan resultados similares. Sin embargo, cuando se producen cambios rápidos en la composición de los desechos las opciones pueden producir resultados diferentes. Por ejemplo, los cambios en la gestión de los desechos, tales como las prohibiciones de eliminar desechos alimenticios o materiales orgánicos degradables, pueden provocar cambios rápidos en la composición de los desechos eliminados en los rellenos sanitarios.

Figura 11. Hoja de cálculo del modelo del IPCC para el cálculo de emisiones.



Fuente: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/software/new.html>

2.7 BONOS DE EMISIÓN DE REDUCCIÓN DE EMISIONES (CERs)

Los bonos de carbono son un mecanismo internacional de descontaminación para reducir las emisiones contaminantes al medio ambiente; es uno de los tres mecanismos propuestos en el Protocolo de Kyoto para la reducción de emisiones causantes del calentamiento global o efecto invernadero (GEI o gases de efecto invernadero).

El sistema ofrece incentivos económicos para que empresas privadas contribuyan a la mejora de la calidad ambiental y se consiga regular la emisión generada por sus procesos productivos, considerando el derecho a emitir GEI como un bien canjeable y con un precio establecido en el mercado. La transacción de los bonos de carbono —un bono de carbono representa el derecho a emitir una tonelada de dióxido de carbono— permite mitigar la generación de gases invernadero, beneficiando a las empresas que no emiten o disminuyen la emisión y haciendo pagar a las que emiten más de lo permitido.

El Mercado del Carbono es un sistema de comercio a través del cual los gobiernos, empresas o individuos pueden vender o adquirir reducciones de gases efecto invernadero (CERs). Existen dos criterios dentro de este mercado:

- El primero indica que no interesa en qué parte del mundo se reduzcan las emisiones de Gases Efecto Invernadero, el efecto global es el mismo. Esto permite las transacciones entre países distantes entre sí. (www.sinia.cl/1292/w3-article-48293.htm)

- El segundo criterio sostiene que, ambientalmente lo importante no es el tiempo en que se reducen sino que realmente se reduzcan; indicando así que el resultado de reducir emisiones hoy o en unos años más es el mismo.

El mercado tiene dos tipos de transacciones que son:

- Transacciones basadas en proyectos: se transan reducciones cuantificables de un proyecto. Dentro de este tipo de transacciones funciona la Implementación Conjunta (IC) y el MDL.

- Comercio de derechos de emisión: se transan derechos de emisión creados y asignados. Los cuales determinan un límite de emisiones para una determinada empresa o entidad (representan cantidades de emisión que se pueden liberar sin incurrir en una falta legal). El emisor genera menos emisiones de lo permitido, dejando un margen de permisos de emisión (o derechos de emisión) que pueden ser vendidos a entidades, que por razones diversas, no consiguieron emitir menos del límite establecido. Estos derechos pueden ser por ejemplo, los determinados por el Sistema Europeo de Comercio de Emisiones (EU ETS), creado para cumplir las obligaciones de reducción de emisiones europeas ante PK. (<http://bibliotecaduocvalparaiso.blogspot.com/2010/11/que-son-los-bonos-de-carbono.html>)

2.8 MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO (MDL)

El MDL es un mecanismo del Protocolo de Kyoto basado en proyectos, que tiene como objetivo reducir las emisiones de gases efecto invernadero en países en desarrollo. Mediante el cual los países industrializados pueden financiar proyectos de reducción de emisiones en países en desarrollo y recibir créditos por ello. El propósito del MDL es ayudar a las partes no incluidas en el Anexo I del Protocolo de Kyoto a lograr un desarrollo sostenible y contribuir al objetivo último de la Convención, así como ayudar a las partes incluidas en el Anexo I a dar cumplimiento a sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de emisiones.

Los requisitos de un proyecto MDL son:

- Reducir alguno de los gases de efecto invernadero indicados en el anexo A del Protocolo de Kyoto.

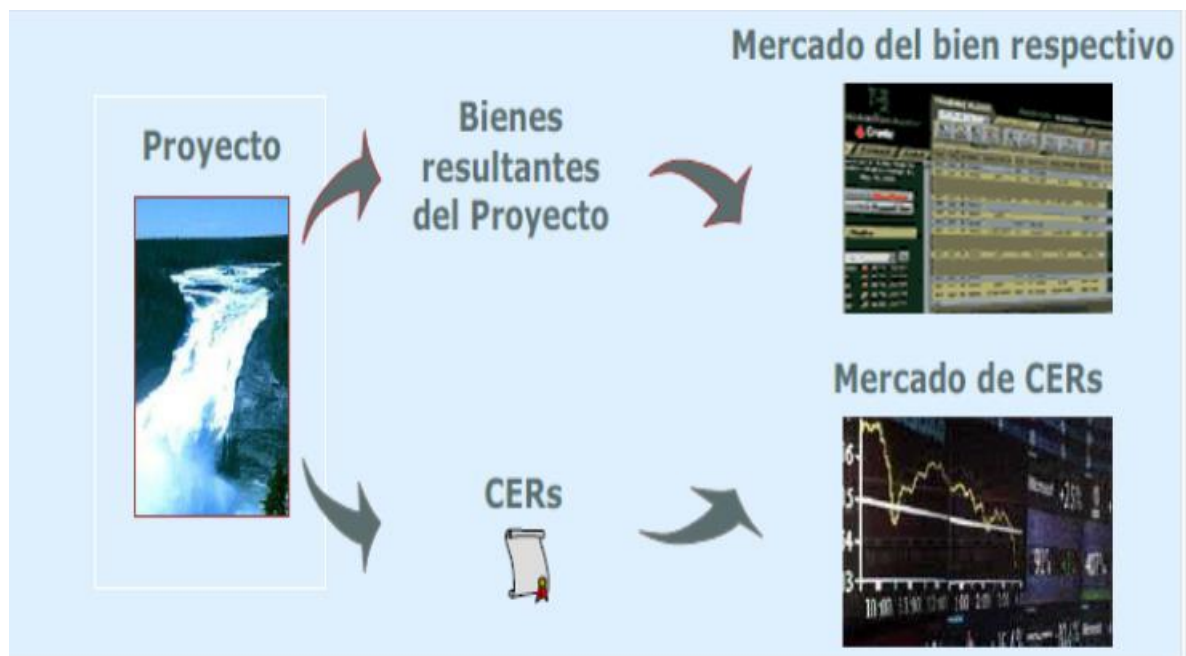
- Participación voluntaria.

- Reducir emisiones consideradas adicionales a las que se producirían en ausencia de la actividad del proyecto.

Demostrar tener beneficios reales, mensurables y de largo plazo en relación con la mitigación de los gases efecto invernadero.

- Contribuir al desarrollo sostenible del país. Ver figura 12.
- Ser desarrollado en un país que haya ratificado el Protocolo de Kyoto y que posea una Autoridad Nacional Designada para el MDL. (Bazán, 2007).

Figura 12. Beneficios para los promotores de proyectos MDL.



Fuente: BAZAN, 2007.

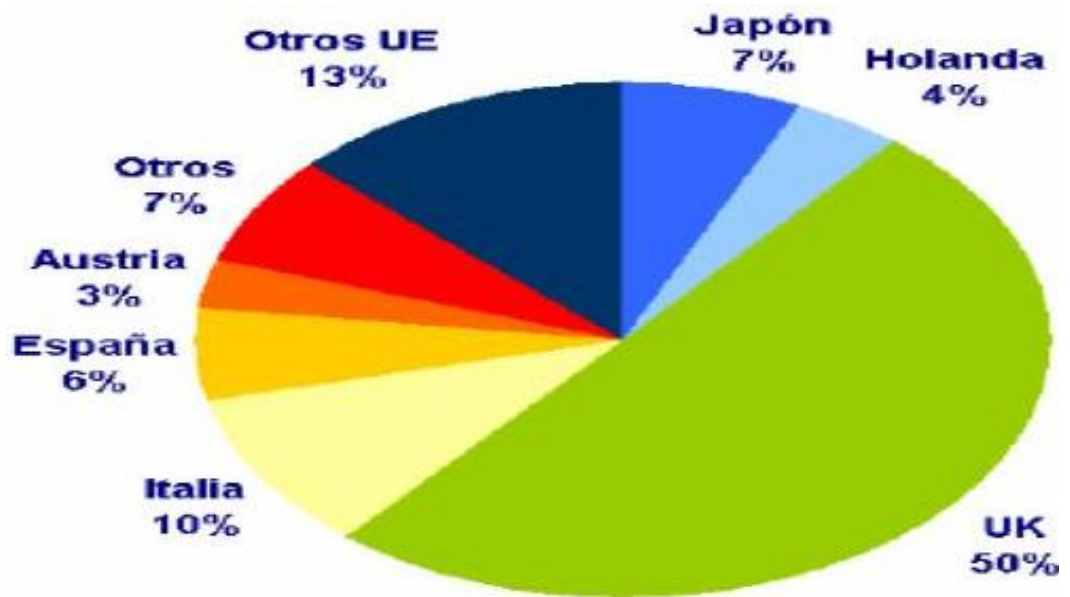
Los promotores de proyectos MDL cuentan con la posibilidad de vender los CERs obtenidos a partir de los proyectos a fondos y empresas de los países desarrollados. Esta opción mejora la rentabilidad de los proyectos elegibles aumentando las posibilidades de que sean concretados.

Para la compra de los CERs generados por los MDL se encuentran varias entidades encargadas de comprar para los países y empresas privadas que aportan al fondo. Éstos pueden ser:

- Fondos o programas de adquisición de CERs administrados por gobiernos o por encargo de éstos.

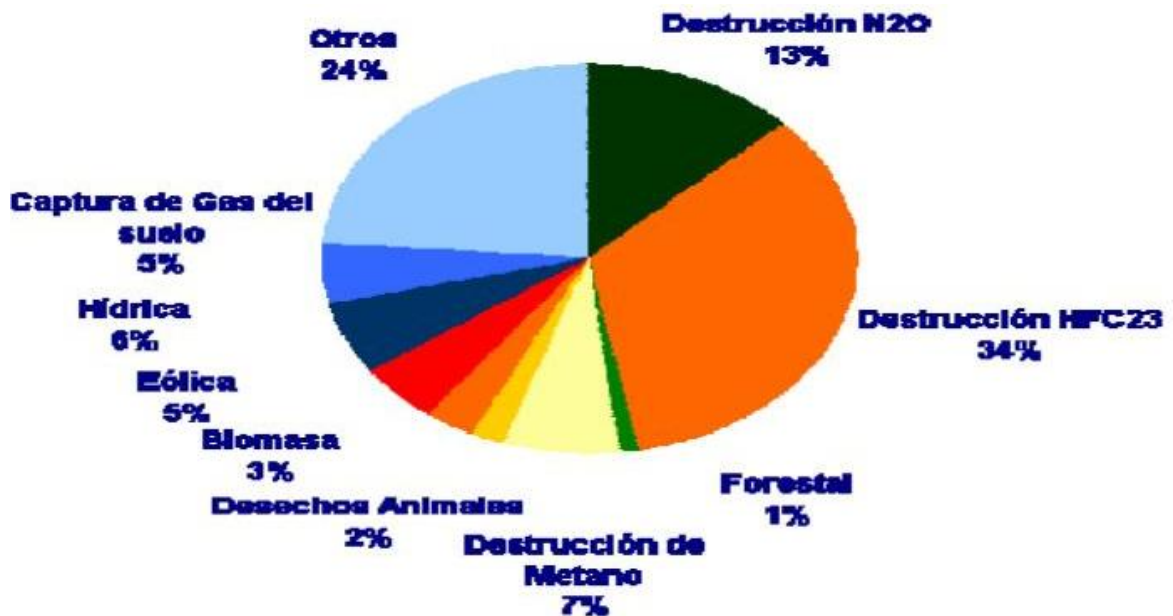
- Fondos multilaterales y privados. (Ver figuras 13 y 14).

Figura 13. Demanda de principales compradores de bonos CERs.



Fuente: World Bank, *State and Trends of the Carbon Market*, 2007.

Figura 14. Tipo de proyectos (% del volumen contratado).



Fuente: *World Bank, State and Trends of the Carbon Market, 2007.*

Un proyecto puede generar CERs durante todo el período de acreditación. Dicho período corresponde al tiempo en el cual una DOE verifica y certifica las reducciones de emisiones de GEI, que genera la actividad del proyecto.

El titular de un proyecto puede elegir entre dos alternativas de período de acreditación:

- Período de acreditación de 10 años sin renovación.
- Período de acreditación de 7 años, con posibilidad de renovarlo hasta 2 veces y completar un máximo de 21 años. Cada renovación estará sujeta al chequeo de si se mantiene la adicionalidad del proyecto, así como se revisará la Línea Base con la que se calculan las reducciones de emisiones de GEI atribuibles al proyecto (<http://www.prochile.cl/servicios/medioambiente/bonosdecarbono.php#2>).

2.9 PLANES DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS (PGIRS)

En el marco de la Política Pública para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos, el Gobierno nacional estableció la responsabilidad de los municipios colombianos de formular Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS, como una medida para garantizar la erradicación de basureros a cielo abierto y estimular el desarrollo de programas y proyectos que mitiguen los impactos ambientales y a la salud pública ocasionados por el manejo inadecuado de los residuos sólidos.

Los PGIRS definen los lineamientos para la gestión integral de los residuos sólidos del Municipio, establece los programas y estrategias de intervención que deben guiar la intervención de las entidades públicas y privadas generadoras de residuos, las autoridades ambientales, las dependencias de la administración central, los operadores de aseo y los ciudadanos en su conjunto.

El decreto 1713 de 2002 asigna a los municipios y departamentos la responsabilidad en el manejo de los residuos sólidos y la obligación de formular e implementar Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos con base en las siguientes directrices. (Ver Anexo A)

- Responsabilidad de los municipios y distritos.

- Ámbito local y/o regional según el caso.

- Fundamentado en la Política de Gestión Integral de Residuos y Régimen de Servicios Públicos.

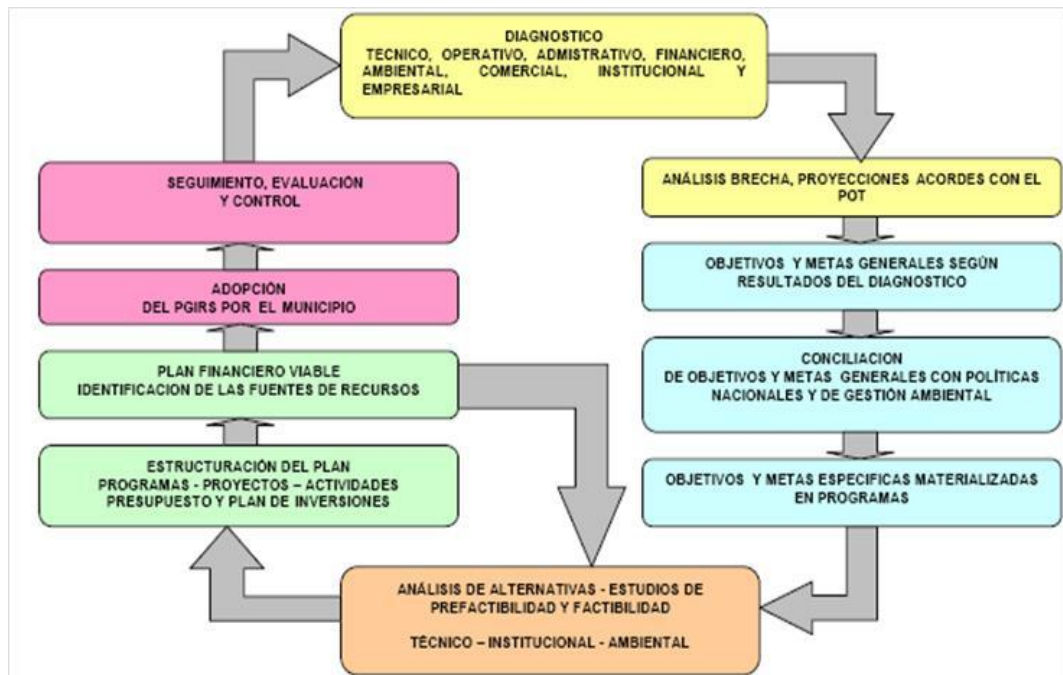
- Plazo máximo para la formulación e iniciación de la ejecución de 2 años.

- Seguimiento por parte de las autoridades ambientales y de seguimiento y control.

- Coherencia con los POT y planes de desarrollo municipal y/o distrital.

- Período de implementación con horizonte de análisis de 15 años y ejecución acorde con los planes de desarrollo municipal y/o regional. (Decreto 1713, 2002). Ver figura 15.

Figura 15. Metodología del PGIRS.



Fuente: GARCÍA, Bibian, 2012.

Dentro de los resultados esperados en cada una de los ciclos de año de los PGIRS se tienen: (García, 2012)

- Manejo planificado de los residuos sólidos producidos en Colombia.
- Concientizar a las entidades territoriales sobre el manejo actual del servicio en todos sus componentes.
- Establecer quién y cómo se debe prestar el servicio.

- Localizar áreas para la disposición final técnica de residuos a través de rellenos sanitarios.

- Fomentar la reincorporación al ciclo productivo de residuos potencialmente aprovechables.

- Armonizar actividades locales y regionales en la prestación del servicio de aseo.

Dentro de esta propuesta metodológica se tiene que contemplar todos los componentes del servicio, en las modalidades de servicio ordinario y especial, ejecutado por el ente territorial y el prestador del servicio de aseo, mediante una asignación y definición clara de responsabilidades.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

Por medio del trabajo de evaluación del proyecto de quemado de biogás en el relleno sanitario La Esmeralda, se busca evaluar la viabilidad de dicho proyecto desde el punto de vista de la gestión, así como, la posibilidad de replicación en otros rellenos sanitarios del país del Modelo Colombiano de Biogás, con el fin de generar procesos de reducción de emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero (GEI) y buscar alternativas a la emisión de bonos de reducción de emisiones (CERs) de los proyectos que ya se encuentran en el país y la región como Procuenca. (Ver figura 16)

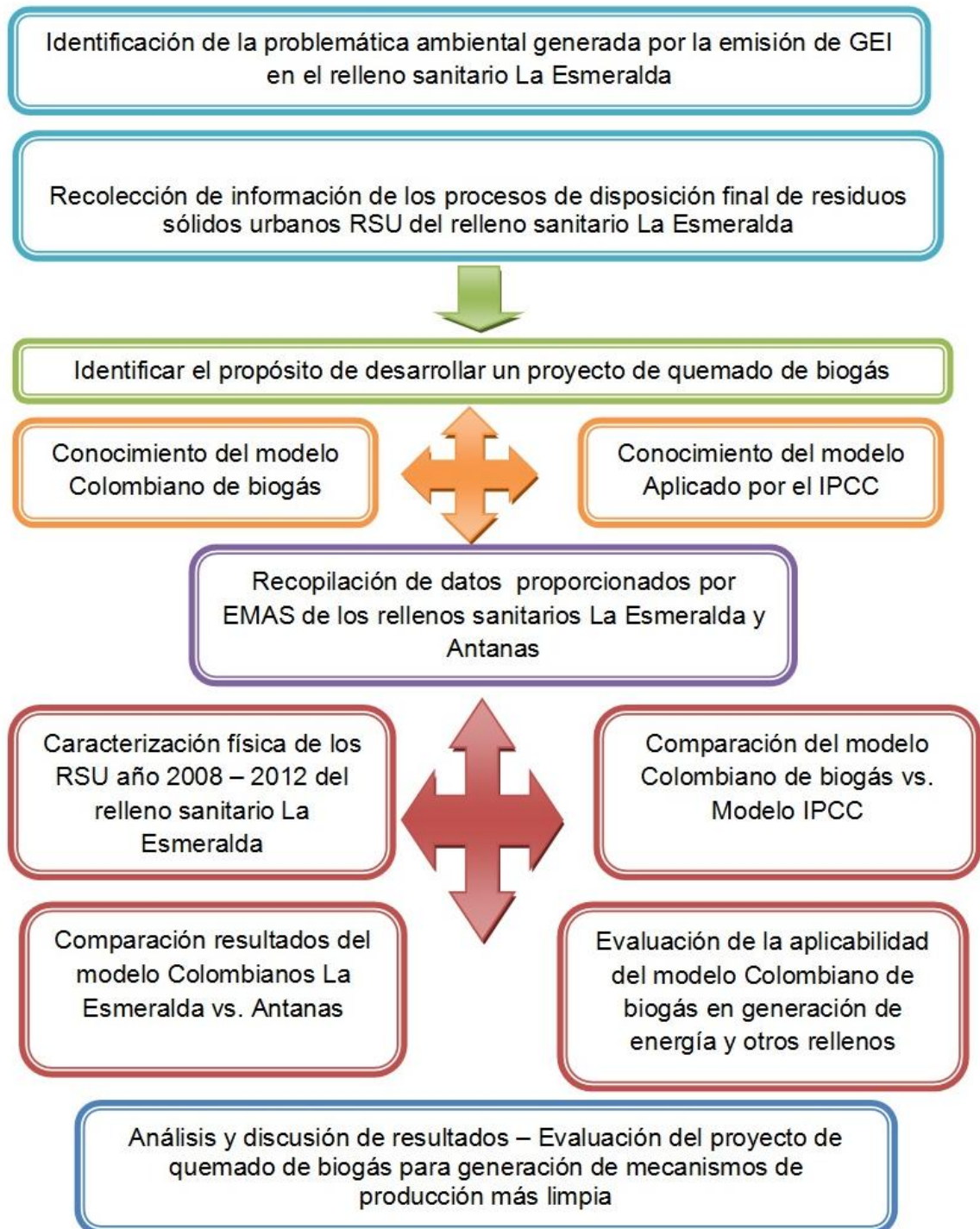
También se busca identificar el comportamiento que tiene la ciudad de Manizales en cuanto a la gestión de sus residuos sólidos urbanos (RSU) en comparación con otras ciudades con características similares y cuánto aporta a la contaminación por GEI el manejo del relleno sanitario La Esmeralda.

La metodología de investigación está basada en una metodología evaluativa donde se describe, analiza y explora del comportamiento del relleno sanitario La Esmeralda de Manizales desde la gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU), pasado a evaluar el proyecto de quemado de biogás y en comparación con el relleno sanitario Antanas de la ciudad de Pasto (Nariño), el cual se encuentra operado en condiciones similares a las del relleno La Esmeralda (ver anexos D)

Como primera fase se tendrá el análisis de los datos de tonelaje que ingresa al relleno en un período de tiempo (tonelaje promedio mes y tonelaje promedio año), se caracterizarán físicamente los residuos sólidos urbanos y se compararán con la bibliográfica existente para identificar los porcentajes de materiales que produce la ciudad en cuanto a los mismos.

Conociendo la caracterización de los residuos se procede a analizar el Modelo Colombiano de Biogás aplicado a los rellenos sanitarios de La Esmeralda y Antanas con el fin de evaluar la capacidad de producción y quemado de biogás y por ende de la posibilidad de generar acciones MDL para ingresar al mercado de venta de CERs.

Figura 16. Alcance de los objetivos propuestos en la investigación, paso a paso



Fuente: Elaboración propia, 2012.

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo de investigación aplica una metodología evaluativa donde se explora, describe y analiza la aplicación del Modelo Colombiano de Biogás en el quemado de biogás procedente de los rellenos sanitarios La Esmeralda y Antanas y serán evaluados como modelos MDL para la venta de CERs.

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

Para la evaluación se analizará el Modelo Colombiano de Biogás aplicado en los rellenos de La Esmeralda (Manizales) y Antanas (Pasto), teniendo como referente el tonelaje promedio mes que ingresa a cada relleno y la comparación entre lo arrojado por el modelo y las cantidades reales de quemado de biogás que genera cada relleno, además de la implementación de este modelo MDL para la venta de CERs.

Figura 17. Metodología general de la investigación.



Fuente: Elaboración propia, 2012.

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Este proyecto de investigación se dividirá en función de la información que debe ser recolectada, primero con base en el PGRIS y los registros históricos del relleno sanitario a partir del año 2008 y hasta el primer semestre del 2012 se realizara la caracterización física de los residuos sólidos urbanos (RSU) que ingresan al relleno sanitario La Esmeralda; esta información se tomara con base en los carros compactadores que llegan de cada empresa y los que son destinados a la separación manual y ampirror (carros tolvas), para establecer las categorías de residuos se realizará revisión bibliográfica según los PGIRS específicos para el relleno sanitario La Esmeralda; los resultados obtenidos se compararán con el estudio de prefactibilidad que se realizó previamente en el relleno y con bibliografía existente. Se realizará en trabajo de campo una revisión del tipo de reciclaje que se encuentra por parte de los recicladores en el relleno sanitario.

Después de tener caracterizados los RSU del relleno se procederá a la comparación de los modelos de estimación de generación de biogás, los modelos estudiados serán el Modelo Colombiano de Biogás (diseñado en conjunto con la EPA) y el modelo del IPCC, para tal fin se descargarán ambos modelos de la web ya que ambos son de libre manejo en las siguientes paginas:

- Modelo Colombiano de Biogás: <http://www.epa.gov/lmop/international/colombia.html>

- Modelo del IPCC: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/software/new.html>

Se realizará la revisión de cada modelo según su manual y se hará una revisión bibliográfica del comportamiento y aplicabilidad de cada uno, esto es con el fin de identificar las oportunidades de mejora que pudieran brindar cada modelo a las condiciones específicas del relleno sanitario La Esmeralda.

Dado que el relleno se realizó en el año 2007, se llevó a cabo un estudio de prefactibilidad para la implementación de algún modelo de quemado de biogás; se realizarán consultas con el personal del relleno sanitario para conocer las recomendaciones de dicho estudio dado que este sirve como material de referencia para la comparación de los modelos.

También dentro del marco del II simposio de cambio climático y huella de carbono el cual fue realizado por EMAS en el mes de agosto de 2012 se tendrá una entrevista con el ingeniero José Luis Dávila representante de la empresa SGS desarrollador del modelo colombiano. Finalmente se realizará una comparación cualitativa a la luz de cual es más aplicable a Colombia en cuanto a ventajas y desventajas.

Dado que el grupo SALA al que pertenece la empresa EMAS ya desarrolló el Modelo de Colombiano de Biogás con fines de quema de biomasa en el relleno sanitario de Antanas en la ciudad de Pasto, se realizará una comparación entre los rellenos sanitarios de la ciudad de Manizales (La Esmeralda) y el de la ciudad de Pasto (Antanas) con el fin de establecer qué tan acertado es el modelo en cuanto a estimados y producción real, para tal fin se realizará la evaluación de los estudios preliminares para evaluación del proyecto del modelo colombiano de cada ciudad, también se establecerá un comparativo entre las características físicas de cada ciudad: clima, suelo, pendientes y las propias de cada relleno, como lo son la disposición de los residuos y la adecuación de las terrazas, ya que estos datos son fundamentales para poder correr la matriz del modelo, después de este comparativo se tomarán los resultados de producción esperada del Modelo Colombiano de Biogás de ambos rellenos y se comparará según las cantidades esperadas y las diferencias o similitudes encontradas tanto en las características propias del relleno como en las de la ciudad (ver figura 18).

Dado que por cuestiones económicas del mercado de bonos de carbono en el relleno sanitario La Esmeralda, no se pudo llegar a la fase de toma de muestras de las chimeneas de quemado y sólo se cuentan con los datos de los estudios de prefactibilidad y los teóricos arrojados por el modelo y dado que la empresa EMAS Pasto facilitará los datos reales obtenidos para ser comparados con los estimativos teóricos del modelo aplicado al relleno, esto con el fin de determinar qué tan aproximados son los resultados esperados *versus* los obtenidos después de que el proyecto se encuentre en marcha, con esta comparación se establecerán a futuro una estimación de la producción en el relleno sanitario La Esmeralda una vez que se retomen las fases de instalación, quemado y toma de resultados (ver figura 19).

Para evaluar el Modelo Colombiano de Biogás frente a las oportunidades de generación de energía en Colombia y su aplicabilidad en otros rellenos sanitarios del país desde el punto de vista de la gestión ambiental y las directrices dadas por los PGIRS se realizará una revisión bibliográfica específicamente de lo determinado en los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) y en la legislación vigente sobre el manejo de los rellenos sanitarios en Colombia tanto

de los que están establecidos como los que se establecerán a futuro, con base en esta revisión se realizará un análisis de la situación actual de los rellenos sanitarios en Colombia.

También se realizará una revisión bajo el marco del análisis realizado por el IDEAM sobre la generación de GEI por parte de los rellenos sanitarios y su implicación en la huella de carbono generada esto con el fin de hacer una relación a futuro de una posible venta de bonos de emisión CERs o generación de energía.

Figura 18. Relleno sanitario La Esmeralda, Manizales, 2012.



Fuente: Las autoras, 2012.

Figura 19. Relleno Sanitario Antanas, Pasto, 2011.



Fuente: Relleno Antanas Pasto – EMAS, 2011.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

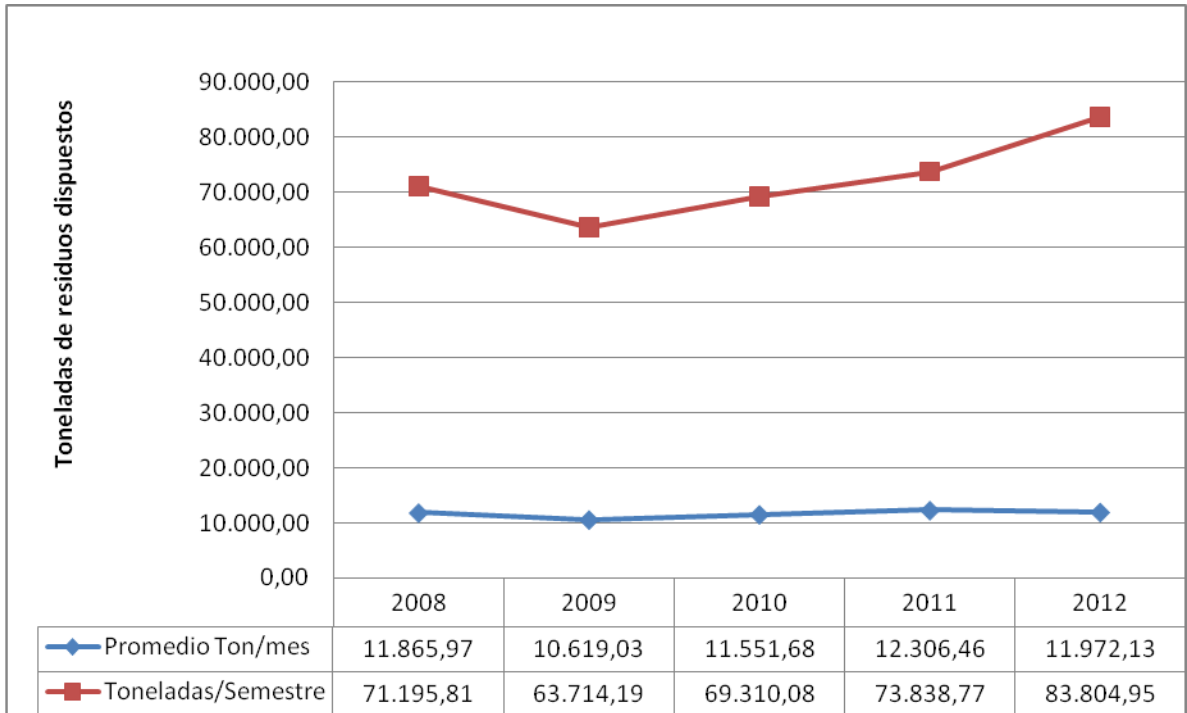
En el análisis de los resultados según los objetivos planteados se encontró:

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS RSU DEL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA

En la caracterización física de los RSU del relleno sanitario La Esmeralda con base en los registros históricos llevados por la empresa en cuanto a tonelaje y tipos de elementos obtenidos por los recicladores y los carros ampirror; se encontró que el tonelaje recibido por el relleno sanitario entre los años 2008 al primer semestre de 2012 se encuentra estable entre los años 2008, 2010 y 2011 con un promedio de 140.000 Ton/año (promedio diario de 383.5) dispuestas en el relleno, sin embargo, en el año 2009 se presentó un tonelaje menor de aproximadamente 20.000 Ton dispuestas en el relleno al finalizar el año (ver figura 20), no es posible determinar esta disminución a qué factores específicos se pudo deber, si fueron agentes internos del relleno o cambios en la cultura de disposición de residuos de la ciudad.

En el primer semestre del año 2012, semestre en el cual se tomaron los datos, se encontró una cantidad de 83.000 Ton dispuestas, si el comportamiento de las tendencias historias continua se esperaría que en lo que resta del año al relleno sanitario ingresarían un promedio aproximado de 60.000 Ton adicionales para su disposición final (ver Anexo E).

Figura 20. Resumen toneladas mes/semestre años 2008-2012 dispuestas en el relleno sanitario La Esmeralda.



Fuente: Elaboración propia, 2012.

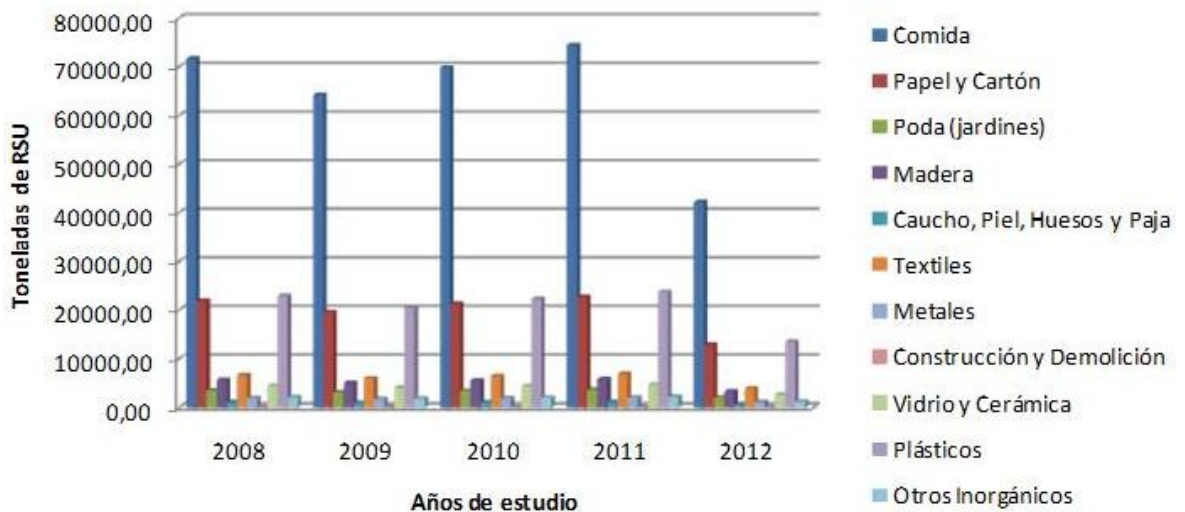
Las variables escogidas para la caracterización física de los RSU fueron tomadas de las que son solicitadas por la tabla de Excel de alimentación del Modelo Colombiano de Biogás las cuales son: comida, papel y cartón, poda de jardines, madera, huesos, textiles, metales, construcción y demolición, vidrio y cerámica, plásticos, otros (residuos inorgánicos); se tomaron estas mismas variables con el fin de manejar siempre la misma categoría de datos dentro del presente proyecto.

En cuanto a la caracterización física de los RSU se encontró que en todos los años de estudio la variable de mayor impacto fue la de residuos de comida generada por los ámbitos comercial (restaurantes, supermercados, residuos de producción de empresas, etc.), en segundo lugar se encontró como residuo depositado en el relleno papel y cartón, lo que nos indica que en la ciudad es muy bajo el porcentaje de habitantes que realiza separación en la fuente y que no se cuentan con planes serios de reciclaje que involucren directamente a la población generadora y al segmento de la población que de manera informal se dedica al aprovechamiento de este tipo de residuos (ver figura 21).

De las otras variables tomadas en cuenta para la caracterización los RSU presentaron niveles no significativos en cada uno de los años comparados, esto puede ser debido a los niveles de compactación en los que llegan al relleno, lo que hace difícil su identificación para ingresarlo en una categoría específica.

Hay que tener en cuenta que dentro de las variables de caracterización física no se tuvieron en cuenta los residuos generados por la construcción o escombros, ya que estos no tienen destino en el relleno sanitario sino en escombreras dispuestas por el municipio y manejadas directamente por éste.

Figura 21. Caracterización física de los RSU del relleno sanitario La Esmeralda 2008-2012.



Fuente: Elaboración propia. 2012

Si comparamos la caracterización realizada en el relleno La Esmeralda con la reportada por la bibliografía según Tchobanoglous (1998), nos encontramos que el tipo de residuos se encuentra dentro de la categoría de países con medianos ingresos en el cual los residuos de comida aportan entre un 20-65% del total de residuos tanto generados como depositados en relleno sanitario, de igual forma el papel y el cartón se encuentran en la mitad del rango reportado por el mismo autor entre un 8-30%.

Si analizamos estas dos variables que fueron las de mayor representatividad dentro de la caracterización con lo reportado para países de ingresos altos nos

encontramos que los residuos de comida generados por estos se encuentran entre un 6-30% mientras que los específicos para el relleno sanitario La Esmeralda se encuentran en un 50,4%, esto se debe a condiciones eminentemente culturales del generador del residuo que en su mayoría son residencias, en el caso colombiano no se le da en lo general ninguna utilidad a las sobras de los alimentos después de ser preparados y van directamente a la basura, en el caso de Estados Unidos este tipo de residuos generados en el procesamiento doméstico de los alimentos pasan por un proceso de trituración de las basuras en los propios hogares lo que hace que la proporción del residuo sólido que va a la basura sea menor y se generen otros procesos como el de los lixiviados (Tchobanoglous, George *et al.*, 1998).

En cuanto al papel y cartón, el porcentaje en países desarrollados se encuentra entre un 20-45% de aprovechamiento o selección *in situ* (Tchobanoglous, George *et al.*, 1998). Mientras que nosotros nos encontramos entre un 8-15% de aprovechamiento *in situ*, esto nos podría indicar que en Colombia la cultura del reciclaje aun no es fuerte y los sistemas con los que se cuenta de separación en la fuente no son efectivos y por lo tanto se pierden residuos que podrían ser transformables nuevamente en materias de segundo nivel.

4.2 COMPARACIÓN DEL MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS *VERSUS* LA APLICACIÓN DEL MODELO DEL IPCC PARA MODELOS MDL

Luego del análisis comparativo del Modelo Colombiano de Biogás *versus* El modelo del IPCC se encontró las siguientes conclusiones frente a la aplicabilidad de un modelo u otro.

El modelo del IPCC no está diseñado específicamente para Colombia mientras que el Modelo Colombiano de Biogás está diseñado para Colombia con datos sobre todo de temperaturas promedio por región.

Debido a la falta de diseño específico el modelo IPCC utiliza la caracterización de residuos de toda Suramérica lo cual por condiciones culturales presenta un sesgo en cuanto a características físicas de los residuos y las condiciones en las cuales estas son llevadas a los rellenos sanitarios.

El modelo IPCC utiliza cuatro categorías de climas pero sólo tiene en cuenta dos tipos de precipitación que son mojado *versus* seco, lo que implica que las condiciones de climas y ciclos de lluvias presentes en Colombia presentan un margen de error muy alto. La mayoría del territorio colombiano recibe más de 1000 mm/año de precipitación y la temperatura probablemente no presenta efectos significativos.

El modelo del IPCC no indica como estimar la eficiencia de la captura que en últimas es el dato más relevante para los proyectos MDL.

Como tal la tabla de Excel del Modelo Colombiano de Biogás es mucho más amigable que el *software* del IPCC lo que genera una facilidad mayor para la aplicación del mismo y tanto el ingreso como la toma de datos se presenta de manera más clara y precisa para la persona que requiere los datos.

Una diferencia importante en particular entre las dos series de datos es que los residuos del relleno sanitario La Esmeralda contiene una cantidad mayor de residuos alimenticios (los cuales son altamente degradables) comparado con los residuos típicos de Estados Unidos, debido a que residuos alimenticios son altamente degradable, produce biogás más rápido, pero en un período más corto.

El alto contenido orgánico encontrado en los rellenos sanitarios La Esmeralda – Manizales y Antanas – Pasto, resulta en un incremento potencial en la generación de metano por tonelada de residuos. Sin embargo, un incremento en el contenido de humedad generado por la precipitación (que es inerte) resultará en una disminución del potencial de generación de metano por tonelada de residuos (SCS ENGINEERS, 2005). por lo tanto es muy importante la mayor precisión con la que cuenta el Modelo Colombiano de Biogás en este punto ya que permite establecer las condiciones de variación según cada región del territorio colombiano.

4.3 RELACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS DEL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA CON LOS ARROJADOS EN EL RELLENO SANITARIO ANTANAS DE PASTO CON EL FIN DE COMPARAR LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN DOS CIUDADES DE CARACTERÍSTICAS SIMILARES.

Para la realización de la comparación de los resultados arrojados por el modelo Colombiano de biogás en los rellenos La Esmeralda – Manizales y Antanas – Pasto, se alimentó el modelo por parte de la empresa EMAS en la tabla de Excel:

Alimentación de la hoja de cálculo en donde la empresa EMAS contestó una serie de preguntas al respecto de cada sitio, cabe anotar que tanto la alimentación del modelo como los resultados arrojados son independientes a cada relleno. Posteriormente el modelo automáticamente calculará los valores de entrada de este modelo: Índice de disposición de residuos, k, Lo, MCG, ajustes por fuegos y eficiencia de captura.

Hoja de cálculo de disposición y recuperación de biogás: muestra la disposición anual y la estimación de eficiencia de captura calculada por el modelo; en este punto se permite la introducción de información específica de la disposición estimada.

Hoja de cálculo de caracterización de residuos: muestra la caracterización de los residuos asignada a cada departamento pero dado que EMAS cuenta con esta información se ingresaron datos específicos a cada relleno.

Hoja de cálculo de tabla de resultados: muestra los resultados del modelo en forma tabular.

Hoja de cálculo de gráfico de resultados: muestra los resultados del modelo de forma gráfica.

Estos cinco pasos hacen parte de la metodología para la obtención de los datos del modelo Colombiano de biogás, y se aplicaron para cada uno de los rellenos sanitarios La Esmeralda – Manizales y Antanas – Pasto.

Dentro de la comparación de los resultados del modelo La Esmeralda *versus* Antanas (ver tabla 8) se establecieron las siguientes variables: similitudes y factores diferenciales presentes en las dos ciudades, porcentaje de residuos según la caracterización solicitada por el modelo, toneladas recibidas en ambos rellenos en el período 2008-2012. Estos datos son relevantes debido a que para la alimentación de la hoja de Excel del modelo colombiano de biogás se hace necesario tener claridad sobre esta información.

Finalmente se comparó la cantidad de biogás proyectado en la propuesta de Bionergis para ambas ciudades.

Tabla 8. Relleno sanitario La Esmeraldas vs relleno Antanas.

	La Esmeralda/Manizales	Antanas/Pasto
Altura promedio	2.300 msnm	2.700 msnm
Temperatura promedio	17°C	13°C
Precipitación media	1.750 mm/año	1.200 mm/año
Suelo de soporte	Arcilloso y limoso arcilloso	Limo arenoso
Tipo de relleno	Combinado	Combinado
Topografía	Montañosa	Montañosa
Pendientes	> al 20% parte más alta	> al 15% parte más alta

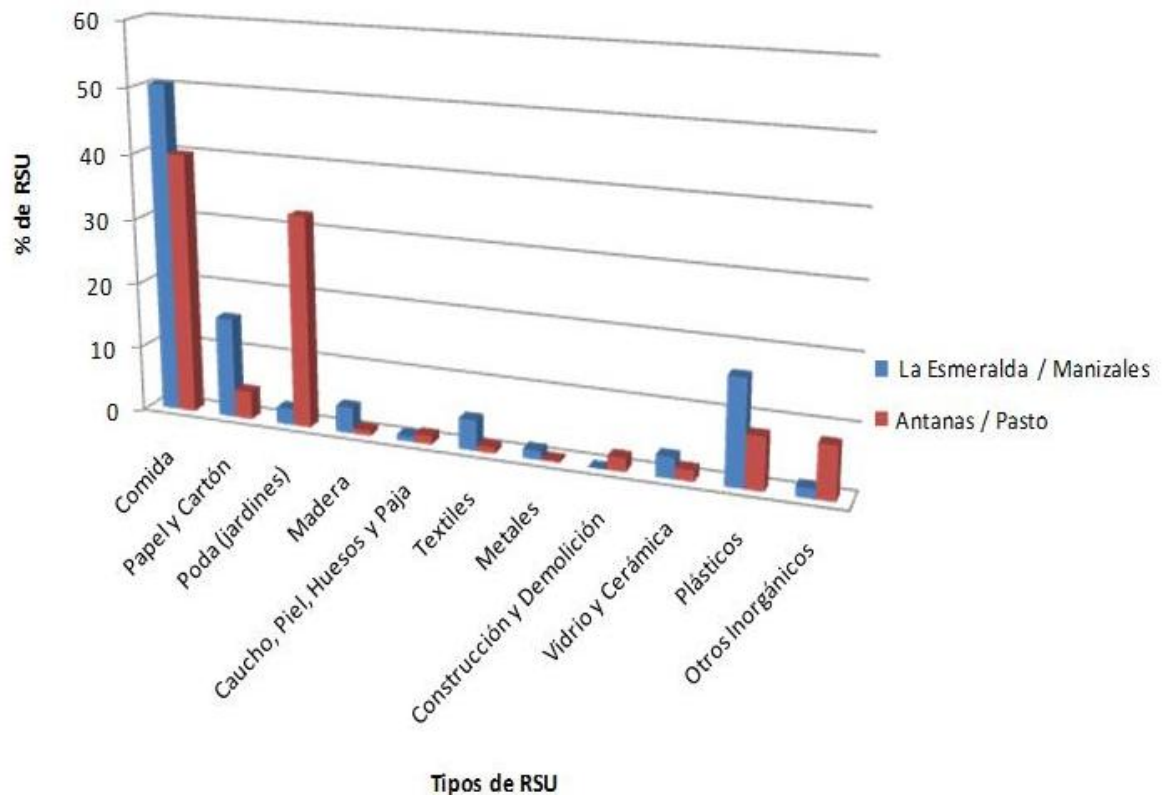
Fuente: Elaboración propia, 2012.

Como se puede observar en la tabla anterior y para efectos de los datos requeridos por el modelo Colombiano de biogás y que influyen en los datos arrojados por el mismo; la variable más importante es la de precipitación media/año, ya que a pesar de que ambas ciudades se encuentran en la región Andina, la diferencia entre ambas influye directamente en la forma en la cual se transforman los RSU al momento de su disposición final y compactación dentro del relleno (ver figura 22), por lo tanto al presentar la ciudad de Manizales una precipitación mayor catalogada por el modelo como húmedo la transformación de los RSU será mayor y se encontrará más disponibilidad de biogás después de los procesos de transformación de los mismos.

La empresa SCS Engineers en el año 2011 realizó demostraciones del modelo Colombiano de biogás presentando diferentes escenarios de Bogotá, Amazonas, Antioquia y Arauca, estas demostraciones arrojaron valores más cercanos a los obtenidos en el relleno La Esmeralda, exceptuando Amazonas cuyos valores de

residuos de comida fueron cercanos al 70%. Esto fundamentalmente debido al factor clima y a la ubicación geográfica tropical del sitio. (SCS Engineers, 2011).

Figura 22. Comparación de porcentajes de RSU La Esmeralda vs. Antanas.



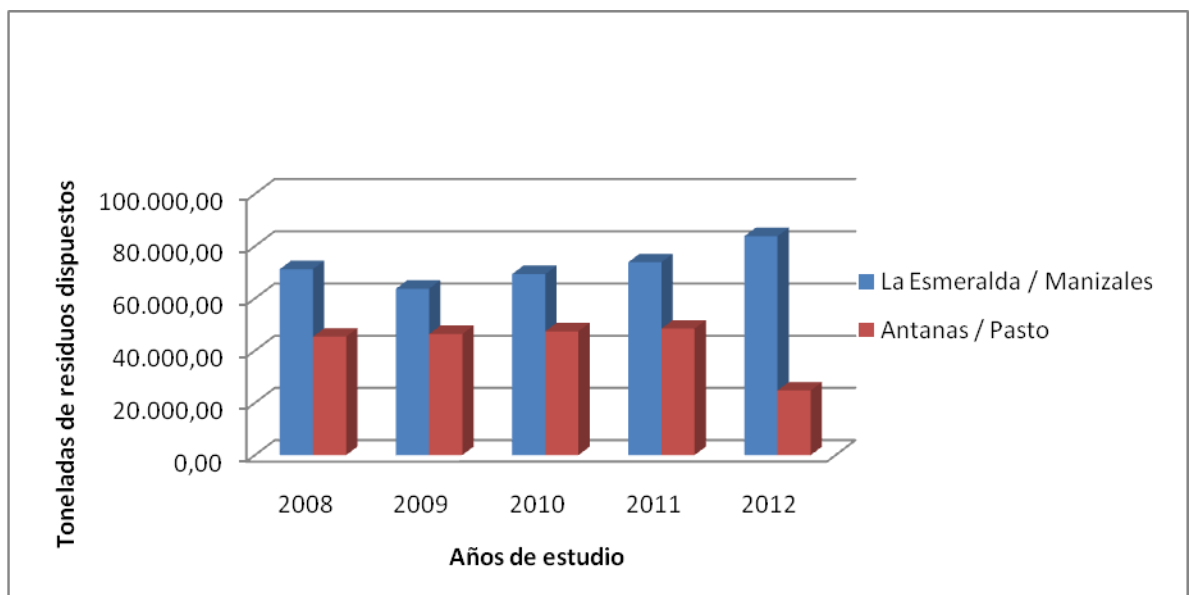
Fuente: Elaboración propia, 2012.

La comparación de los porcentajes de RSU caracterizados por el Modelo Colombiano de Biogás para ambos rellenos nos indica que la comida entendida como residuos generados de alimentos producidos en su mayoría en el ámbito residencial es la variable que para ambos rellenos nos presentó mayor porcentaje alcanzando casi un 50% del total de variables establecidas a caracterizar.

La mayor variación se presentó en cuanto a los residuos de poda o jardines el cual en el relleno de Antanas representa casi un 30% mientras que en el de La Esmeralda no alcanza a representar un 10% de los RSU dispuestos en el relleno (ver figura 23). En el mismo trabajo realizado por SCS Engineers se observa que si hay una diferencia significativa en cuanto al porcentaje de poda o jardines ya que el promedio de las demostraciones fue de 6.9%, con respecto al relleno de

Antanas – Pasto. Esto nos puede indicar que en esta ciudad se realizan un mayor número de obras de mantenimiento o paisajísticas que arrojan como resultado este tipo de residuos (SCS Engineers, 2011).

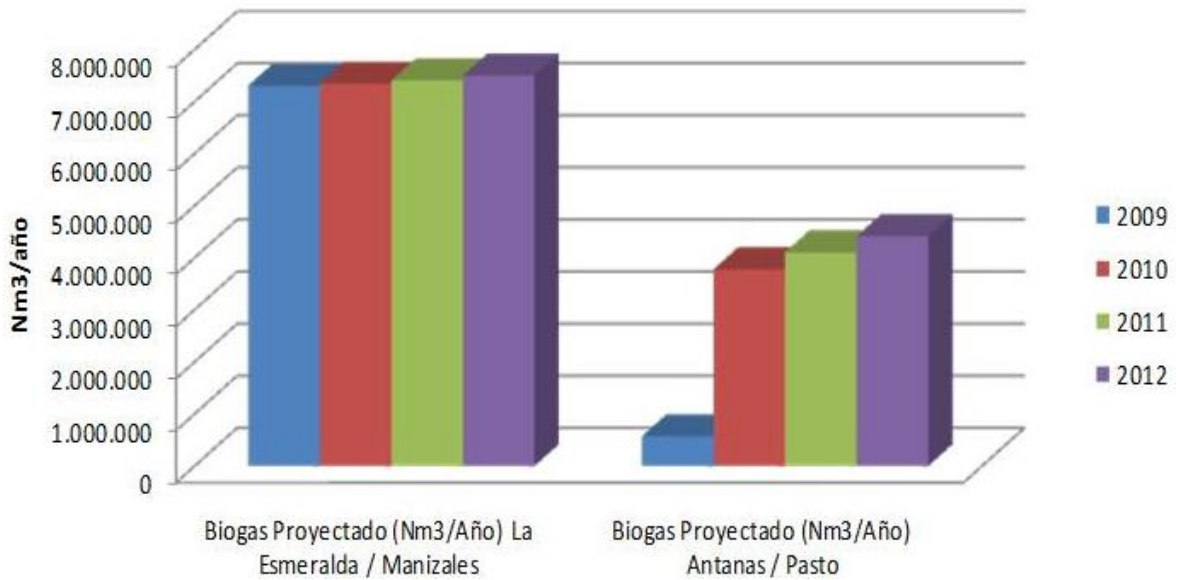
Figura 23. Comparación del tonelaje de residuos dispuestos en el relleno La Esmeralda vs. Antanas, por semestre 2008-2012.



Fuente: Elaboración propia, 2013.

La comparación entre el tonelaje de residuos dispuestos en ambos rellenos arroja que en el relleno La Esmeralda la cantidad de residuos dispuestos es mayor en cada uno de los años de estudio que en el de Antanas, esta situación se debe a que La Esmeralda recibe además de los residuos de la ciudad de Manizales las de aproximadamente 19 municipios vecinos, mientras que el de Antanas de la ciudad de Pasto solamente atiende a la ciudad y su área rural y a los municipios aledaños de Imués, Nariño, Guaitarilla, Tangua y otros municipios que por su cercanía y voluntad política disponen sus RSU en este sitio (ver figura 24). Cantidad de biogás proyectados por Bionergis en ambas ciudades (ver Anexos E y F).

Figura 24: Cantidad de biogás proyectados por BIONERGIS en ambas ciudades

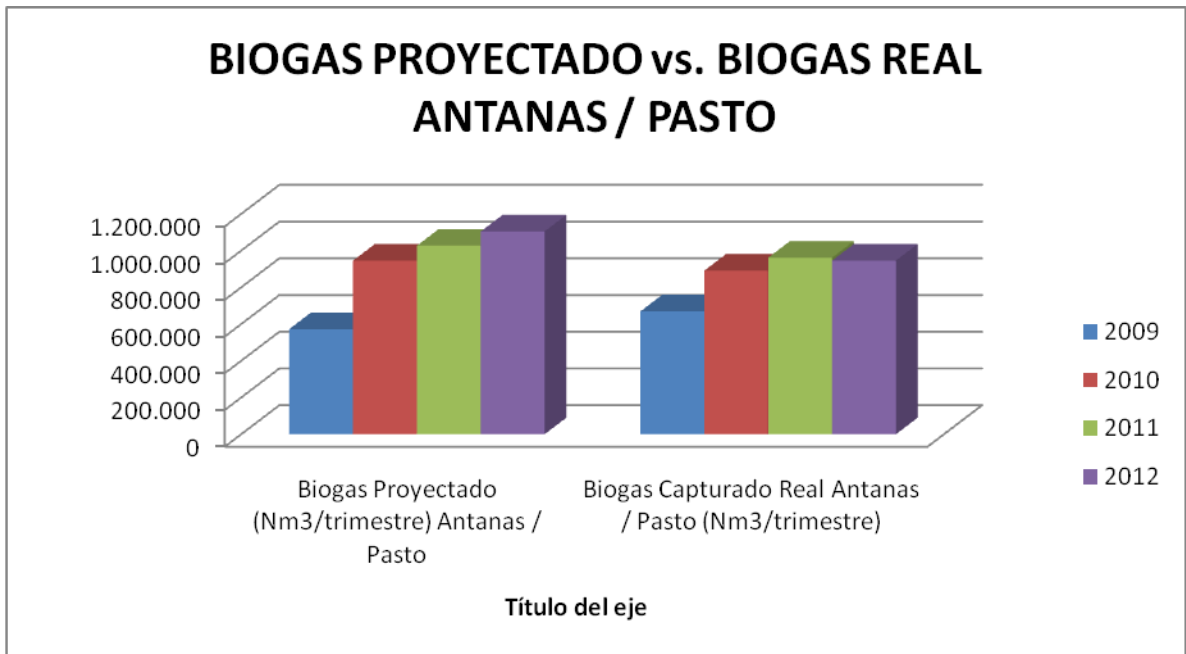


Fuente: Elaboración propia, 2012.

Habiendo sido aplicado el Modelo Colombiano de Biogás por parte de la empresa EMAS de Manizales y EMAS Pasto con los datos específicos para cada uno de los rellenos se generó unas toneladas proyectadas de biogás capturado a partir de finales de 2009 para ambos rellenos.

Luego de analizar estos datos (ver figura 24) el relleno La Esmeralda se estima que capturara un aproximado de 700.000 Nm³/año de biogás mientras que el relleno Antanas captura 500.000 Nm³/año; hay que tener en cuenta que este biogás proyectado se vio influenciado en su mayoría por las condiciones de cantidad de tonelaje dispuesta por cada relleno y las condiciones de precipitación anual recibidas en el mismo lo que hace que al momento de la descomposición de los RSU se genere mayor o menor nivel de biogás acumulado para ser captado.

Figura 25. Biogás proyectado vs. Biogás real Antanas / Pasto.



Fuente: Elaboración propia, 2012.

Debido a la problemática económica de la Unión Europea que generó una pausa en el desarrollo del proyecto en la ciudad de Manizales se decidió que dado a las similitudes del relleno de Antanas en cuanto al manejo (ya que es operado por la misma empresa en condiciones iguales de gestión) se tomaron los datos reales de captura y se compararon con los proyectados por Bionergis en la aplicación del modelo y se encontró que las cantidades reales capturadas son mayores que las estimadas en la proyección del modelo; cabe anotar que en la figura 25 para el año 2009 solamente fueron proporcionados por EMAS Pasto los datos de los meses de noviembre y diciembre de captura real sin embargo esta cantidad sigue siendo mayor al proyectado por el modelo, en cuanto al año 2012 se comparan solamente el primer trimestre del año de biogás real capturado frente a la proyección del modelo que toma los 12 meses del año.

4.4 EVALUACIÓN DEL MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS FRENTE A LAS OPORTUNIDADES DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EN COLOMBIA

Frente a la generación de energía procedente de la captura y posterior quema de biogás proveniente de rellenos sanitarios se encontró que a corto y mediano plazo la utilización de esta tecnología no es viable en Colombia debido a que el país

cuenta con numerosas fuentes de energía hidráulica y que la generación de esta es significativamente barata tanto en la generación como en la distribución y la tecnología que se requiere para la transformación del biogás quemado en energía actualmente es costosa y requiere de unos procesos de adaptación de los rellenos sanitarios en toda su infraestructura.

Sin embargo, la legislación colombiana cuenta con algunos incentivos para proyectos de generación de energía eléctrica de recursos renovables. Por ejemplo, la ley nacional 697 (2001) apoya el uso de fuentes de energía alternas y el uso eficiente y razonable de la energía. También, el artículo 20702 del Estatuto Tributario establece que el ingreso por la venta de energía eólica (energía generada por viento), desechos agrícolas o “biomasa” será exento de impuesto por 15 años comenzando en enero del 2003. El decreto 2755 (30 de septiembre del 2003) describe las normas para la aplicación de este incentivo. Este incentivo es valido solamente si el desarrollador del proyecto puede obtener Reducciones Certificadas de Emisiones (CERs) bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) e invierta por lo menos 50 por ciento de las ganancias obtenidas por la venta de CERs en obras de beneficio social en la región donde el generador está localizado. El decreto define obra de beneficio social como las actividades en las áreas de salud, educación, agua potable, protección ambiental y vivienda social (subsidiada).

El Sistema de Transmisión Nacional (STN) es un sistema “abierto”, que hace diferenciación entre tipos de tecnologías utilizadas para la generación de energía. Aunque la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) ha creado varias categorías para clasificar la generación energía, ninguna de estas categorías tiene beneficios adicionales al considerar la tecnología utilizada en la generación, por lo que la opción para generar energía usando el biogás de los rellenos sanitarios con capacidad inferior de 10 MW y cumple con la resolución 86 del 1996, puede negociar precios bilateralmente y otras condiciones de venta con el comerciante que reciba la energía y este último determinará la mejor estrategia para su venta al STN.

También es relevante establecer que actualmente la aplicabilidad de los modelos de biogás en Colombia están enfocados en la quema de biomasa como es el de Antanas en Pasto y en la venta de certificados de emisiones (CERs) como se encuentra diseñado el proyecto en el relleno sanitario La Esmeralda, por lo tanto la tecnología aún es incipiente para la transformación del gas generado en energía aunque en un futuro éste sería el paso siguiente de ambos proyectos.

En cuanto a la futura venta de gas, la conexión del sistema a la red de transporte de gas esta definido como “bienes de conexión” como en el caso de la electricidad. No existe un mercado mayorista o consolidado para el gas, los precios, puntos de suministro, y hasta las características del gas pueden ser negociados libremente a través de acuerdos bilaterales, si existe un usuario específico, el acuerdo bilateral puede ser negociado directamente con el usuario, en este sentido.

Los reglamentos no son muy claros en la necesidad de registrar la compañía como Empresa de Servicios Públicos para poder vender el biogás (procesado) a la red energética del país.

4.5 ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DEL MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS EN LOS RELLENOS SANITARIOS DEL PAÍS DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA GESTIÓN AMBIENTAL Y LOS PGIRS

Actualmente en Colombia los rellenos sanitarios se encuentran en un proceso de tecnificación en las grandes ciudades y procesos de cambio de botaderos a cielo abierto por rellenos sanitarios en las ciudades intermedias y en las pequeñas.

El Modelo Colombiano de Biogás en su fase inicial que comprende la aplicación del modelo estadístico, la instalación de sistemas de drenaje activo (chimeneas de captura) y torres de quemado implica un gasto importante a las empresas prestadoras del servicio de manejo de basuras, lo cual se debe tener en cuenta al momento de implementar este sistema de transformación de gases a los diferentes operadores.

También es importante recalcar que aunque actualmente la energía eléctrica se produce en Colombia es barata debido a las grandes fuentes de agua con las que contamos, en un futuro dichas fuentes de aguas podrían no encontrarse disponible para el fin de generar energía, por lo tanto se puede adelantar un proceso adecuación de los rellenos para que sean óptimos en un futuro cercano el aprovechamiento del biogás y así generar energía.

Adicional a esto en los PGIRS se establecen medidas a corto, mediano y largo plazo para mitigar los efectos causados por la operación de los rellenos sanitarios y la contaminación que estos generan, por esto la combustión controlada del biogás y su posterior aprovechamiento como energía estaría dando solución a uno

de los grandes problemas del manejo de RSU como lo son los GEI. Se estaría dando un manejo adecuado y sostenible a un problema lo cual es la finalidad de los PGIRS.

5. CONCLUSIONES

La caracterización de los residuos sólidos urbanos (RSU) que ingresan al relleno sanitario es importante no sólo porque ésta ayudará en la realización del modelo Colombiano de biogás sino también porque infiere en el comportamiento de la región a través del análisis de estos residuos.

En Colombia no se le da por lo general ninguna utilidad a las sobras de los alimentos después de preparados y estos por lo general terminan en la basura dado esto Colombia se puede catalogar según la bibliografía consultada como un país de ingresos medios según la disponibilidad que le da a sus residuos de comida, sería importante generar acciones culturales tendientes a evitar el desperdicio de comida principalmente en los hogares.

Según la caracterización de los residuos y los resultados previos del estudio de prefactibilidad del proyecto indican que la producción de biogás en el relleno sanitario La Esmeralda ocurre bajo condiciones anaeróbicas, con buena calidad del biogás (alto contenido de metano y nada de oxígeno y nitrógeno). No hubo mediciones de presión debido a las conexiones de las chimeneas modificadas pero la presencia de buena presión fue observada (gas saliendo fuertemente de una chimenea sellada) y sugiere un índice alto de generación de gas.

En la recuperación de biogás, en particular el contenido orgánico, cantidad de humedad y la degradación de la variedad de residuos. Por ejemplo, rellenos sanitarios con grandes cantidades de residuos alimenticios tienden a producir el biogás en las etapas tempranas del relleno sanitario pero en períodos más cortos, lo que podría suceder en los rellenos sanitarios de La Esmeralda y Antanas.

De los modelos de estimación de generación de biogás para un relleno sanitario, el que más se aplica para la situación de Colombia es el Modelo Colombiano de Biogás, dado que incluye variables como los diferentes tipos de precipitación que hay en Colombia, lo que influye en la calidad y forma de descomposición de los residuos, lo que se ve reflejado en la cantidad de biogás que generará el relleno.

Actualmente el relleno sanitario La Esmeralda cuenta con un sistema pasivo de quemado de biogás a través de chimeneas, los pozos de venteo pasivo (chimeneas) están ubicados a cada 40 metros. Las chimeneas fueron construidas desde el fondo del relleno sanitario hacia arriba con piedras de 4 pulgadas en

diámetro. Las chimeneas fueron terminadas con piedra expuesta. Con este sistema el porcentaje captura de biogás es del 40 al 70% y con la ubicación de antorchas de quemado este porcentaje generaría una eficiencia del 100% de quemado de biogás.

Para producir los índices máximos de recuperación de biogás, un sistema de colección con cobertura comprensivo en las áreas cerradas e inactivas deberá ser instalado hasta el grado intermediario del terreno. Con el propósito de estimar los índices de recuperación de biogás y la reducción de emisión de GEI.

El proyecto de quemado de biogás en el relleno La Esmeralda de Manizales es totalmente viable si se analiza los estimados arrojados por el modelo y lo que se está generando actualmente en el relleno de Antanas en Pasto, tanto por la similitud de terrenos, precipitación y manejo por parte de la empresa EMAS lo que indica que la proyección estadística del modelo es ajustada a la realidad.

Colombia tiene una fuente vasta de gas natural que está disponible a bajo costo en muchas partes del país. Además, las plantas de energía de gas natural de ciclo combinado proveen energía de forma barata. Por lo tanto, la energía generada por las plantas de biogás tendrá que competir con la generación de energía de bajo costo. Una alternativa sería vender el biogás directamente a usuarios con gran demanda ubicados cerca del relleno sanitario.

Se hace necesario que para el desarrollo futuro de nuevos rellenos sanitarios, se contemple dentro del diseño estructural de los mismos, la instalación de futuros pozos y chimeneas, que permitan la futura implementación de un proyecto de quemado de biogás y que los costos de éste sean menores que los actuales.

La financiación de estos proyectos no debe estar supeditada a las condiciones del mercado externo, como ocurrió en el relleno sanitario La Esmeralda, en donde al entrar en crisis las bolsas Europeas que son las mayores consumidoras de bonos CERs el proyecto quedó en estado de espera por insuficiencia de recursos.

6. RECOMENDACIONES

Hasta ahora, no hay proyectos de biogás en Colombia. Por lo que el(los) primero(s) proyecto(s) tendrán que enfrentar varias barreras tales como:

- Conocimiento limitado de las posibilidades de proyectos de biogás por parte de las autoridades municipales.

- Falta de conocimiento de las tecnologías involucradas.

- Falta de personal capacitado para construir/operar proyectos de biogás.

- Incertidumbre sobre los índices de tarifa interna de las inversiones en proyectos de biogás y la posibilidad que los índices no sean muy altos.

- Costos altos de transacción por falta de experiencia.

- Las Instituciones financieras no tienen la experiencia y pueden estar no dispuestas a financiar los proyectos de biogás.

Por lo tanto es recomendable que desde la mesa sectorial del IDEAM se promuevan este tipo de proyectos y se brinde toda la asesoría requerida para la puesta en marcha de los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

ARVIZU FERNÁNDEZ, José Luis. La basura como recurso energético: situación actual y prospectiva en México. 2010.

BAZÁN, Marcos. Introducción al mercado de bonos de carbono: foro global de bioenergía. 2007.

BERENT, Mario *et al.* Tratamiento de residuos sólidos urbanos en ciudades intermedias del NEA, orígenes, tipos y composición de residuos. 2005.

BLANCO, Gabriel *et al.* Estandarización de costos de proyectos de captura de metano en rellenos sanitarios. Buenos Aires: 2005.

BLANCO, Javier Tomás. Estrategia nacional para la implementación de MDL en Colombia. Bogotá, D.C.: Minambiente, 2008.

BIONERGIS. Consolidado biogás generado en el relleno sanitario de Antanas. Pasto: 2012.

CASTELLS, Xavier Elías. Tratamiento y valorización energética de residuos. 2005.

DE ÁVILA, Luis Eduardo. Aprovechamiento del biogás producido en rellenos sanitarios para generar energía eléctrica para el autoabastecimiento municipal. 2010.

ECDBC. Estrategia colombiana para el desarrollo bajo en carbono: escenarios de emisiones GEI sector residuos. 2012

EMAS S.A E.S.P. Aplicación del Modelo Colombiano de Biogás, La Esmeralda Manizales, 2010.

EMAS S.A E.S.P. Aplicación del modelo colombiano de biogás, Antanas Pasto, 2010.

EMAS S.A E.S.P. Informe anual de disposicion final de residuos solidos, 2011.

ERAZO ERAZO, Lizeth Alejandra. Inventario de emisiones del relleno sanitario Antanas del municipio de San Juan de Pasto. 2012.

ESCUADERO DE FONSECA, Alonso. Metano en residuos domésticos. 2009.

EVA, Roben. Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales. Ecuador, 2002.

FERNANDEZ, Patricia. Propiedades físicas de los RSU, 2005.

GONZÁLEZ B., Fabio, *et al.* Inventario preliminar de gases de efecto invernadero en Colombia: fuentes y sumideros. 1997.

HOFFMAN, Ludmila Giselle. Que es el biogás, 2013

IDEAM. Inventario nacional de fuentes y sumideros de gases efecto invernadero: módulo 6 de residuos. 2009.

IPCC. Directrices para los inventarios nacional de gases efecto invernadero. 2006.

IPCC. *Inventory software user manual version 2.0.* 2011.

LESUR, Luis. Manual del manejo de basuras en México. 1998.

MINAMBIENTE. Guía ambiental para rellenos sanitarios. 2002.

SCS ENGINEERS. Estudio de prefactibilidad de recuperación y utilización de biogás en el relleno sanitario La Esmeralda Manizales, Colombia. 2005.

SCS ENGINEERS. Manual del modelo colombiano de biogás versión 1.0. 2009.

STEGE, Alex. Entrenamiento del modelo Colombiano de biogás para rellenos. 2011.

SZANTO, Marcel. Grupo de residuos sólidos Universidad de Valparaiso (Chile). 2010.

TABORDA, Gabriel Jaime. Plan maestro para el manejo integral de residuos sólidos. 2009.

TCHOBANOGLIOUS, George. Desechos sólidos, principios de ingeniería y administración. 1994.

TORDABLE, Javier. El comercio de derechos de emisión de CO₂. 2005.

WEIHS, Juan Pablo. Conceptos básicos del biogás. ARS Methane to markers. 2010.

www.acodal.org.co

www.epa.gov/lmop/international/colombia.html

www.ipcc-nggip.iges.or.jp/software/new.html

www.prochile.cl/servicios/medioambiente/bonosdecarbono.php#2

www.sinia.cl

www.slideshara.net/toyoco300/g-r-s-u

www.wikipedia.org/wiki/biogas

ANEXO A. NORMATIVIDAD COLOMBIANA.

Leyes, Decretos, Resoluciones	Referencia
Constitución de 1991	Marco legal colombiano.
Ley 142 de 1994	se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.
Ley 632 de 2000	Servicio Público de Aseo. Es el servicio de recolección municipal de residuos, principalmente sólidos. También se aplicará esta ley a las actividades complementarias de transporte; tratamiento; aprovechamiento y disposición final de tales residuos.
Decreto 605 de 1996	Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994 en relación con la prestación del servicio público domiciliario de aseo.
Decreto 1713 de 2002	Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994; la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo; y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos.
Decreto 1505 de 2003	Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1713 de 2002; en relación con los planes de gestión integral de residuos sólidos.
Decreto 838 de 2005	Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.
Decreto 1792 de 2002	Asigna a los Municipio y Departamentos la responsabilidad en el manejo de los residuos sólidos y la obligación de formular e implementar Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS.
Resolución 1545 de 2003	Por la cual se adopta la metodología para la elaboración de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos; PG IRS; y se toman otras determinaciones.
Resolución 477 de 2004	Por la cual se modifica la Resolución 1045 de 2003; en cuanto a los plazos para iniciar la ejecución de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos; PGIRS; y se toman otras determinaciones.
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables; se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.
RAS	Reglamento técnico del sector.

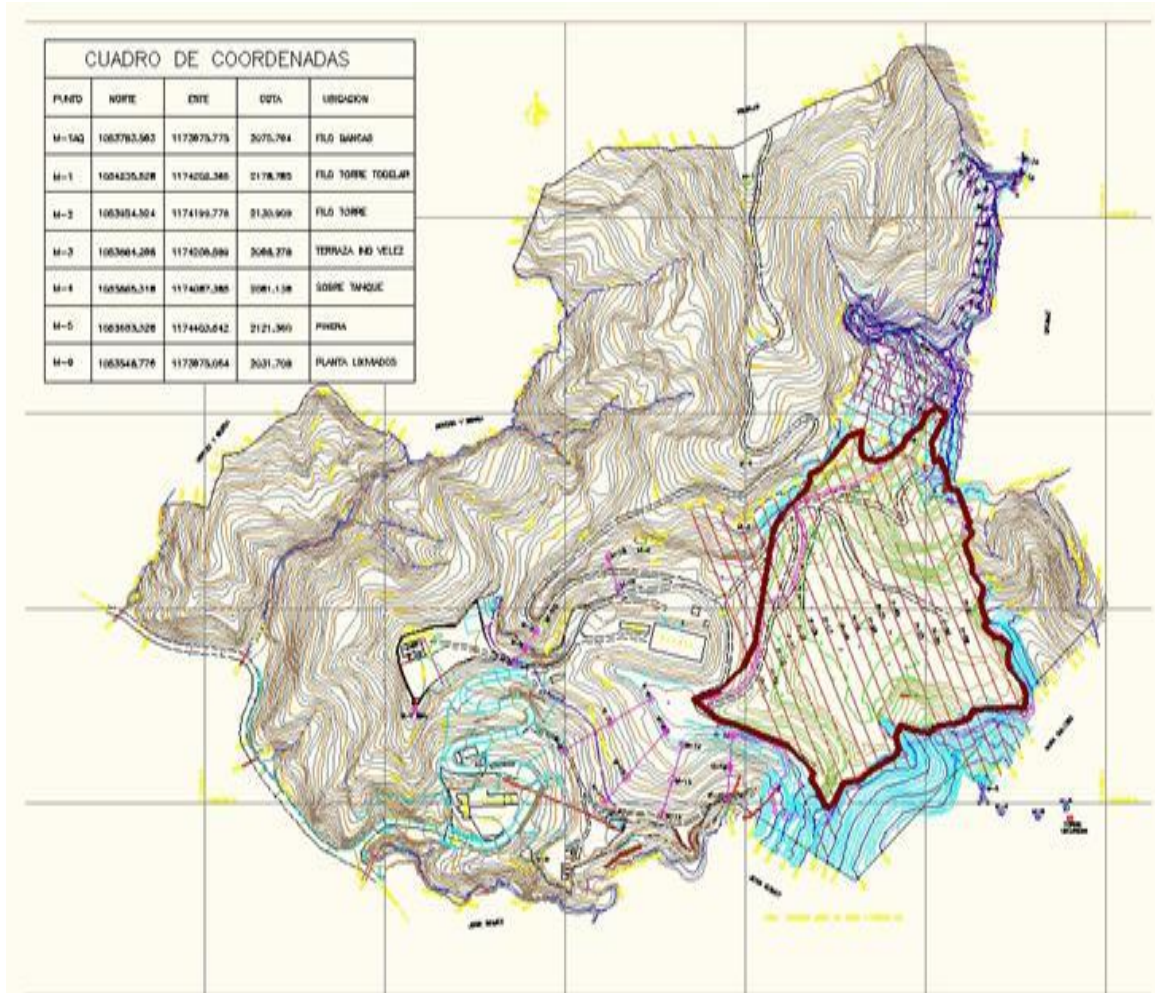
Fuente: Las autoras, 2012.

ANEXO B. PANORÁMICA GENERAL DEL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA, MANIZALES.



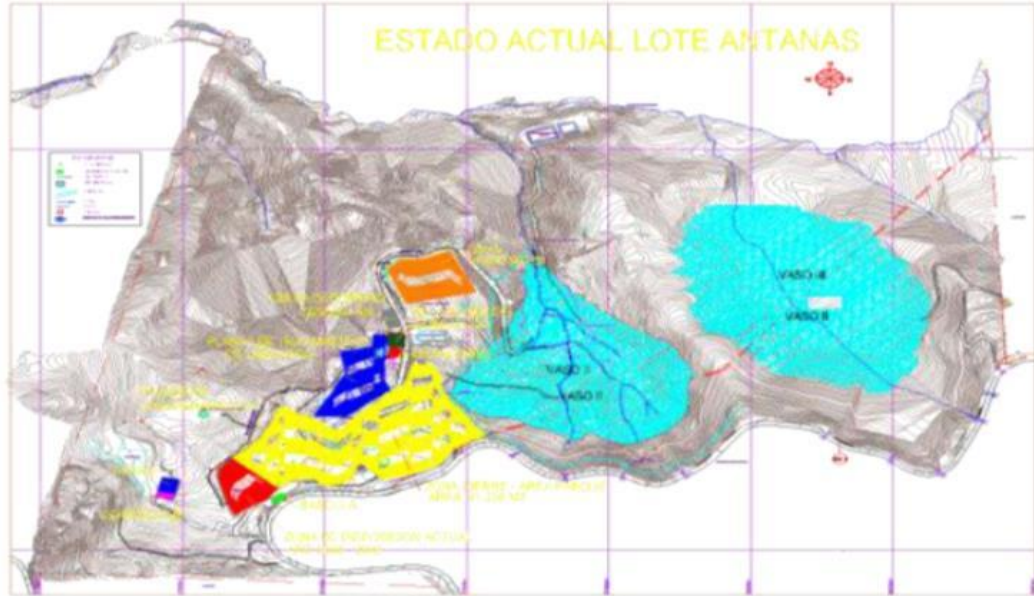
Fuente: EMAS, 2008.

ANEXO C. PLANO DEL RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA, MANIZALES.



Fuente: EMAS, 2005.

ANEXO D. PLANO DE DISTRIBUCIÓN DEL RELLENO SANITARIO ANTANAS , PASTO.



Fuente: EMAS – Pasto, 2005.

**ANEXO E. RESUMEN DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS
RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA, MANIZALES.**

Año	Toneladas año	Promedio mes
1991	38.219,04	3.184,92
1992	39.747,84	3.312,32
1993	41.337,72	3.444,81
1994	42.991,32	3.582,61
1995	44.710,92	3.725,91
1996	72.011,02	6.000,92
1997	95.317,99	7.943,17
1998	106.583,28	8.881,94
1999	117.497,99	9.791,50
2000	120.140,27	10.011,69
2001	125.924,67	10.493,72
2002	122.394,00	10.199,50
2003	140.021,84	11.668,49
2004	140.309,74	11.692,48
2005	141.590,09	11.799,17
2006	148.769,99	12.397,50
2007	140.801,17	11.733,43
2008	142.391,63	11.865,97
2009	127.428,38	10.619,03
2010	138.620,16	11.551,68
2011	147.677,55	12.306,46
2012	83.804,92	11.972,13

Fuente: EMAS, 2012.

**ANEXO F. RESUMEN DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS
RELLENO SANITARIO ANTANAS, PASTO.**

Año	Toneladas año	Promedio mes
2003	81.379	6.690
2004	83.170	6.840
2005	84.999	6.990
2006	86.869	7.140
2007	88.781	7.290
2008	90.734	7.470
2009	92.730	7.770
2010	94.770	7.800
2011	96.855	7.950
2012	49.493	8.130

Fuente: EMAS – Pasto, 2012.

**ANEXO G. MUESTREO DE GASES RELLENO SANITARIO LA
ESMERALDA, MANIZALES, 2004.**

Distancia desde la chimenea (metros)	CH⁴ (5)	SO₂ (ppm)	H₂S (ppm)	CO (ppm)
Chimenea apagada				
0 m	60	20.7	8	128
5 m	21	3	2	37
10 m	7	27	1	21
20 m	3	0.3	0	0
Valor de control	5	0.1	15	12.7
Chimenea encendida				
5 m	0	0.3	0	6
10 m	0	0	0	0
20 m	0	0	0	0
Valor de control	5	0.1	15	12.7

Fuente: EMAS, 2004.

**ANEXO H. ESTIMADO DE REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO
INVERNADERO CON EL PROYECTO DE QUEMADO DE BIOGÁS EN EL
RELLENO SANITARIO LA ÉSMERALDA.**

Año	CERs anticipados (Ton CO₂ eq/año)
2008	61.887
2009	63.240
2010	64.481
2011	65.644
2012	66.751
2013	67.818
2014	68.856
2015	69.872
2016	75.998
2017	54.541
2018	39.930
2019	29.927
Total	728.945

Unidades de toneladas métricas de metano/año y toneladas métricas de CO₂/año

Fuente: EMAS, 2012.

ANEXO I. REGISTRO FOTOGRÁFICO RELLENO SANITARIO LA ESMERALDA, MANIZALES.



Fuente: Las autoras, 2012



Fuente: Las autoras, 2012.