



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**GENERACIÓN DE ENERGÍA EN RELLENOS SANITARIOS
A PARTIR DEL APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS
EMITIDO**

T E S I S M A N C O M U N A D A

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

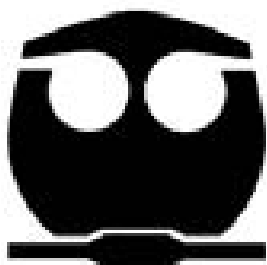
I N G E N I E R O Q U Í M I C O

P R E S E N T A N:

MARCO DOMENZAIN GALIMBERTI

Y

ALEJANDRA CRISTINA ESPINOSA MENDOZA



MÉXICO, D.F.

2009

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: José Antonio Ortiz Ramírez

VOCAL: Rodolfo Torres Barrera

SECRETARIO: Alfonso Durán Moreno

1^{er} SUPLENTE: Alejandro Zanelli Trejo

2^{do} SUPLENTE: José Agustín García Reynoso

SITIO DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

Torre de Ingeniería 5º piso ala sur,
Instituto de Ingeniería, UNAM
Circuito Escolar S/N, Ciudad Universitaria
Coyoacán, Distrito Federal, 04510

ASESOR:

José Antonio Ortiz Ramírez

SUSTENTANTES:

Marco Domenzain Galimberti

y

Alejandra Cristina Espinosa Mendoza

Dedico este trabajo a mis padres y hermanos, por su amor y apoyo incondicional,
y a mi país.

Agradezco a la UNAM y a la Facultad de Química por abrirme las puertas del conocimiento y llenar mi vida de experiencias y personas valiosas; a mi familia, que me inspira para seguir adelante; a todos los amigos que me han acompañado en este camino, en especial a Pamela, Diana, Alfonso y Rodrigo; y al Ingeniero José Antonio Ortiz por su valiosa asesoría y apoyo para la realización de este trabajo.

"Hacer predicciones es muy difícil, especialmente cuando se trata del futuro."

Niels Bohr

Alejandra Espinosa Mendoza

Debo agradecer de manera especial y sincera al Ingeniero José Antonio Ortiz por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección. Su apoyo y confianza en nuestro trabajo y su capacidad para guiar nuestras ideas ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en nuestra formación como personas. Gracias.

También quiero agradecer a mi papá, por sus consejos, por su guía y por el gran ejemplo que es para mí. A mis hermanos, que me acompañan incondicionalmente en esta gran aventura; la vida no sería la misma sin todos ustedes a mi lado, los amo...

A toda mi familia por las sonrisas, las palabras de aliento y exigencias; que hacen de mi una mejor persona y siempre me animan a ir por más.

A todos mis amigos, con quienes viví tantas experiencias, triunfos, desveladas, ilusiones, aventuras, momentos felices y desdichados. Les agradezco por su confianza y lealtad. Por tu apoyo, comprensión y amor que me permite lograr lo que me proponga.

En memoria de mi mamá Sandra y *nono* Giulio, pues abrieron mi corazón con sus ejemplos de vida.

“Si he conseguido ver más lejos, es porque me he montado en hombros de gigantes.”

Isaac Newton

Marco Domenzain Galimberti

ÍNDICE

RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS	9
3. MARCO TEÓRICO.....	10
3.1 El mercado de carbono	10
3.1.1 El efecto invernadero y el cambio climático.....	10
3.1.2 Acuerdos internacionales en materia del cambio climático	12
3.1.3 El mercado de la reducción de emisiones	14
3.1.3.1 Mecanismos de Desarrollo Limpio.....	16
3.2 Los residuos sólidos urbanos en México	23
3.2.1 Generación de residuos sólidos urbanos.....	25
3.2.2 Manejo de los residuos sólidos urbanos	28
3.2.3 Legislación en materia de gestión integral de residuos sólidos y aprovechamiento energético de los mismos.....	30
3.2.3.1 Gestión integral de residuos sólidos.....	30
3.2.3.2 Prevención y control de la contaminación	30
3.2.3.3 Generación y venta de energía.....	32
3.2.4 Aspectos críticos y problemas identificados.....	33
3.2.3.1 Aspectos técnicos	33
3.2.3.2 Aspectos legales.....	34
3.2.3.3 Aspectos institucionales	35
3.3 Etapas de aprovechamiento de un relleno sanitario.....	36
3.3.1 ¿Qué es un relleno sanitario?	36
3.3.2 Planeación de un relleno sanitario	37
3.3.3 Preparación del sitio	39
3.3.4 Operación de un relleno sanitario	40
3.3.4.1 Métodos de relleno.....	40
3.3.4.2 Configuración básica para la disposición final de los residuos.....	43
3.3.5 Descomposición de los residuos y manejo de emisiones.....	45
3.3.5.1 Generación y control de lixiviados.....	45
3.3.5.2 Generación y control de biogás	47
3.3.5.3 Modelo utilizado para la estimación de la emisión de biogás en un relleno sanitario	52
3.3.6 Clausura de un relleno sanitario	60
3.4 Aprovechamiento del biogás proveniente de rellenos sanitarios para generar energía	61
3.4.1 Generalidades	61
3.4.2 Aprovechamiento del biogás	62
3.4.3 Sistemas de recuperación de energía.....	64
3.4.3.1 Turbinas de vapor	64
3.4.3.2 Turbinas de gas	64
3.4.3.3 Turbinas de ciclo combinado	65

3.4.3.4 Motores de combustión interna.....	67
3.4.3.5 Eficiencia de los sistemas.....	68
3.4.4 Pretratamiento del biogás para su aprovechamiento.....	68
3.4.4.1 Remoción de H ₂ O.....	70
3.4.4.2 Remoción de gases ácidos (CO ₂ y H ₂ S)	72
3.4.4.3 Remoción de siloxanos	86
3.4.5 Sistema de control para el sistema de pretratamiento y aprovechamiento del biogás.....	87
4.6 Control ambiental	88
4.6.1 Emisiones atmosféricas	88
4.6.2 Control de la contaminación.....	90
4. METODOLOGÍA.....	92
4.1 Selección de rellenos sanitarios a evaluar	92
4.2 Cálculo de emisiones.....	93
4.3 Opciones de aprovechamiento.....	95
4.4 Análisis de costos	98
4.4.1 Costos del equipo de generación de electricidad.....	98
4.4.2 Costos de preparación del relleno sanitario y acondicionamiento del biogás	100
4.4.3 Estimación de costos totales	103
4.5 Análisis financiero	105
4.6 Impacto ambiental.....	112
5. RESULTADOS	113
5.1 Costos de equipo e instalación para sistemas de extracción y acondicionamiento del biogás	113
5.2 Resultados de las simulaciones para cada relleno sanitario.....	114
5.2.1 Relleno Nuevo Laredo.....	114
5.2.1.1 Impacto ambiental.....	114
5.2.1.2 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 25 años	114
5.2.1.3 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 15 años	116
5.2.1.4 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 25 años	117
5.2.1.5 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 15 años	118
5.2.2 Relleno Mérida.....	119
5.2.2.1 Impacto ambiental.....	119
5.2.2.2 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 25 años	119
5.2.2.3 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 15 años	121
5.2.2.4 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 25 años	122
5.2.2.5 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 15 años	123
5.2.3 Relleno Querétaro	124
5.2.3.1 Impacto ambiental.....	124
5.2.3.2 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 25 años	124
5.2.3.3 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 15 años	126
5.2.3.4 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 25 años	127
5.2.3.5 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 15 años	128

5.2.4 Relleno Picachos, Zapopan	129
5.2.4.1 Impacto ambiental.....	129
5.2.4.2 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 25 años	129
5.2.4.3 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 15 años	131
5.2.4.4 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 25 años	132
5.2.4.5 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 15 años	133
5.2.5 Relleno El Verde, León	134
5.2.5.1 Impacto ambiental.....	134
5.2.5.2 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 25 años	134
5.2.5.3 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 15 años	136
5.2.5.4 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 25 años	137
5.2.5.5 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 15 años	138
5.2.6 Relleno Bordo Poniente	139
5.2.6.1 Impacto ambiental.....	139
5.2.6.2 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 25 años	139
5.2.6.3 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 15 años	141
5.2.6.4 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 25 años	142
5.2.6.5 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 15 años	143
5.2.6.6 Aprovechamiento con turbinas de ciclo combinado, tiempo de vida 15 años.....	144
5.3 Resumen de resultados.....	145
5.4 Discusión de resultados	147
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	149
REFERENCIAS.....	150
Anexo I	155

Lista de Tablas

Tabla 3.1 Normas Oficiales Mexicanas en material de calidad de aire	31
Tabla 3.2 Normas Oficiales Mexicanas en materia de emisión de contaminantes de fuentes fijas.....	31
Tabla 3.3 Factores que influyen en la generación de lixiviados en un relleno sanitario..	46
Tabla 3.4 Composición y características del biogás en un relleno sanitario	51
Tabla 3.5 Índice de generación de metano (k)	55
Tabla 3.6 Generación potencial de metano (Lo)	55
Tabla 3.7 Eficiencia de recolección de biogás en rellenos sanitarios	59
Tabla 3.8 Especificaciones técnicas de algunos equipos de aprovechamiento del biogás para la obtención de energía.....	69
Tabla 3.9 Procesos de remoción de H ₂ S y CO ₂ en corrientes de gas.....	74
Tabla 3.10 Procesos comunes para la remoción de gases ácidos, disponibles en el mercado	75
Tabla 3.11 Diferentes tipos de solventes para absorción de H ₂ S, ventajas y desventajas	77
Tabla 3.12 Límites máximos permisibles de contaminantes para equipos que operen con combustibles fósiles gaseosos, de capacidad mayor a 300 MWh.....	90
Tabla 4.1 Características importantes de los rellenos sanitarios seleccionados.....	93
Tabla 4.2 Cálculo de la capacidad energética del equipo seleccionado.....	97
Tabla 4.3 Factores para la determinación de costos de turbinas de ciclo combinado ..	100
Tabla 4.4 Selección del sistema de recolección del biogás	101
Tabla 4.5 Selección del sistema de flujo y control en la extracción	102
Tabla 4.6 Selección del sistema de pretratamiento del biogás emitido.....	103
Tabla 4.7 Estimado de costos para el proyecto de aprovechamiento de energía en el Relleno Querétaro con motores recíprocos	104
Tabla 4.8 Parámetros financieros y tarifas de venta de energía eléctrica, ejemplo Relleno Querétaro.....	106
Tabla 4.9 Resumen de costos iniciales y anuales	107
Tabla 4.10 Flujo de caja anual para el proyecto de aprovechamiento energético en el Relleno Querétaro	108
Tabla 4.11 Significado de términos financieros como criterios de viabilidad financiera	109
Tabla 4.12 Análisis de viabilidad financiera para el proyecto en el Relleno Querétaro.	109
Tabla 4.13 Factores de ingreso por venta de bonos de carbono	111
Tabla 4.14 Equivalencias en la reducción de emisiones.....	112
Tabla 5.1 Selección del sistema de extracción y remoción de contaminantes	113
Tabla 5.2 Estimado de costos de equipos de extracción y acondicionamiento del biogás	113
Tabla 5.3 Costos totales de los sistemas de extracción y pretratamiento para cada relleno sanitario	113
Tabla 5.4 Resumen de viabilidad financiera de los proyectos propuestos en diferentes escenarios	146

Lista de Figuras

Figura 3.1 Pasos para la implementación de un MDL	18
Figura 3.2 Preparación de un sitio para la disposición de RSU.....	40
Figura 3.3 Relleno de trinchera o zanja	41
Figura 3.4 Relleno de área	42
Figura 3.5 Método combinado de relleno	43
Figura 3.6 Celda típica en un relleno sanitario	44
Figura 3.7 Etapas de la generación de biogás	49
Figura 3.8 Pozo vertical típico para la extracción de biogás.....	57
Figura 3.9 Distribución de pozos para la extracción de biogás	58
Figura 3.10 Opciones de aprovechamiento del biogás como combustible.....	63
Figura 3.11 Generación de energía mediante turbinas de gas.....	65
Figura 3.12 Generación de energía mediante turbinas de ciclo combinado	66
Figura 3.13 Generación de energía mediante motores recíprocos	67
Figura 3.14 Cálculo de eficiencia al convertir calor en energía	68
Figura 3.15 Diagrama de flujo para una unidad de adsorción típica de dos torres	72
Figura 3.16 Absorción de gases ácidos con carbonato de potasio caliente	81
Figura 3.17 Absorción física de gases ácidos	82
Figura 3.18 Proceso Lo-Cat	83
Figura 4.1 Ventana de la base de datos para la selección del equipo de aprovechamiento energético.....	96

Lista de Gráficas

Gráfica 3.1 Países anfitriones de proyectos MDL	21
Gráfica 3.2 Generación de residuos sólidos urbanos en México por región, 2004.....	26
Gráfica 3.3 Relación de la contribución estatal al PIB y generación total de RSU, 2003 .	26
Gráfica 3.4 Composición típica de la basura en México	27
Gráfica 3.5 Disposición final de RSU en México, 2004.	28
Gráfica 3.6 Disposición de RSU en rellenos sanitarios o tiraderos controlados por tipo de localidad, 2004	29
Gráfica 4.1 Cálculo de emisiones de biogás para la cantidad de basura depositada en el Relleno Querétaro	95
Gráfica 4.2 Biogás requerido para la operación del motor o turbina seleccionados	97
Gráfica 4.4 Costos de equipo e instalación de motores recíprocos	98
Gráfica 4.5 Costos de equipo e instalación de turbinas de gas (<5MW).....	99
Gráfica 4.6 Costos de equipo e instalación de turbinas de gas (5 a 50 MWH).....	99
Gráfica 4.6 Flujo de capital acumulado para el proyecto de aprovechamiento energético del biogás con motor recíproco, en el Relleno Querétaro	110
Gráfica 4.7 Flujo de capital acumulado para el proyecto de aprovechamiento energético del biogás como MDL con motor recíproco, en el Relleno Querétaro.....	111
Mapa 3.1 Regionalización empleada para el análisis de generación de RSU.....	25
Mapa 3.2 Generación de RSU por habitante por día, 2005.....	27

RESUMEN

La gestión integral de residuos sólidos urbanos (RSU) en México, plantea grandes retos administrativos, legales y sociales, que deben resolverse para reducir los problemas ambientales y de salud que de ella se derivan. Uno de los problemas fundamentales es la mala disposición final de los RSU. En México, sólo la mitad de los residuos generados son depositados en rellenos sanitarios, que si bien son una solución parcial, consituyen una mejor opción que la prácticas más comunes, como son los tiraderos a cielo abierto o la incineración; pero existen ciertas prácticas que facilitarían la implementación de mejores sitios de disposición final de RSU, mediante incentivos económicos derivados de la venta de electricidad o de reducciones de emisiones.

El desarrollo del presente trabajo, constituye un estudio de la situación actual de la basura en México y el marco legal que la regula, el mercado de carbono y las opciones de aprovechamiento de biogás en rellenos sanitarios para la generación de energía eléctrica, así como un análisis de la viabilidad financiera de distintos escenarios. El objetivo fundamental es identificar los factores que afectan la rentabilidad de los proyectos de aprovechamiento energético.

Con ayuda del simulador RETScreen® se calcularon las emisiones de biogás en 6 rellenos sanitarios localizados en diferentes zonas del país y se analizaron las opciones tecnológicas disponibles en el mercado para su aprovechamiento. Se determinó que factores tales como la escala, el clima y el índice de precipitación influyen en la generación de biogás y, por lo tanto, en la rentabilidad de los proyectos.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento desproporcionado de las zonas metropolitanas y la falta de planeación urbana, han hecho de la gestión integral de los residuos sólidos uno de los problemas administrativos y ambientales más graves de nuestro país. En México, sólo la mitad de los residuos que se generan día con día son depositados en rellenos sanitarios; mientras que, los demás se depositan en tiraderos a cielo abierto, ocasionando graves problemas. El mal manejo y sobre todo, la mala disposición final de los residuos sólidos urbanos, tienen consecuencias dañinas en la calidad de vida de las comunidades cercanas ya que producen contaminación atmosférica, dañan la calidad del agua, alteran el paisaje, y son foco de infecciones que amenazan la salud pública.

Algunos factores que limitan la implementación y mejora de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, para reducir la emisión de biogás a la atmósfera y la filtración de lixiviados a los mantos freáticos, son la falta de recursos y también la poca claridad legislativa en cuanto a la responsabilidad diferenciada a nivel federal, estatal y municipal para el manejo de los residuos en el país. Sin embargo, aunque la acumulación de residuos sólidos urbanos sea vista en muchos niveles como un problema, éstos pueden ser aprovechados para generar energía comercializable, haciendo rentable su gestión integral.

Este trabajo resulta relevante en el campo de la Ingeniería Ambiental ya que presenta opciones tecnológicas para la generación de energía a partir del biogás emitido y la reducción de emisiones en algunos rellenos sanitarios de México. El marco teórico ayuda a comprender la situación actual de los residuos en el país, el marco legal que regula su aprovechamiento energético, y describe brevemente la situación mundial actual en cuanto a la reducción de emisiones y el nuevo “mercado de carbono”. Posteriormente, se presenta una selección de rellenos sanitarios de México, con diferentes características, y el análisis de la viabilidad técnica y económica para la instalación de sistemas de aprovechamiento energético del biogás en cada sitio, a partir de la posibilidad de

la venta de electricidad a los municipios y de bonos de carbono en el mercado internacional. Además, a través de la simulación de distintos escenarios de aprovechamiento en rellenos localizados en diferentes zonas del país, se pretende determinar si factores tales como la escala, el clima y el índice de precipitación influyen en la generación de biogás y, por lo tanto, en la rentabilidad de los proyectos.

Por su impacto positivo en el medio ambiente, pero también por el ahorro en costos de consumo eléctrico que significarían para los municipios, los proyectos de generación de electricidad a partir del biogás podrían ser un factor que posibilite la implementación de mejores sistemas de gestión integral de residuos sólidos en México.

2. OBJETIVOS

- Determinar la rentabilidad de proyectos de recuperación energética en rellenos sanitarios localizados en diferentes zonas del país.
- Analizar la importancia del clima y la escala de los rellenos sanitarios en la generación de metano.
- Analizar la rentabilidad de diferentes tecnologías para la recuperación energética de biogás en rellenos con diferente clima y escala.
- Analizar la influencia de la venta de bonos de carbono en la rentabilidad de estos proyectos.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 *El mercado de carbono*

3.1.1 El efecto invernadero y el cambio climático

El Sol emite radiación de diferentes longitudes de onda que llega a la Tierra en forma de luz visible y radiación ultravioleta, principalmente. La mayor parte de la radiación es absorbida por el ozono de la estratósfera y la fracción que llega a la Tierra en forma de luz visible es reflejada inmediatamente por la atmósfera, los suelos y los océanos. Esta fracción se conoce como *albedo* y comprende cerca del 30% de la radiación que llega a la superficie terrestre. El resto de la energía es absorbido por la Tierra que después, al haberse calentado, la emite como radiación infrarroja de mucha mayor longitud de onda que la luz visible. La mayor parte de esta radiación queda atrapada en la atmósfera por los gases de *efecto invernadero*. Si no existiera esta capa de gases, la temperatura media de la superficie terrestre sería de unos -22°C , pero gracias a este efecto es de cerca de 14°C , en promedio. Los gases de efecto invernadero (GEI), responsables del efecto descrito, constituyen menos del 1% de la atmósfera y son: ¹

- Vapor de agua (H_2O)
- Dióxido de carbono (CO_2)
- Metano (CH_4)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Ozono (O_3)
- Clorofluorocarbonos (CFC) (*sintetizados por el hombre*)

La concentración de los gases en la atmósfera se puede expresar en partes por millón (ppm) o partes por billón (ppb). En el caso de ppm, se puede visualizar como un centímetro cúbico (cm^3) de gas por metro cúbico (m^3) de aire; una ppm también significa que hay una molécula del gas en cuestión por cada millón de moléculas de todos los gases presentes. Algunos GEI absorben la radiación con más efectividad que otros porque lo hacen a distintas longitudes de onda y en

¹ UNFCCC, *GHD*, 2006.

ocasiones se superponen unos sobre otros. Para tener en cuenta las diferencias en la absorción, se ha introducido el concepto de *calentamiento global potencial*, en el que todos los gases se comparan con el CO₂ que tiene un potencial de calentamiento global de uno. Por ejemplo, a lo largo de un período de 100 años el potencial de calentamiento global del CH₄ es 21 veces el del CO₂.

Es importante establecer el potencial de calentamiento global en relación con un período de tiempo, porque el ciclo de vida atmosférico de los GEI varía considerablemente. El CO₂ puede permanecer en la atmósfera de 50 a 200 años, en función de cómo se recicle en la tierra o en los océanos; el CH₄ puede durar de 10 a 15 años y algunos de los gases fluorados de efecto invernadero tienen un ciclo de vida de miles de años.

Desde la Revolución Industrial, la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado de 280 a 360 ppm. El incremento de las concentraciones de otros GEI se puede sumar al incremento total, expresándolo como CO₂ equivalente. Actualmente, la concentración total de GEI ha alcanzado un nivel de 425 ppm.² Ésta atrapa una parte mucho mayor de la radiación infrarroja que la Tierra emite, ocasionando un incremento en la temperatura promedio de todo el planeta. Las comunidades científicas se han visto divididas en cuanto a las causas del cambio climático, pero cada vez son menos los que niegan que las emisiones antropogénicas son un factor que, si bien no es la única causa del calentamiento, ha acelerado el proceso e incrementado la magnitud de la inercia del fenómeno. Las actividades humanas se dan hoy en día a una escala tal que comienzan a interferir con los sistemas naturales. El cambio climático es un problema complejo y de enorme dificultad; por ello, los responsables de elaborar políticas ambientales necesitan una fuente de información objetiva y confiable acerca de las causas del calentamiento, sus posibles repercusiones medio ambientales y socioeconómicas, y las posibles respuestas ante los fenómenos que de él se deriven.

² UNFCCC, *EB*, 2006

En 1988, la Organización de las Naciones Unidas, creó el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) que es un foro científico que reúne a miles de expertos del clima de todo el mundo. Dicho grupo prevee que la temperatura global media puede subir a lo largo de este siglo entre 1.4 y 5.8°C como consecuencia de las actividades humanas. Es posible que esta diferencia no parezca significativa, pero durante la última Edad de Hielo, hace más de 11 500 años, la temperatura global era de solamente 5°C menos que en la actualidad, y una gruesa capa de hielo cubría Europa. El objetivo de este grupo es reunir toda la información científica, técnica y socioeconómica disponible, evaluarla de manera exhaustiva y establecer y publicar un punto de vista general en informes que pretenden ser de utilidad para la toma de decisiones globales.³

3.1.2 Acuerdos internacionales en materia del cambio climático

El Primer Informe de Evaluación del IPCC se publicó en 1990, y confirmó los elementos científicos que preocupan acerca del cambio climático. A raíz de ello, la Asamblea General de la ONU decidió preparar una Convención Marco sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés). Su objetivo es "la estabilización de las concentraciones de gases invernadero en la atmósfera a un nivel que evite la interferencia del daño antropogénico [causado por el hombre] con el sistema climático". Uno de los principios fundamentales es el de "las responsabilidades comunes pero diferenciadas", que demanda que los países desarrollados tomen la iniciativa en la lucha contra el cambio climático y sus impactos. Al diferenciar entre países desarrollados y países en vías de desarrollo, la UNFCCC reconoce que los países desarrollados e industrializados son responsables de la mayor parte de la formación y concentración actuales de GEI en la atmósfera, y que al contar con mayores recursos financieros y tecnológicos, son ellos quienes tienen un mayor compromiso en la reducción de emisiones.

³ UNFCCC, *EB*, 2008

El 11 de diciembre de 1997, la Convención adoptó el Protocolo de Kyoto, que establece ciertos límites legales sobre las emisiones de GEI de los 41 países originalmente industrializados, incluidos todos los Estados miembros de la Unión Europea, salvo Chipre y Malta, la Unión Europea como órgano único. Además, introduce nuevos mecanismos de implementación de mercado - los denominados *mecanismos flexibles de Kyoto* - para mantener bajo el costo de la reducción de emisiones.

Las emisiones futuras de GEI dependerán de las tendencias demográficas, económicas, tecnológicas y sociales en el mundo. Cuantas más personas haya, más elevadas serán probablemente las emisiones. El nexo con el desarrollo económico es menos claro. Los países ricos en general, debido a su estilo de vida, producen más emisiones por persona que los países pobres. Sin embargo, los países con condiciones económicas similares pueden tener tasas de emisión muy diferentes según sus circunstancias geográficas, sus fuentes de energía, la eficiencia con que la utilizan y otros recursos naturales. Es por eso que el Protocolo, atendiendo los principios fundamentales de la UNFCCC, dividió a las 184 partes firmantes en:⁴

- Países Anexo I (desarrollados, sólo 37 de los firmantes):
 - Tienen que reducir sus emisiones de GEI de manera absoluta.
- Países No Anexo I (en vías de desarrollo, incluido México):
 - No tienen compromisos cuantitativos.
 - Deben formular inventarios de emisiones e implementar programas de mitigación.
 - Tienen la oportunidad de aprovechar el mercado de reducción de emisiones a través de *mecanismos flexibles*.

De acuerdo con el Protocolo de Kyoto, los países desarrollados deben reducir sus emisiones de seis gases invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido

⁴ UNFCCC, *Protocolo de Kyoto*, 2005

nitroso, clorofluorocarbonos, perfluorocarbonos y sulfuro hexafluorido) un 5.5% por debajo del nivel de 1990 durante el primer "período de compromiso" del Protocolo, que comprende de 2008 al 2012. No existen objetivos específicos en cuanto a la reducción de emisiones en los países en desarrollo.⁵

3.1.3 El mercado de la reducción de emisiones

Con la firma del Protocolo se han establecido incentivos económicos para que empresas privadas contribuyan mejorar la calidad ambiental y se consiga regular la contaminación generada por sus procesos productivos, considerando el derecho a contaminar como un bien canjeable y con un precio establecido en el mercado. Esto permite mitigar la generación de gases contaminantes, beneficiando a las empresas que no contaminan o disminuyen la contaminación y haciendo pagar a las que contaminan más de lo permitido. El Protocolo contempla la utilización de tres *mecanismos flexibles* para ayudar al cumplimiento de las obligaciones contraídas por los países desarrollados respecto a la limitación de los GEI. Los mecanismos son: el llamado **Comercio de Emisiones**, la **Aplicación Conjunta (AC)** y el **Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)**. Los dos últimos se basan en la realización de proyectos de tecnología sustentable.⁶

Las dos primeras iniciativas comprenden el comercio de emisiones y la implementación conjunta, y están reservadas para los países que tienen compromisos de reducciones de emisiones en el marco del Protocolo de Kyoto. Por lo tanto, los países en desarrollo que no tienen estos compromisos, y tampoco tienen acceso a estas oportunidades. En cambio, la tercera iniciativa, el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), se diseñó específicamente para permitir el intercambio de reducciones entre países industrializados y países en desarrollo. Debido a que el campo de aplicación de tecnología que permite la reducción de emisiones es más amplio en los países en desarrollo que en

⁵ UNFCCC, *EB*, 2008

⁶ UNFCCC, *Protocolo de Kyoto*, 2005

países industrializados, y los costos de implementación son también menores en los primeros, este mecanismo promueve el desarrollo en comunidades menos privilegiadas y disminuye los costos globales de las reducciones.

En 2001, la Conferencia de las Partes COP.7 firmó los Acuerdos de Marrakech, dando inicio al proceso por medio del cuál las Partes del Protocolo de Kyoto podrían iniciar sendos procesos de ratificación y estableciendo la normatividad de los mecanismos de flexibilidad. En dichos Acuerdos, se desarrolla la normatividad de los mecanismos de flexibilidad constituida por cuatro decisiones: una común, sobre el ámbito y los principios generales de estos mecanismos y otras tres, relativas a las reglas de funcionamiento de los mecanismos de Aplicación Conjunta, Mecanismos de Desarrollo Limpio y Comercio de Emisiones.⁷

Las reducciones de emisiones de GEI se miden en toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂e), y se traducen en Certificados de Emisiones Reducidas (CER). Como se mencionó anteriormente, los diferentes GEI tienen diferentes potenciales de calentamiento global. Como se mencionó anteriormente, una molécula de CH₄ tiene un potencial de calentamiento 21 veces mayor a la del CO₂; por lo que si reducimos 1 mol la emisión de CH₄ habremos reducido lo equivalente a 21 moles de CO₂, eso se convierte a toneladas para obtener las toneladas de CO₂ equivalente. Un CER equivale a una tonelada de CO₂e que se deja de emitir a la atmósfera, y puede ser vendido en el mercado de carbono a Países Anexo I, a través de los mecanismos de flexibilidad que establece el Protocolo de Kyoto, como un *bono de carbono*. La compra de bonos de carbono evita la necesidad de pagar los impuestos generados por la emisión de CO₂e que pueden llegar a ser de hasta 40 euros por tCO₂e. Un bono de carbono se cotiza en la actualidad en el mercado en 15 euros, aproximadamente.

⁷ UNFCCC, EB, 2006

El mercado internacional de los CER se ha desarrollado con bastante rapidez desde 2003. En el año 2007, se valoró en 40 billones de euros, 80% más que en el 2006. El total de certificados negociados en 2008 ascendió a 2.7 billones. Este desarrollo se debe al interés que existe por adquirirlos, principalmente en algunos países europeos, Canadá y Japón. En este proceso inicial, se están consolidando mercados regionales independientes, como son el Mercado de Carbono Europeo (ETS), los mercados de Japón, Canadá, Inglaterra y un mercado paralelo en los Estados Unidos de América y Australia. El Mercado del Carbono Europeo fue implantado en enero del 2005.⁸

3.1.3.1 Mecanismos de Desarrollo Limpio

Un Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) es un acuerdo que permite a los gobiernos de los países industrializados (Países Anexo I) y a las empresas (personas naturales o jurídicas, entidades públicas o privadas) suscribir acuerdos para cumplir con las metas de reducción de GEI en el primer periodo de compromiso, comprendido entre los años 2008 - 2012, invirtiendo en proyectos de reducción de emisiones en países en vías de desarrollo (Países no Anexo I) como una alternativa para adquirir reducciones certificadas de emisiones (CER) a menores costos que en sus mercados y que pueden ser contabilizadas como complemento a sus reducciones domésticas para cumplir con sus compromisos. A la vez, este mecanismo contribuye al desarrollo sustentable de los países en desarrollo a través de la transferencia de recursos financieros y tecnológicos.

Campos de aplicación

El Protocolo de Kyoto ha definido los sectores en los que dichos mecanismos pueden implementarse:

1. Industrias energéticas (fuentes renovables y no renovables)
2. Distribución de energía
3. Demanda de energía
4. Industrias manufactureras

⁸ Point Carbon, 2008

5. Industria química
6. Construcción
7. Transporte
8. Minería y producción de minerales
9. Producción de metales
10. Emisiones fugitivas de combustibles (sólidos, petróleo y gas)
11. Emisiones fugitivas en la producción y consumo de halocarburos y hexafluoruro de azufre (SF₆).
12. Uso de disolventes
13. **Gestión y almacenamiento de residuos**
14. Forestación y reforestación (secuestro de carbono)
15. Agricultura

Es necesario señalar que los MDL deben cumplir con características muy específicas. Los proyectos acogidos como MDL se gestionan a través de un organismo regulador, la Junta Ejecutiva de MDL (JE), y las reducciones o absorciones conseguidas con la ejecución de los proyectos deben ser verificadas y certificadas por Entidades Operacionales Designadas (EOD) acreditadas por la Conferencia de las Partes (COP). Conviene señalar además la importancia de las Administraciones Públicas de todos los países, tanto de los Países Anfitriones como de los del Países Anexo I si participan en un proyecto conjunto, en el suministro de información a los diversos agentes del MDL, la formación de expertos, la transferencia de tecnologías, la promoción de la colaboración con las empresas, etc. En países como México, lo anterior exige reforzar o crear la capacidad administrativa necesaria en el interior y el fortalecimiento de los órganos administrativos en el exterior a través de sus Embajadas, Oficinas Comerciales, Oficinas Técnicas de Colaboración, etc. Por otra parte, es preciso que los Países Anexo I involucren a las entidades privadas en la promoción de MDLs y en la transferencia de tecnologías limpias y eficientes, apoyando el desarrollo de nuevos proyectos y facilitando el reconocimiento de los mismos como proyectos MDL.

Cabe destacar el gran potencial de colaboración que existe entre los países europeos y latinoamericanos en este tema ya que los niveles medios de emisiones de CO₂ per cápita actuales en Europa son casi tres veces mayores que los existentes en Latinoamérica y seguirán siéndolo por algún tiempo.

La implementación de proyectos MDL

Los criterios básicos que se deben cumplir pueden resumirse de la siguiente forma: los proyectos deben generar reducciones que sean *reales, medibles y a largo plazo*. Además, las reducciones de emisiones de GEI conseguidas con el proyecto deben ser *adicionales*. Para ser consideradas reducciones adicionales, las emisiones de GEI al implementarse un proyecto deben ser menores a las emisiones que hubieran ocurrido en ausencia del mismo; además, debe demostrarse que el proyecto no se hubiera implementado de no existir la posibilidad de venta de CERs. El proyecto, además, debe contribuir al desarrollo sustentable del país anfitrión, sin perder de vista el marco legal local e internacional.

En un proyecto MDL se distinguen siete etapas que se añaden al desarrollo convencional de un proyecto.⁹

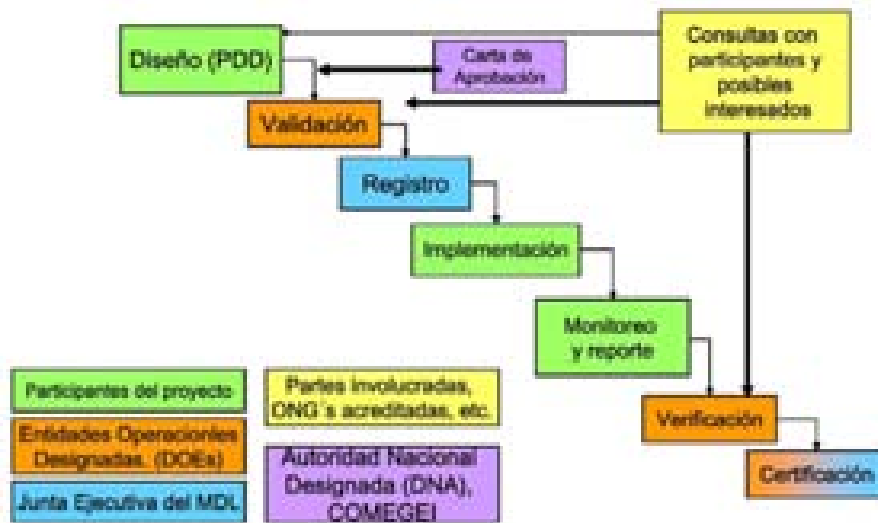


Figura 3.1 Pasos para la implementación de un MDL

1. *Diseño*: Los países participantes (PP) deberán evaluar la actividad de proyecto propuesto y los requisitos de elegibilidad. El documento de Diseño y Desarrollo del Proyecto (DDP) incluirá la metodología y

⁹ INE, 2008

- determinación de la base de referencia, el cálculo de la reducción de emisiones, y la metodología y plan de vigilancia de la actividad del proyecto.
2. *Validación*: Evaluación independiente del diseño por una Entidad Operacional Designada (EOD), en relación con los requisitos del MDL
 3. *Registro*: Aceptación oficial por la Junta Ejecutiva (JE) de un proyecto validado como proyecto MDL.
 4. *Implementación del diseño* por los PP.
 5. *Vigilancia*: La vigilancia, llevada a cabo por los PP, incluye la recopilación y archivo de todos los datos necesarios para medir o estimar las emisiones GEI del proyecto MDL, de la base de referencia y del cálculo de las reducciones de emisiones debidas al proyecto.
 6. *Verificación y certificación*: La verificación consiste en un examen independiente y periódico de las reducciones de emisiones registradas por una EOD; está unida a la certificación escrita de la EOD confirmando las reducciones de emisiones durante un tiempo determinado.
 7. *Expedición de las reducciones certificadas de emisiones (CER) por la Junta Ejecutiva del MDL.*

MDLs en el mercado internacional

El mercado de MDLs llegó a valer 12 billones de euros en el 2007, lo que representó un incremento de 68% en términos de volumen y un 200% en términos de valor en el mercado con respecto al 2006, constituyendo así el 35% del mercado físico y 29% del mercado financiero.¹⁰

La propiedad de los certificados se define, generalmente, a través de contratos formales en los cuales se establecen los derechos de cada una de las partes involucradas en el proyecto y los propietarios legales de los certificados. Sin embargo, todavía existe una gran incertidumbre respecto a la legislación internacional que regula el comercio de las reducciones certificadas de

¹⁰ Roine, et.al., 2008

emisiones de GEI, por lo que existe la necesidad de una estandarización de las reglas de negociación que permita disponer de instrumentos claros y uniformes aceptados por la comunidad internacional.

Existen tres modelos de **comercialización** de los MDLs:¹¹

Comercialización unilateral

En este modelo, el diseño, la financiación, la implantación, los gastos de certificación y los demás costos de producción de los CER, corren por cuenta de un promotor del País Anfitrión del proyecto MDL, sin ninguna participación de agentes del País Anexo I.

Comercialización bilateral

Un agente del País Anexo I, invierte conjuntamente con un promotor del País Anfitrión (País no Anexo I) para financiar y desarrollar el proyecto MDL. Por lo tanto, hay una estrecha relación entre el inversionista y el promotor en el diseño, financiación y venta de los certificados.

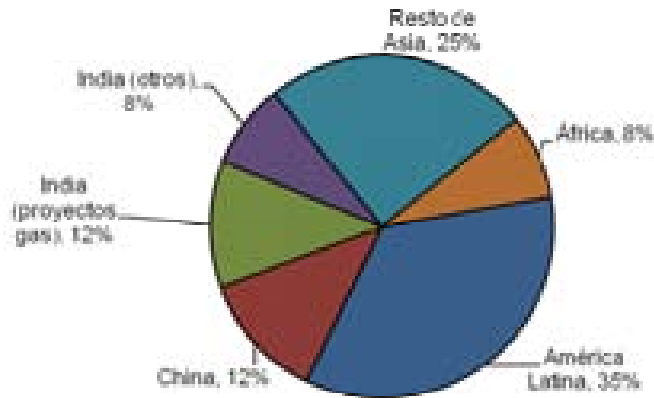
Comercialización multilateral

En esta modalidad intervienen los Fondos de Carbono (tales como: Prototype Carbon Fund (PCF), el fondo holandés CERUPT, Internacional Finance Corporation (ICF), Corporación Andina de Fomento (CAF), etc.) no sólo en la ejecución de proyectos MDL, sino que también son entidades compradoras de los CER. Estos fondos actúan como intermediarios de los sectores público y privado de Países Anexo I, captando los recursos financieros necesarios para la implementación del proyecto. Los proyectos MDL son seleccionados por los propios fondos, siguiendo sus propios criterios.

Con respecto a los Países Anfitriones, la mayoría de los créditos en el periodo 2003-2004 se originaron a través de proyectos realizados en Asia (57%), América Latina (35%) y economías en transición (8%). En cuanto al tipo de proyectos, los de energías renovables suman el 29% del total de proyectos de

¹¹ Banco Mundial, 2004

desarrollo limpio, la reducción de emisiones (biomasa y pequeñas centrales hidroeléctricas) 12% cada una y captura de gas de rellenos sanitarios y manejo de residuos un 20%.



Gráfica 3.1 Países anfitriones de proyectos MDL¹²

Financiamiento

Existen tres opciones básicas para el financiamiento de proyectos MDL:

- Financiación por promotores locales.
- Financiación por compradores de los CER.
- Socios financieros (Project Finance).

Además de los Fondos de Carbono orientados a financiar proyectos generadores de CER, existen diversas instituciones, fondos y programas de financiación que se aplican también al desarrollo de este tipo de proyectos. Su participación se basa en varios factores, como son el tipo de tecnología transferida, los países de acogida y de inversión, objetivos y tamaño del proyecto, etc.

Plazos de entrega y vigencia de los contratos

Dentro del MDL, se han establecido dos modalidades para los plazos de generación de los CER, llamados períodos de acreditación: a) período único de

¹² UNFCCC, CDM, 2008

10 años y b) períodos de 7 años, renovables 2 veces, es decir, un máximo de 21 años. El período de acreditación debe quedar consignado en el contrato, así como la duración del contrato de Compra – Venta y las fechas periódicas acordadas para la entrega de los certificados o los derechos de los compradores sobre los CER.

Costos y Riesgos

Los proyectos MDL, especialmente los de energía, comparten con los proyectos típicos de oferta de energía y de eficiencia energética, la característica de requerir inversiones importantes, y que los beneficios se generan a largo plazo. Por eso, es necesario considerar opciones de financiamiento que prevean una amortización, también a largo plazo, de las inversiones.

Los riesgos a los que se enfrentan los involucrados con el desarrollo de proyectos MDL son entre otros, los inherentes al Protocolo de Kyoto, como la incertidumbre existente sobre la oferta y la demanda de créditos de carbono, la aleatoriedad actual en la estimación de precios, los verdaderos costos de reducción de las emisiones de GEI en los Países Anexo I, los costos de implantación de los criterios de desarrollo sostenible del País Anfitrión y la especulación en cuanto al valor de los CER.

Existen otros riesgos para los Países Anfitriones, como lo es entregar reducciones menores a las previstas que llevaría al incumplimiento de contrato y las sanciones económicas establecidas. Dichas sanciones pueden mitigarse haciendo compromisos en intervalos (por ejemplo, se compromete a entregar el 80% de los CER esperados). Otra manera de mitigar el riesgo de penalidades puede ser integrar la modalidad de entregas de CER en períodos multianuales. Por ejemplo, en vez de que el promotor se comprometa a entregar 100,000 toneladas anuales durante 10 años, podría comprometerse a entregar no menos de 300,000 toneladas en cada período de tres años, para un total

acumulado de un millón de toneladas en 10 años. Ahora, es de esperar que esta flexibilización resulte en precios menores de los certificados.¹³

Para reducir los riesgos, los países deben limitar su participación a proyectos sólidos, con tecnología probada, que cumplan ampliamente con los criterios de desarrollo sostenible y que aporten claros beneficios ambientales y sociales en el ámbito local. También, deben asegurarse de que el promotor pueda cumplir con las cantidades de CER pactadas en los plazos previstos. Conviene diversificar la compra de CER a distintos promotores y adquirir opciones de compra a través de las cuales, a medida que vaya madurando y flexibilizándose la ejecución de los proyectos MDL y a cambio del pago de una prima, las instituciones financieras puedan conceder préstamos en base al valor de los contratos; de la misma manera que los bancos lo hacen actualmente para instalaciones de generación de electricidad sobre la base de contratos de compra de energía.¹⁴

3.2 Los residuos sólidos urbanos en México

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos publicada en el 2003 en México, define la gestión integral de los residuos sólidos urbanos (RSU) como un conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales y de salud humana, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades de cada región.

El manejo de los RSU es complejo y evoluciona paralelamente a la urbanización, al crecimiento económico y a la industrialización. La cantidad de desechos que

¹³Banco Mundial, 2004

¹⁴Roine, et.al., 2008

se generan en una zona depende, entre otras cosas, del grado de desarrollo industrial y de servicios que tiene el país o zona, así como las pautas de consumo de sus habitantes. Aunque el problema de los RSU ha sido identificado desde hace varias décadas, especialmente en las áreas metropolitanas, las soluciones parciales que hasta ahora se han logrado no abarcan a la mayoría de las ciudades intermedias y menores.

La Ley clasifica los residuos en: peligrosos, sólidos urbanos y especiales. Aunque los RSU son sólo una parte de los residuos, consumen casi la tercera parte de los recursos invertidos por el sector público para abatir y controlar la contaminación.¹⁵

A pesar de los esfuerzos que se hacen en materia de gestión ambiental, los conflictos institucionales, la falta de información y comunicación, sumados a la mala planeación y falta de políticas funcionales, han sobrepasado la capacidad de los gobiernos locales para ampliar, mejorar y actualizar la oferta de determinados elementos estratégicos, infraestructura, equipamiento y servicios requeridos por una población cada vez más numerosa y demandante.

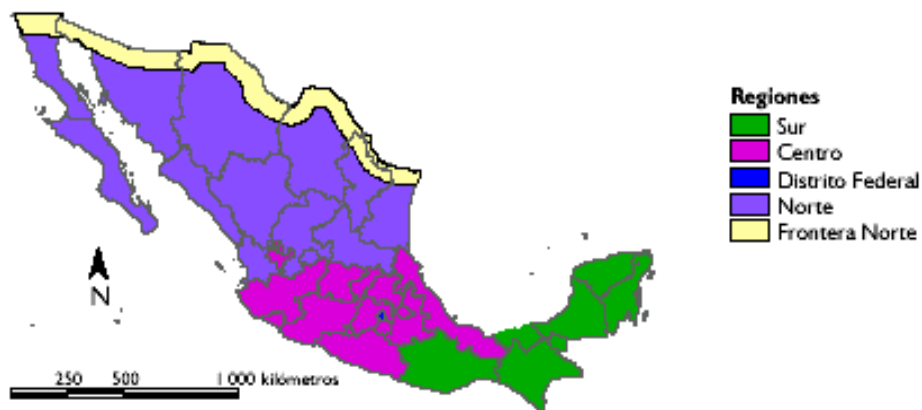
La mayor parte de la información ambiental de México es generada por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) a través del Instituto Nacional de Ecología (INE), que es responsable de la investigación, desarrollo e implementación de las políticas ambientales, y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Debe notarse que en muchos casos, la información es limitada y se basa en muestras pequeñas y estimaciones.

¹⁵ SNIARN, 2005

3.2.1 Generación de residuos sólidos urbanos

En México, con una superficie cercana a los 2 millones de km², habitan cerca de 110 millones de personas. En los últimos 100 años, la población en las ciudades aumentó casi 46 veces para conformar el 40% de la población, en contraste con la población rural que tan sólo duplicó su tamaño original. Las grandes zonas urbanas del país (Puebla, Monterrey, Guadalajara, y principalmente el D.F.) han crecido de forma desordenada, con una expansión irregular, segregada y muy costosa. Además, los cambios en los patrones de consumo de la mayoría de los mexicanos en las grandes urbes han incrementado la generación de RSU y cambiado su composición. La generación de residuos *per capita* ha crecido, en promedio, de 300 g/día en 1950, a 900 g/día en el año 2004. De 1992 a 2004, la generación total de RSU se incrementó un 57%, alcanzando 34.6 millones de toneladas en el último año.¹⁶

La SEMARNAT dividió al país en distintas regiones para analizar la generación de RSU. El mapa 3.1 muestra dicha división.

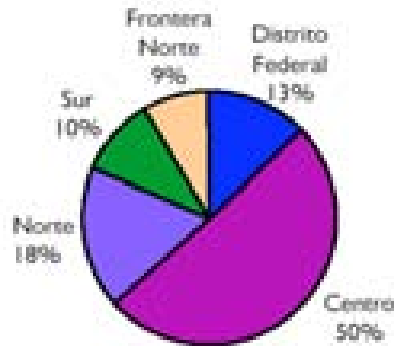


Mapa 3.1 Regionalización empleada para el análisis de generación de RSU¹⁷

¹⁶ SEMARNAT, 2008

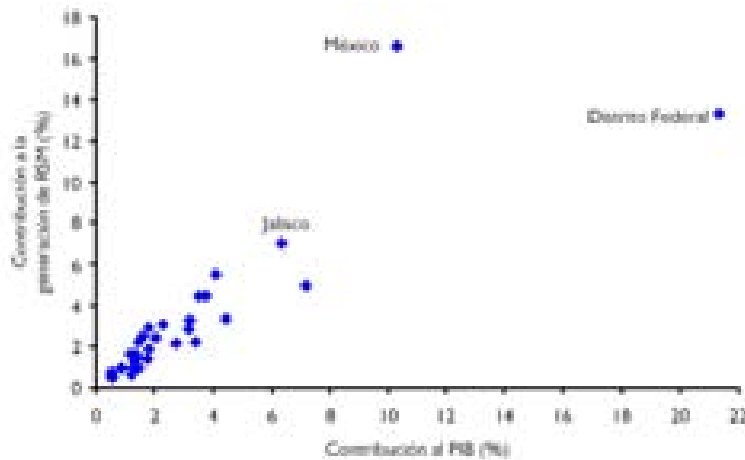
¹⁷ SNIARN, 2006

Siguiendo esta regionalización, la SEDESOL determinó que la mayor parte de los RSU se producen en la región Centro, le sigue la región Norte, luego el Distrito Federal, la región Sur y la Frontera Norte.



Gráfica 3.2 Generación de residuos sólidos urbanos en México por región, 2004¹⁸

La generación de RSU guarda una relación directa con la contribución relativa de las zonas al Producto Interno Bruto nacional. Las entidades federativas con mayor PIB generan mayor cantidad de residuos, tal como se aprecia en la gráfica 3.3 y el mapa 3.2.



Gráfica 3.3 Relación de la contribución estatal al PIB y generación total de RSU, 2003¹⁹

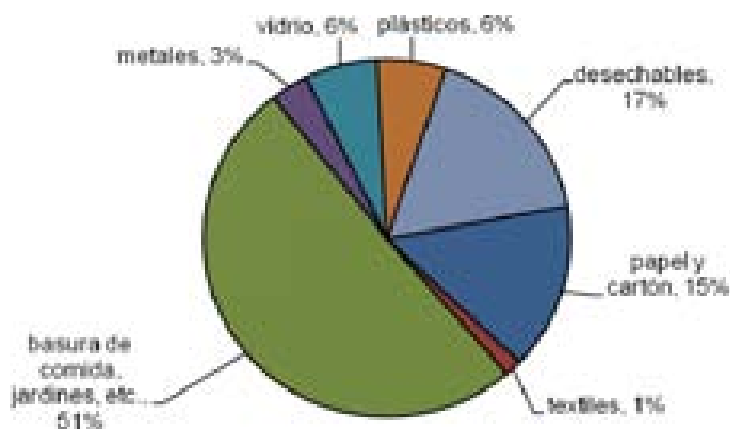
¹⁸ SNIARN, 2008

¹⁹ SNIARN, 2008



Mapa 3.2 Generación de RSU por habitante por día, 2005²⁰

Los cambios tecnológicos y de patrones de consumo han hecho que la cantidad y composición de los residuos sólidos en México cambie. De acuerdo con el INEGI, se estima que al año 2006, los RSU en nuestro país se conformaban de la siguiente forma: 51% son de tipo orgánico, 15% papel y cartón, 6% vidrio, 6% plásticos, 3% son metales, 1% textiles, y 17% otros tipos de desechables (pañales, residuos finos, etc.).²¹



Gráfica 3.4 Composición típica de la basura en México

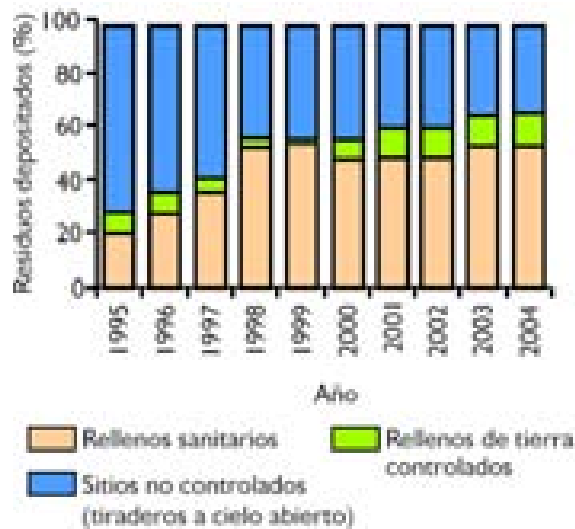
²⁰ SNIARN, 2008

²¹ INEGI, 2008

3.2.2 Manejo de los residuos sólidos urbanos

El manejo de los RSU comprende varias fases, desde su generación, almacenamiento, transporte y tratamiento, hasta la disposición final, cuyo objetivo es proteger la salud de la población, reducir molestias y proteger al medio ambiente. Históricamente, el manejo de los RSU en el país ha sido ineficiente y aún hoy, no se han incorporado en todo el país las técnicas necesarias para solucionar los problemas relacionados.

Como se muestra en las gráficas 3.5 y 3.6, sólo poco más de la mitad de los residuos generados y recolectados se depositan en rellenos sanitarios, generalmente en grandes zonas metropolitanas, mientras que una tercera parte es depositada en tiraderos a cielo abierto.

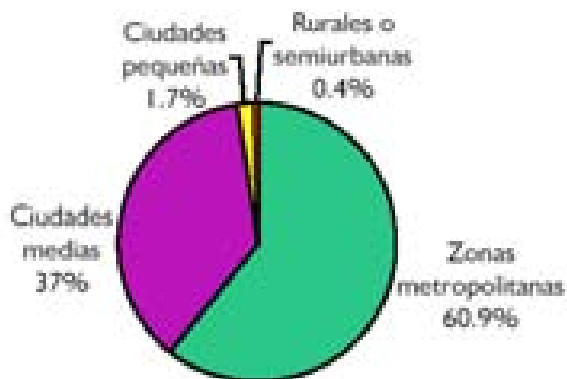


Gráfica 3.5 Disposición final de RSU en México, 2004.²²

Los tiraderos a cielo abierto generan un gran número de problemas. Con frecuencia se localizan en zonas de recarga de mantos acuíferos, junto a cuerpos de agua, drenajes naturales, etc. Estos tiraderos se caracterizan por una carencia de equipo adecuado para su operación, presencia de fauna nociva,

²² SNIARN, 2008

generación de lixiviados que escurren y se infiltran al subsuelo, carencia de vigilancia y presencia de residuos peligrosos mezclados con los RSU, generación incontrolada y migración de biogás, alta ocurrencia de incendios, y presencia de pepenadores que separan materiales en condiciones insalubres y a veces hasta violentas debido a la competencia por los residuos. También existe un gran número de tiraderos clandestinos en las cercanías de asentamientos humanos y de vialidades secundarias en todo el país que presentan una grave amenaza a la salud de la población.²³



Gráfica 3.6 Disposición de RSU en rellenos sanitarios o tiraderos controlados por tipo de localidad, 2004²⁴

En condiciones ideales, para reducir y facilitar el manejo de los RSU, estos son separados en todas sus partes reutilizables o reciclables. Los residuos orgánicos recuperados se utilizan para generar composta; los residuos reciclables, son procesados para recuperar los materiales útiles; los residuos no reciclables son incinerados para generar energía eléctrica (con el debido control de emisiones) o depositados en rellenos sanitarios²⁵. Sin embargo, en nuestro país, la opción más viable sigue siendo la disposición final del RSU en rellenos sanitarios.

²³ SEMARNAT-INE, 2001

²⁴ SNIARN, 2008

²⁵ Tchobanoglous, et.al., 1994

3.2.3 Legislación en materia de gestión integral de residuos sólidos y aprovechamiento energético de los mismos

3.2.3.1 Gestión integral de residuos sólidos

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos (2003)

La LGPGIRS establece las clasificaciones de residuos, las actividades importantes dentro de la gestión integral y la responsabilidad compartida entre fabricantes, comercializadoras, prestadores de servicios, consumidores, y los tres niveles de gobierno, para solucionar los problemas que plantea la gestión en todas sus etapas.

Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (2006)

Da las definiciones y criterios necesarios para la construcción de normas y planes de manejo de residuos, así como los procedimientos que deben seguirse para su autorización.

NOM-083-SEMARNAT-2003

Contiene las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como el manejo del biogás y lixiviados generados.

NOM-098-SEMARNAT-2002

Contiene las especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes en la incineración de residuos, para la protección ambiental.

3.2.3.2 Prevención y control de la contaminación

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (2005)

La LGEEPA establece las obligaciones de las autoridades del orden federal y local en materia de prevención y control de la contaminación. Define las medidas para la protección de áreas naturales; la explotación de los recursos naturales,

incluyendo agua y aire; la protección al ambiente, incluyendo la contaminación atmosférica, de aguas y suelos, actividades y residuos peligrosos, energía nuclear y otros tipos de contaminación. Incluye las medidas de control y seguridad, sanciones por incumplimiento, y guías para la evaluación y administración del impacto y riesgo ambiental de diversas actividades.

Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica

Define los procedimientos técnico-administrativos a los que están sujetas las fuentes emisoras de contaminantes, como son las licencias de funcionamiento y la cédula de operación anual.

Normas Oficiales Mexicanas publicadas por la Secretaría de Salud Pública (1994)

Establecen los límites máximos permisibles en la concentración de contaminantes en la atmósfera.

Tabla 3.1 Normas Oficiales Mexicanas en material de calidad de aire ²⁶

<i>NOM</i>	<i>Contaminante</i>
NOM-020-SSA1-1993	Ozono (O ₃)
NOM-021-SSA1-1993	Monóxido de carbono (CO)
NOM-022-SSA1-1993	Bióxido de azufre (SO ₂)
NOM-023-SSA1-1993	Bióxido de nitrógeno (NO ₂)
NOM-024-SSA1-1993	Partículas Suspendidas Totales (PST)
NOM-025-SSA1-1993	Partículas Menores a 10µm (PM ₁₀)

Normas Oficiales Mexicanas publicadas por la SEMARNAT

Establecen los límites máximos permisibles en la emisión de contaminantes de fuentes fijas que utilicen combustibles fósiles.

Tabla 3.2 Normas Oficiales Mexicanas en materia de emisión de contaminantes de fuentes fijas ²⁷

<i>NOM</i>	<i>Contaminante</i>
NOM-043-SEMARNAT-1993	Partículas Sólidas
NOM-085-SEMARNAT-1994	Partículas Suspendidas Totales (PST), óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno en fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles.

²⁶ Tadeo, 2008

²⁷ Tadeo, 2008

3.2.3.3 Generación y venta de energía

Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (actualizada a 1993)

La LSPEE determina que la Nación es responsable de generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica que tenga por objeto la prestación de servicio público; sin embargo, excluye del servicio público la generación para autoabastecimiento, cogeneración, pequeña producción y exportación, señalando los escenarios en los que se pueden otorgar permisos para estas actividades.

Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica (actualizada a 2001)

Establece las condiciones bajo las cuales deben realizarse las actividades relacionadas con la generación y abastecimiento de energía para el servicio público; así como los permisos y condiciones bajo los cuales se pueden llevar a cabo procesos de generación para autoabastecimiento, cogeneración, pequeña producción y exportación.

El artículo 36 de la LSPEE contempla la posibilidad de inversión privada en proyectos de generación de energía, ajenos a los del servicio público que son responsabilidad exclusiva del Estado, y señala las condiciones para cada uno de los casos. De acuerdo con la Ley, los proyectos de aprovechamiento energético de biogás en rellenos sanitarios pueden clasificarse como: *proyectos de cogeneración*, para el caso donde el municipio sea dueño o copropietario del sitio y que la electricidad generada se destine a las necesidades de los establecimientos asociados a la cogeneración (el excedente debe ponerse a disposición de la CFE); y *producción independiente*, para generar energía eléctrica destinada a la venta exclusiva a la CFE. A partir de dicha clasificación, es posible considerar que un proyecto de este tipo genere ingresos por la venta de la energía producida, o un ahorro a los municipios en la compra de energía a la CFE.

Si bien el tema principal de esta investigación es el estudio de la viabilidad de proyectos de aprovechamiento energético del biogás, es indispensable considerar el marco legal de todas las actividades relacionadas. No deben perderse de vista las restricciones legales, establecidas por la LGPGIRS y la LGEEPA, sus Normas y Reglamentos, en cuanto a la gestión integral de los residuos, las características de los sitios de disposición final, y las medidas para la prevención y control de la contaminación.

3.2.4 Aspectos críticos y problemas identificados

Existen graves problemas en la gestión de los RSU en México, sin embargo, se debe considerar que la solución a los mismos no es siempre del orden técnico sino institucional, normativo, económico y administrativo, entre otros. Los problemas identificados se mencionan en un contexto generalizado y aplican en la mayoría de municipios, aunque existen algunas excepciones (generalmente municipios con mayores recursos, zonas metropolitanas).

3.2.3.1 Aspectos técnicos

A nivel nacional, hay una carencia de programas serios que promuevan la reducción de residuos, la reutilización de materiales y el reciclaje; aunque existen algunas excepciones en ciertos municipios.

El almacenamiento temporal se observa inadecuado debido a la falta de estandarización de recipientes, estado físico y características de los mismos, lo cual dificulta su manejo por parte de los operadores de los vehículos de recolección. Con respecto a los contenedores ubicados en vías o sitios públicos de las localidades, éstos se convierten frecuentemente en focos de contaminación al verse saturados porque se carece de equipo suficiente y necesario para su reemplazo oportuno.

En cuanto a la recolección, la eficiencia del barrido manual resulta afectada porque los barrenderos efectúan tareas de recolección domiciliaria a cambio de

una propina y acumulan la basura en sitios preestablecidos donde los camiones la recolectan posteriormente. Pero este sistema ocasiona acumulación al aire libre de residuos, proliferación de insectos, perros callejeros, etc. El estado físico del equipo de recolección y barrido mecánico es deplorable, se carece del mantenimiento adecuado y resulta insuficiente. Por su parte, el personal de los vehículos recolectores efectúa tareas de separación de subproductos durante sus recorridos y se desvían de sus rutas para descargar o comercializar estos materiales. En consecuencia, la eficiencia disminuye y la cobertura de recolección se ve afectada.

En la etapa de transferencia, se presentan algunos problemas similares a los mencionados para el equipo de recolección en el equipo de transporte: carencia de mantenimiento, de refacciones, etc. En el caso de estaciones abiertas de transferencia ubicadas en zonas urbanas, se presentan emisiones de polvos y ruido al momento de transferir los residuos, así como emisiones de gases y ruido debido a la operación de los vehículos recolectores y de transferencia.

En general, se presenta una carencia de personal técnico capacitado en cada una de las etapas de la gestión de los RSU. Además, muchos sitios para la disposición final de los RSU se improvisan. Su ubicación no cubre requisitos mínimos y los terrenos no se preparan adecuadamente. El acceso también resulta complicado en muchos casos.²⁸

3.2.3.2 Aspectos legales

Las leyes existentes en materia de gestión integral de RSU son recientes y ningún organismo se ha responsabilizado de hacerlas cumplir. A diferencia de la legislación en materia de residuos peligrosos, la que compete a los RSU no define responsabilidades concretas para los tres niveles de gobierno (federal, estatal y municipal). Las leyes no definen con claridad la propiedad de los desechos ni sientan las bases para su aprovechamiento energético.

²⁸ SEMARNAT-INE, 2008

A pesar de que México ratificó el Protocolo de Kyoto y es considerado País No Anexo I, no hay leyes mexicanas que consideren la venta de reducciones de emisiones y definan las bases para el aprovechamiento del mercado de carbono.

Para la toma de decisiones resulta indispensable mejorar los sistemas de información, ampliar las zonas de muestreo y cambiar las estimaciones por datos concretos.

3.2.3.3 Aspectos institucionales

A niveles federal y estatal, hay muy poco apoyo para la gestión municipal de los residuos. Ambos argumentan que el municipio es responsable de los servicios de aseo urbano. Hay muy poca comunicación e incluso mucho menos coordinación entre los tres niveles. Esto retrasa y perjudica el desarrollo de los servicios de limpieza pública de las ciudades intermedias y menores del país. Además, la falta de continuidad de los esfuerzos sexenales para la integración de un sistema nacional de información que permita la correcta gestión de residuos, dificulta la toma de decisiones para la formulación de planes y programas.

La iniciativa privada ha tenido una participación muy limitada en las diferentes áreas del sector debido a la falta de lineamientos reguladores, técnicos y operativos que faciliten el otorgamiento de concesiones y contrataciones por parte de los municipios.

En lo que respecta al aprovechamiento energético de los residuos, la información que brindan las instituciones gubernamentales para el registro y aprovechamiento de los mecanismos flexibles del Protocolo de Kyoto es insuficiente y a veces confusa. Son muy pocas las empresas, en su mayoría extranjeras, que han podido aprovechar el mercado de carbono en nuestro país.

3.3 Etapas de aprovechamiento de un relleno sanitario

Los residuos sólidos comprenden todos los desechos que provienen de actividades animales y humanas, que normalmente son sólidos y son considerados como inútiles o superfluos. El término *residuo sólido* comprende tanto la masa heterogénea de los desechos urbanos, como la acumulación más homogénea de residuos agrícolas, industriales y minerales. La gestión integral de residuos sólidos es una parte importante de la economía de los países. La problemática de los residuos ocupa un lugar prioritario, y los sectores públicos y privados demandan actividades que minimicen los perjuicios medioambientales que éstos producen.

La gestión integral de residuos sólidos incluye las siguientes etapas: reducción en origen, reciclaje, transformación de los residuos y disposición final.²⁹ Dentro de los métodos más comunes para la disposición final de los RSU se encuentra el enterrar los residuos en sitios denominados *rellenos sanitarios*. Éstos son una buena alternativa si se cuenta con un espacio adecuado, pero puede convertirse en una fuente de contaminación atmosférica, acuífera, de suelos y paisaje, por lo que resulta indispensable diseñarlos y operarlos correctamente.

Para los fines de este trabajo, resulta importante estudiar dicho método y comprender las variables que influyen en la generación y aprovechamiento energético del biogás en los vertederos finales de los RSU.

3.3.1 ¿Qué es un relleno sanitario?

La Sociedad Norteamericana de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés) define un *relleno sanitario* como una técnica para la disposición de residuos sólidos en el suelo sin causar perjuicios al medio ambiente y sin causar molestias o peligro para la salud y seguridad pública; este método utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos sólidos en la menor área

²⁹ LGPGIR, 2007

posible, reduciendo su volumen al mínimo y cubriendo los residuos depositados con una capa de tierra con la frecuencia que se especifique o por lo menos al fin de cada jornada.³⁰

3.3.2 Planeación de un relleno sanitario

La etapa más importante en la planeación de un relleno sanitario es la selección del sitio. Existe gran oposición para colocar rellenos sanitarios cerca de cualquier comunidad, por lo que su localización debe justificarse técnicamente, respetando siempre las normas ambientales locales y federales.

En la legislación de nuestro país existen las Normas Oficiales Mexicanas para la protección ambiental. La norma NOM-083-SEMARNAT-2003 establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los RSU. Algunos de los criterios que señala la Norma y deben ser considerados son:

- Ubicación (Distancia mínima a aeropuertos, vías de acceso)
- Respetar derecho de vía de autopistas, ferrocarriles, caminos principales y secundarios, obras públicas federales
- Aspectos hidrológicos
- Aspectos geológicos
- Aspectos administrativos (condición del predio, concesión)
- Vida útil

Para cumplir con todos los requisitos se deben realizar análisis ambiental, estudios topográficos, hidrológicos, geohidrológicos, geológicos, geofísicos, de ingeniería y de mecánica de suelos y así, poder seleccionar las áreas más propicias que sirvan para el confinamiento de los residuos sólidos municipales con las mayores ventajas técnicas, económicas, ambientales, operativas y de accesibilidad.

³⁰ SEDESOL, 2006

Al determinar la ubicación se deben considerar el área destinada para la disposición final, el área necesaria para la planta de tratamiento de lixiviados, la zona de reciclaje y amortización del paisaje (en caso de haberlas). Generalmente, se escogen lugares cercanos a la zona urbana (con un tiempo de viaje no mayor a 30 minutos), para no afectar de forma negativa el sistema de recolección; si esto no es posible, se deberá invertir en estaciones de transferencia y/o en vehículos con una capacidad mayor (5 toneladas por carga o más).

Para que el relleno sanitario sea rentable, es necesario que el lugar escogido tenga capacidad para satisfacer durante un mínimo de 10 años la carga proyectada de generación de RSU; esto para justificar la inversión en infraestructura (camino, alumbrado, estación de pesaje, drenaje, etc.).

Una vez seleccionado el predio donde se realizará el relleno sanitario, se pasa al diseño específico del mismo. Entre los parámetros de diseño principales se encuentran: días de trabajo al año, cantidad de residuos por día, composición de los residuos, peso volumétrico de los residuos sólidos, superficie disponible del terreno, impermeabilización, material de cobertura, material de cobertura final, espesor del material de cobertura intermedio, entre otros.³¹

El método constructivo y la secuencia de la operación de un relleno sanitario están determinados, principalmente, por la topografía del terreno elegido, aunque también dependen de la fuente del material de cobertura y de la profundidad del manto freático.³²

³¹ Baasel, 1990

³² Ray y Johnston, 1989

3.3.3 Preparación del sitio

Después de haber seleccionado un sitio para el relleno deben realizarse trabajos de impermeabilización e instalación de drenaje para evitar que los suelos y mantos freáticos se contaminen. A través de estudios geológicos se puede determinar la permeabilidad del suelo. Para un relleno sanitario, el coeficiente de permeabilidad ideal (K) es del orden de 10^{-7} cm/s (sitios con alto contenido de arcillas).

Otras tareas de preparación incluyen la construcción de carreteras de acceso, instalaciones de pesaje y vallas.

La zona inicial para el relleno se excava hasta la profundidad diseñada (el material excavado se guarda para utilizarlo en la cubierta) y se instala equipo para monitoreo de aguas. Posteriormente, el terreno (base y laderas) debe impermeabilizarse. Para rellenos sanitarios, existen dos métodos de impermeabilización:³³

El método de impermeabilización *natural* consiste en aprovechar las propiedades fisicoquímicas del suelo y las características del material del subsuelo para evitar la contaminación de las aguas subterráneas por la migración de los lixiviados. Entre los materiales naturales más utilizados están las arcillas compactadas con espesores de capa desde 20 hasta 60 cm.

El método de impermeabilización *artificial* consiste en colocar materiales naturales con artificiales para evitar que los lixiviados penetren al subsuelo. Entre los materiales artificiales o sintéticos más utilizados para la impermeabilización destacan el hule, polietilenos, PVC y las geomembranas de polietileno de alta densidad, material que de acuerdo con estudios realizados en diversos rellenos sanitarios en Estados Unidos de América, resultan de mayor

³³ Tchobanoglous, et.al., 1994

confiabilidad. También pueden instalarse zanjas horizontales para la recuperación del gas en el fondo del relleno.

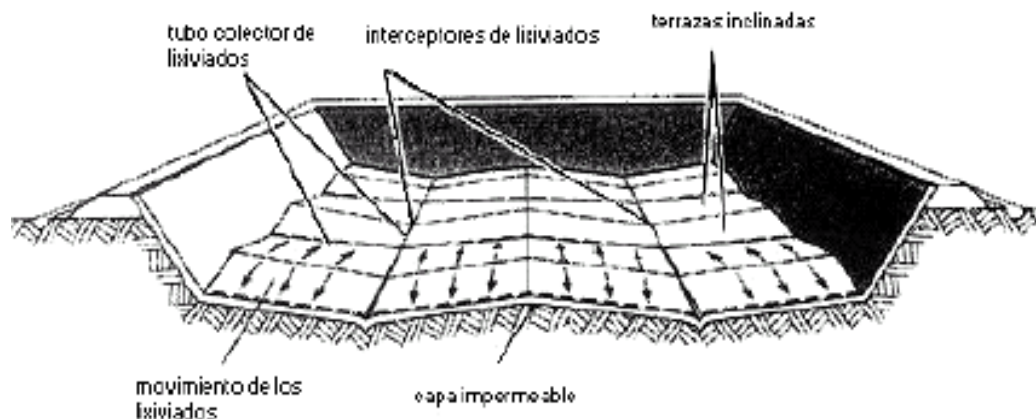


Figura 3.2 Preparación de un sitio para la disposición de RSU

Estas técnicas buscan minimizar los daños al medioambiente, controlando los efectos potenciales de contaminación por migración de lixiviados y permite recolectar los efluentes líquidos y gaseosos provenientes de la descomposición de la basura para su posterior tratamiento.³⁴

3.3.4 Operación de un relleno sanitario

3.3.4.1 Métodos de relleno

Existen 3 métodos básicos para la operación de un relleno sanitario:

Método de trinchera o zanja

Este método se utiliza en regiones planas y consiste en excavar periódicamente zanjas de 2 o 3 metros de profundidad y hasta 300m de largo y ancho, con el apoyo de una retroexcavadora o tractor de oruga. La tierra que se extrae, se coloca a un lado de la zanja para utilizarla como material de cobertura. Los desechos sólidos se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con la tierra extraída.

³⁴ SEDESOL, 2006

En época de lluvias las zanjas pueden llegar a inundarse, por lo tanto, se deben construir canales perimetrales para captar el agua de lluvia y desviarla, e incluso proveer las trincheras de drenajes internos. En casos extremos, puede requerirse el bombeo del agua acumulada. Las paredes longitudinales de las zanjas tendrán que ser cortadas de acuerdo con el ángulo de reposo del suelo excavado.

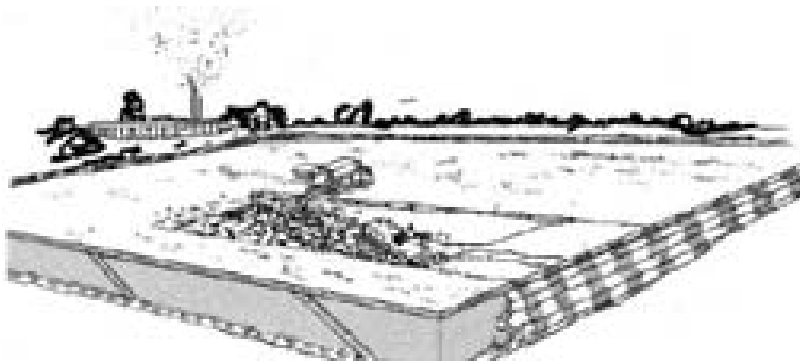


Figura 3.3 Relleno de trinchera o zanja

La excavación de zanjas exige condiciones favorables tanto en lo que respecta a la profundidad del manto freático como al tipo de suelo. Los terrenos con manto freático muy próximo a la superficie del suelo no son apropiados debido al riesgo de contaminación del acuífero. Los terrenos rocosos tampoco son adecuados debido a las dificultades y elevados costos de excavación.

En algunos casos pueden aprovecharse depresiones naturales (barrancas, canteras), haciendo ciertas adaptaciones a la geometría del lugar.³⁵

Método de área o zona

En áreas relativamente planas, donde no sea factible excavar fosas o trincheras para enterrar la basura, ésta puede depositarse directamente sobre el suelo original, elevando el nivel algunos metros. En estos casos, el material de cobertura deberá ser importado de otros sitios o, de ser posible, extraído de la

³⁵ Tchobanoglous, et.al., 1994

capa superficial. En ambas condiciones, las primeras celdas se construyen estableciendo una pendiente suave para evitar deslizamientos y derrumbes del material depositado y lograr una mayor estabilidad a medida que se eleva el relleno.

Este método puede adaptarse para rellenar depresiones naturales o canteras abandonadas de algunos metros de profundidad. El material de cobertura se excava de las laderas del terreno, o se procura de regiones cercanas para evitar el encarecimiento de los costos de transporte. La operación de descarga y construcción de las celdas debe iniciarse desde el fondo hacia arriba.

El relleno se construye apoyando las celdas en la pendiente natural del terreno. Es decir, la basura se vacía en la base del talud, se extiende y apisona contra él, y se recubre diariamente con una capa de tierra de 0.10 a 0.20 m de espesor; se continúa la operación avanzando sobre el terreno, conservando una pendiente suave de unos 30 grados en el talud y de 1 a 2 grados en la superficie.³⁶

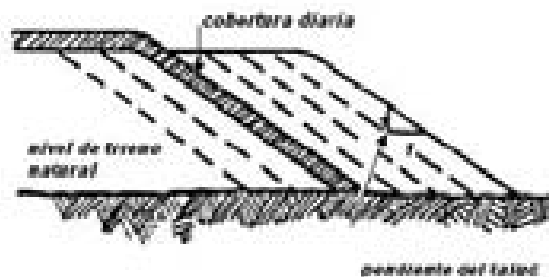


Figura 3.4 Relleno de área

Método combinado

En algunos casos, cuando las condiciones geohidrológicas, topográficas y fisiográficas del sitio elegido para construir el relleno sanitario son apropiadas, se pueden combinar los dos métodos anteriores; por ejemplo, se inicia con el método de trinchera y posteriormente se continúa con el método de área en la parte superior. Otra variación del método combinado consiste en iniciar con un

³⁶ McBean, et.al., 1995

método de área, se excava el material de cubierta de la base de la rampa, formándose una trinchera, la cual servirá también para ser rellenada.

El método combinado es considerado el más eficiente, ya que permite ahorrar el transporte del material de cubierta (siempre y cuando exista en el sitio en cantidad y calidad suficientes) y aumenta la vida útil del sitio.

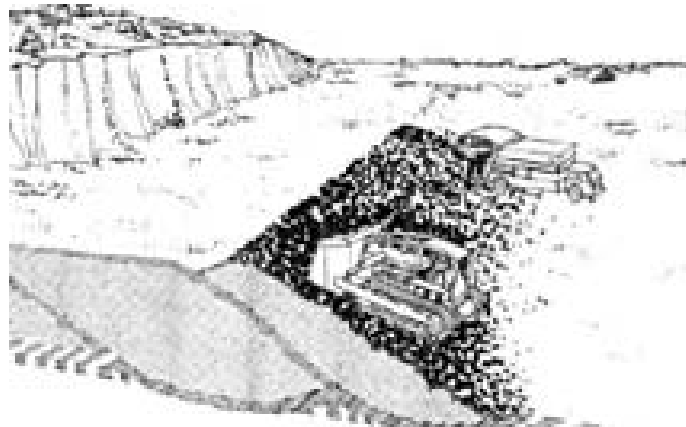


Figura 3.5 Método combinado de relleno

En todos los métodos se colocan niveles sucesivos de celdas hasta llegar al nivel final previsto. Según la profundidad del relleno, se pueden colocar instalaciones adicionales para la recolección de lixiviado en distintos niveles.³⁷

3.3.4.2 Configuración básica para la disposición final de los residuos

Para cualquiera de los tres métodos de operación del relleno sanitario la unidad fundamental de operación es la *celda*.

Se llama celda a la conformación geométrica que se le da al volumen de residuos sólidos depositados en un período de explotación (generalmente un día) y al material de cubierta (tierra) debidamente compactado mediante equipo mecánico. Los elementos de una celda son: altura, largo, ancho del frente de

³⁷ Tchobanoglous, et.al., 1994 ; McBean, et.al., 1995

trabajo, pendiente de los taludes laterales y espesores del material de cubierta diario y del último nivel de celdas. Con el propósito de facilitar la operación de un relleno sanitario, debe buscarse la forma de confinamiento geométrico más adecuada tanto por las características del sitio como por la maquinaria empleada. Aunque el tamaño de las celdas cambia según la cantidad de residuos sólidos que llegue al relleno sanitario, todas las celdas deben tener las mismas características constructivas.

Las dimensiones de una celda de residuos sólidos deben regirse por las siguientes especificaciones:

- a) **Altura:** Puede variar desde 1 a 5 m, incluyendo el espesor de la cubierta, con un talud cuya relación entre la altura y avance sea 1:2.5 hasta 1:3. La altura de la celda depende de la cantidad de los residuos que se depositen, del espesor del material de cubierta (15 a 30 cm de tierra), de la estabilidad de los taludes y la compactación.
- b) **Largo de la celda:** Este parámetro depende de las necesidades del proyecto, de la operación de cada sitio y de la superficie de terreno disponible. También está determinada por el volumen diario de residuos a disponer.
- c) **Ancho de la celda:** Puede variar de 3 a 9 m, depende del diseño y capacidad del frente de trabajo.³⁸

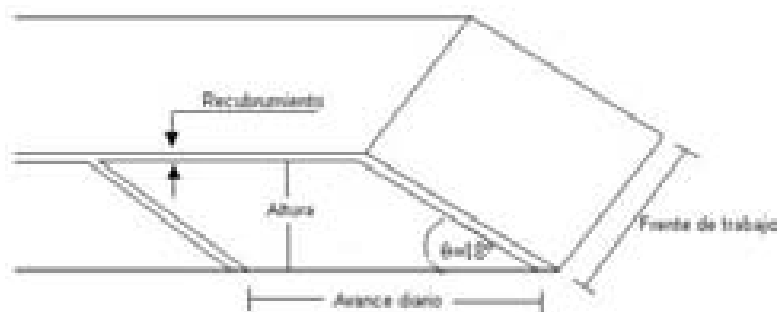


Figura 3.6 Celda típica en un relleno sanitario

³⁸ McBean, et.al., 1995

3.3.5 Descomposición de los residuos y manejo de emisiones

3.3.5.1 Generación y control de lixiviados

Los lixiviados son líquidos altamente contaminantes, producidos como resultado de la percolación del agua a través de los residuos sólidos confinados y por el metabolismo generado por microorganismos presentes en los residuos dentro del relleno sanitario, que tienen el potencial de dañar la calidad del agua subterránea, ya sea mantos freáticos o acuíferos. Los lixiviados contienen una cantidad importante de sólidos suspendidos y disueltos que participan en reacciones químicas y bioquímicas, produciendo gases como el metano (CH_4), bióxido de carbono (CO_2) y amoníaco (NH_3).

Se estima que aún cuando se controle el ingreso de agua pluvial, existirá generación de lixiviados debido a la liberación del agua contenida en los mismos residuos confinados y la generada por la actividad microbiana.

Los lixiviados se generan a través de los siguientes mecanismos:

1. Reacciones fisicoquímicas responsables de la solubilización, precipitación, óxido-reducción, intercambio iónico o de gases de algunos materiales contaminantes.
2. Reacciones de degradación biológica de materiales disueltos y suspendidos que se efectúan por vía aerobia o anaerobia según las condiciones del medio.

Las consecuencias directas de estas transformaciones son la liberación de gas y la formación de lixiviados.

La composición típica de los lixiviados es variable y dependerá del tipo y composición de los residuos confinados. Para poder estimar la generación de lixiviados se han desarrollado diversos modelos matemáticos que parten del análisis del balance hídrico de un volumen de control correspondiente al área del

relleno sanitario. Algunos de los métodos son: Thornthwaite, método HELP y método de balance de agua. También existen algunos factores que afectan la composición. La tabla 3.3 resume algunos de ellos.

Tabla 3.3 Factores que influyen en la generación de lixiviados en un relleno sanitario³⁹

Generación de lixiviados en un relleno sanitario		
Factor	Elementos que influyen	Condiciones específicas
Infiltración de agua	Precipitación pluvial	Ubicación Geográfica Época del año / aspectos climatológicos Evaporación / evapotranspiración
	Cobertura de los RSU	Espesor e impermeabilidad Tipos de materiales Compactación Pendientes
Características de los residuos	Tipología	Composición Orgánica Inorgánica Compuestos contaminantes Humedad Capacidad de absorción Tamaño y grado de compactación
Actividades microbianas	Aerobias y anaerobias	Naturaleza de los materiales Temperatura Relación carbono/nitrógeno Potencial de hidrógeno (pH) Contenido de sustancias tóxicas
Operación del relleno	Eficiencia operativa	Bermas temporales Obras de desvío de aguas Cobertura diaria de los RSU
Infiltración de aguas al subsuelo	Eficiencia constructiva	Impermeabilización adecuada

Para prevenir que estos líquidos contaminen los suelos y los mantos freáticos es necesario impermeabilizar el terreno seleccionados antes de comenzar a operar un relleno sanitario. Los lixiviados se recolectan por medio de un sistema de drenajes construidos en la base del relleno que desembocan en las fosas de lixiviados construidas en la parte más baja del terreno.

Sistema de captación y extracción de lixiviados

La captación de lixiviados se hace normalmente a través de líneas de captación y conducción (drenes principales) y líneas secundarias (subdrenes), que

³⁹ Tchobanoglous, et.al., 1994

consisten en redes de tuberías de PVC. Dichas líneas se rellenan con material arenoso fino y grava, que será envuelto por un geotextil cuya función principal es minimizar la entrada de material fino a los drenes (para evitar su taponamiento). Los lixiviados captados fluirán por pendiente natural del terreno y gravedad hacia fosas recolectoras; las líneas deben de tener una pendiente de aproximadamente 2%, teniendo cuidado de que en las conexiones, los drenes nunca disminuyan de pendiente para evitar depósito de sedimentos y taponamiento en los puntos de unión.

El tratamiento de los lixiviados se hace típicamente en lagunas diseñadas para que durante la primera fase se lleve a cabo una descomposición anaeróbica seguida de una fase de descomposición aeróbica durante las cuales las bacterias degradan los contaminantes presentes (existen bacterias que incluso pueden digerir metales pesados). La mejor disposición posible de los lixiviados sería una evaporación total de los mismos, con fin de que no exista efluente alguno a tratar. Si la evaporación total de los lixiviados no es posible, la opción más utilizada es la de recircular el lixiviado recolectado al relleno sanitario.⁴⁰

3.3.5.2 Generación y control de biogás

El *biogás* es una mezcla de gases de bajo peso molecular (CH_4 , CO_2 , etc.) que resulta de la descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno (descomposición anaerobia). En un relleno sanitario, la composición y cantidad del biogás producido depende del contenido de materia orgánica en los RSU depositados, su grado de descomposición y las condiciones climáticas. La producción de biogás comienza casi inmediatamente después de que los residuos son depositados, y termina cuando se completa la descomposición.⁴¹

⁴⁰ Tchobanoglous, et.al., 1994; McBean, et.al., 1995

⁴¹ SEDESOL, 2006

Generación de biogás

Cuando los residuos son depositados en el relleno, comienzan a sufrir una serie de transformaciones bioquímicas. Se lleva a cabo una digestión anaerobia en cuatro etapas que se describen a continuación:⁴²

- I. **Etapa aerobia.** Puede durar desde unos días hasta varios meses, dependiendo de la rapidez de descomposición de los residuos. Si la humedad es suficiente, la descomposición consumirá rápidamente el oxígeno del relleno y pasará a la segunda etapa.
- II. **Etapa de transición.** Desciende el nivel de oxígeno y comienzan a desarrollarse condiciones anaeróbicas. Los microorganismos usan nitratos y sulfatos como fuente de oxígeno, para producir sulfuros, N₂ y CO₂.
- III. **Etapa anaeróbica acetogénica.** Esta fase depende de las condiciones ambientales, si hay un ambiente cálido y húmedo se pasará rápidamente ésta etapa. En ella se lleva a cabo una reacción de fermentación en la que las bacterias hidrolizan la materia orgánica compleja (lípidos, polisacáridos, proteínas) para formar moléculas más pequeñas aptas para ser utilizadas por los microorganismos como fuentes de energía y de carbono celular. Después, las bacterias consumen dichas moléculas y forman ácido acético, propiónico, butírico y etanol.

Acetogénesis:



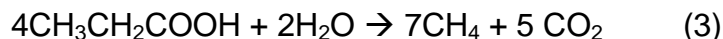
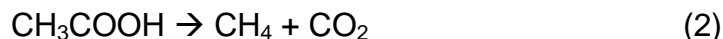
En esta etapa se acumula bastante CO₂.

- IV. **Etapa anaeróbica metanogénica.** Un segundo grupo de microorganismos anaeróbicos, convierten el ácido acético y gas de hidrógeno producidos en la fase ácida en CH₄ y CO₂. El porcentaje de

⁴² Tchobanoglous, et.al., 1994; McBean, et.al., 1995; Themelis, et.al., 2006

CH₄ aumenta progresivamente. La temperatura del relleno puede llegar hasta los 55°C. Las bacterias metanogénicas rompen el ácido acético para formar metano y dióxido de carbono.

Metanogénesis:



En esta fase el metano y los ácidos (acético y propiónico) se producen simultáneamente, sin embargo la velocidad de formación de ácidos es considerablemente menor. La producción de CO₂ y CH₄ se estabiliza.

- V. **Maduración.** A medida que disminuye la humedad en el relleno, deja de haber agua necesaria para la metanogénesis. La velocidad de generación del gas del relleno disminuye significativamente ya que la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores. Los sustratos que prevalecen en el relleno se degradan lentamente. La producción de CO₂ y CH₄ disminuye.

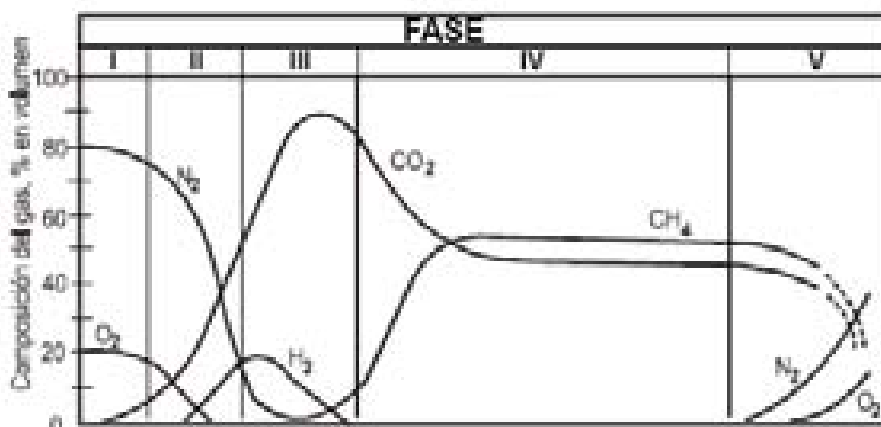
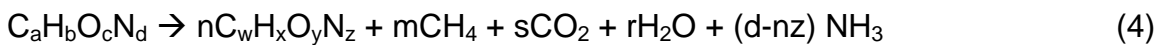


Figura 3.7 Etapas de la generación de biogás ⁴³

⁴³ Tchobanoglous, et.al., 1994

La metanogénesis es favorecida en ausencia de oxígeno y sustancias tóxicas, un pH neutro (entre 6.7 y 7.2) y alcalinidad mayor a 2000 mg/L de CaCO₃.

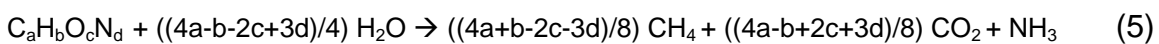
La conversión global de la fracción orgánica de los residuos sólidos en metano, dióxido de carbono y amoníaco puede representarse con la siguiente ecuación:



Donde $s = a - nw - m$

$$r = c - ny - 2s$$

Una vez que los residuos se estabilizan, la ecuación presenta la siguiente forma:



Los términos $C_aH_bO_cN_d$ y $C_wH_xO_yN_z$ se utilizan para representar la materia orgánica presente al comienzo de la descomposición y al final de la misma. Se pueden conocer aproximadamente si se conoce la composición típica de los RSU en determinadas regiones.

La biomasa es la materia orgánica que se descompone a través de estas reacciones. En México, los RSU contienen en promedio: 51% de basura de comida y jardines, 15% de papel y cartón, y 1% de textiles; que sumados resultan en un 67% de biomasa. A partir de un análisis de la composición atómica de la biomasa y conociendo el peso atómico de sus elementos, se estima que la fórmula condensada de la fracción orgánica de los residuos de comida y jardinería es $C_6H_{9.6}O_{43.5}N_{0.28}S_{0.2}$ y la de los residuos de papel es $C_6H_{9.6}O_{4.6}N_{0.28}S_{0.2}$. Ya que la cantidad de nitrógeno y azufre es muy baja, y se encuentra principalmente en los residuos de comida, la composición molecular promedio de la fracción orgánica de los RSU puede simplificarse como $C_6H_{10}O_4$.⁴⁴

⁴⁴ Themelis, et.al.,2006; INEGI, 2008

Sustituyendo los coeficientes en la fórmula (5) se obtiene que la fórmula estequiométrica para la máxima producción de metano es:⁴⁵



Para conocer la composición del biogás en un relleno sanitario determinado, es necesario hacer un análisis de los RSU contenidos en el sitio, calcular la fracción real de materia orgánica y monitorear las emisiones durante algún tiempo.

De acuerdo con la SEDESOL, la composición aproximada del biogás y sus características generales, en rellenos sanitarios donde la fracción orgánica de los RSU es cercana al 60%, es la que se muestra en la tabla 3.4.⁴⁶

Tabla 3.4 Composición y características del biogás en un relleno sanitario⁴⁷

Composición del biogás	
Componente	% v/v (base seca)
CH ₄	45-60
CO ₂	40-60
N ₂	2-5
O ₂	0.1-1.0
Hidrocarburos parafínicos	0.1
Hidrocarburos aromáticos	0.2
H ₂	0.02
H ₂ S	0.02
CO	0.02
Compuestos trazas	0.01-0.6
Gravedad específica	1.02-1.06
Contenido de humedad	SATURADO
Temperatura (en la fuente)	35-65 °C

⁴⁵ Themelis, et.al.,2006

⁴⁶ SEDESOL, 2006

⁴⁷ SEDESOL, 2006

Desafortunadamente, en México existe muy poca información acerca de la composición específica de los RSU en diferentes regiones, y si no es posible hacer un análisis cualitativo en el sitio de interés, la estimación de las emisiones sólo puede hacerse a partir de los datos de composición típica de los residuos, proporcionados por el INEGI.

Las condiciones climáticas, también influyen de manera importante en la producción del biogás, ya que a mayor temperatura y humedad, mayor será la rapidez de descomposición de la materia orgánica.

Debido a que la producción de biogás está directamente relacionada con el contenido de materia orgánica, la temperatura, la humedad, el contenido de oxígeno, la compactación y el pH de los RSU, algunas regiones de México, particularmente las zonas tropicales, constituyen un ambiente propicio para su aprovechamiento.

3.3.5.3 Modelo utilizado para la estimación de la emisión de biogás en un relleno sanitario

Existen varios modelos internacionales que permiten estimar la cantidad de biogás emitida en un relleno. Algunos de ellos, tales como el Modelo Mexicano de Biogás de la USEPA y RetScreen® de la Secretaría de Recursos Naturales de Canadá, se basan en una ecuación de decaimiento de primer orden, que define una descomposición exponencial de la fracción biodegradable de los residuos y asume que la generación de biogás comienza un año después de la colocación de los RSU en el relleno. Después de un año, por cada unidad de residuos, la generación disminuye exponencialmente mientras la fracción orgánica de los residuos es consumida.

Otros modelos, permiten calcular las emisiones a partir del manejo estadístico de datos de composición de los RSU en cada una de las celdas del relleno, como es el caso de GasSim del Reino Unido. Sin embargo, éstos últimos demandan información específica del sitio y un monitoreo constante de la composición de los RSU en cada celda.⁴⁸

Para realizar este trabajo de investigación se decidió utilizar el simulador RetScreen®, ya que la información disponible es suficiente para efectuar las estimaciones y sigue el mismo principio de cálculo que el Modelo Mexicano de Biogás, además de contar con una base de datos de los sistemas de aprovechamiento energético disponibles en el mercado.

Para los sitios donde se conocen los índices de disposición año con año, el Modelo estima la generación de biogás en un año utilizando la siguiente ecuación de decaimiento de primer orden, publicada en el Código 40 de Leyes Federales de los Estados Unidos de América.

$$Q_{y1} = \sum_{i=1}^n k L_o M_i (e^{-kt_i})$$

Donde:

- \sum = La suma desde el año de apertura + 1 (i=1) hasta el año de proyección (n).
- Q_M = Generación máxima de biogás (m³/año)
- k = Índice de generación de metano (1/año)
- L_o = Generación potencial de metano (m³/ton)
- M_i = Masa de residuos sólidos dispuestos en el año (ton)
- t_i = Edad de los residuos dispuestos en el año i (años)

La ecuación anterior estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a lo largo de un año. Proyecciones para años múltiples son desarrolladas variando la proyección anual y luego haciendo la

⁴⁸ Golder Associates, 2006; Guzzone, et.al., 2004

suma. El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o en el año siguiente.⁴⁹

Para poder estimar con precisión la generación y posible recuperación del biogás en un relleno sanitario utilizando éstos modelos, es necesario conocer la siguiente información:

- Capacidad de diseño del relleno,
- Cantidad de residuos depositados o el índice de aceptación anual estimado,
- El índice de generación de metano (k),
- La generación potencial de metano (L_0),
- La eficiencia del sistema de recolección de biogás y,
- Los años de operación a la fecha y los años que se planea operar.

Los valores de k y L_0 varían dependiendo de la precipitación anual y podrán ser usados para hacer proyecciones de generación de biogás en rellenos localizados en diferentes regiones de México. Se asume que el índice de generación de metano está en su máximo al momento de clausura del relleno sanitario, es decir, al momento de colocar los residuos finales.

El índice de generación de metano (k) determina la rapidez de generación de metano por la degradación de los desechos en el relleno sanitario. Las unidades de k es en año⁻¹, esto significa que el valor de k describe la generación de biogás producido por la degradación de los residuos en un año. Conforme el valor de k incrementa, la generación de metano en un relleno sanitario también incrementa, siempre y cuando se sigan recibiendo residuos; y luego disminuye a través del tiempo cuando el relleno sanitario es clausurado. El valor de k está en función de los siguientes factores: (1) contenido de humedad en los residuos, (2) la disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano, (3) pH, y (4) temperatura. Ver tabla 3.5.

⁴⁹ Guzzone, et.al., 2003

Tabla 3.5 Índice de generación de metano (k)⁵⁰

<i>Índice de generación de metano</i>	
<i>Precipitación anual promedio (mm/año)</i>	<i>k (1/año)</i>
0-249	0.040
250-499	0.050
500-999	0.065
≥1000	0.080

En teoría, el valor de la generación potencial de metano en los residuos (L_0) depende sólo del tipo de residuos presente en el relleno sanitario. Conforme el contenido de celulosa en los residuos aumenta, el valor de L_0 también aumenta. En la práctica, el valor teórico de L_0 no podría ser alcanzado en regiones de clima seco donde la humedad en los residuos es muy baja o inexistente, provocando la inhibición de las bacterias generadoras de metano. Las unidades de L_0 están en metros cúbicos por tonelada de residuos, lo cual significa que el valor de L_0 describe la cantidad de gas metano producida por tonelada de residuos. Ver tabla 3.6.

Tabla 3.6 Generación potencial de metano (L_0)⁵¹

<i>Generación potencial de metano</i>	
<i>Precipitación anual promedio (mm/año)</i>	<i>L_0 (m^3/ton)</i>
0-249	60
250-499	80
≥500	84

Control de la emisión de biogás

Las emisiones hacia la atmósfera deben reducirse para minimizar malos olores, evitar la migración sub-superficial del gas inflamable y para permitir la recuperación de energía a partir del metano. Para realizar un adecuado control

⁵⁰ Guzzone, et.al., 2003

⁵¹ Guzzone, et.al., 2003

de la migración de los gases generados por la descomposición de los residuos se debe construir un sistema de venteo con pozos de extracción en diferentes puntos del relleno sanitario que permita la evacuación del biogás. Los sistemas de control pueden ser *pasivos* o *activos*.

En los sistemas *pasivos* se controla el flujo de gas en la dirección deseada para reducir la migración lateral. Están formados por chimeneas que llegan hasta los residuos y tienen quemadores a la salida, zanjas perimetrales de intercepción lateral y zanjas perimetrales de barrera contra movimiento lateral sub-superficial. Este tipo de sistema no es recomendable, ya que no favorece el control de salida, puede ser una fuente de malos olores e incluso explosiones. Además, contiene puntos potenciales de ingreso de agua de lluvia al interior de las celdas. Con este sistema no se recupera ningún tipo de energía por la quema del biogás.

En los sistemas *activos*, se controla el movimiento lateral del biogás mediante el uso de pozos instalados en la cubierta final y zanjas perimetrales para la extracción del biogás, creando un vacío parcial que origina un gradiente de presión hacia el pozo de extracción. El gas extraído se quema para controlar las emisiones y producir calor, energía o gas natural.

Los sistemas activos pueden utilizarse en rellenos con una profundidad de 15 a 25 metros. Profundidades menores apenas resultan rentables, y profundidades mayores son complicadas para la perforadora, corriendo el riesgo de dañar la cubierta aislante inferior. La figura 3.8 muestra un pozo vertical típico para la extracción de biogás.

Los pozos de venteo consisten en tubos de PVC o PE de 10 a 16 cm de diámetro, que son colocados en perforaciones de 45 a 90 cm de diámetro. Del tercio inferior a la mitad inferior el tubo se perfora y se coloca sobre un relleno de grava, arcilla o bentonita con el objetivo de impedir la entrada de oxígeno a los

conductos de transporte de biogás. El resto de la funda no se perfora y se coloca en un relleno de tierra.

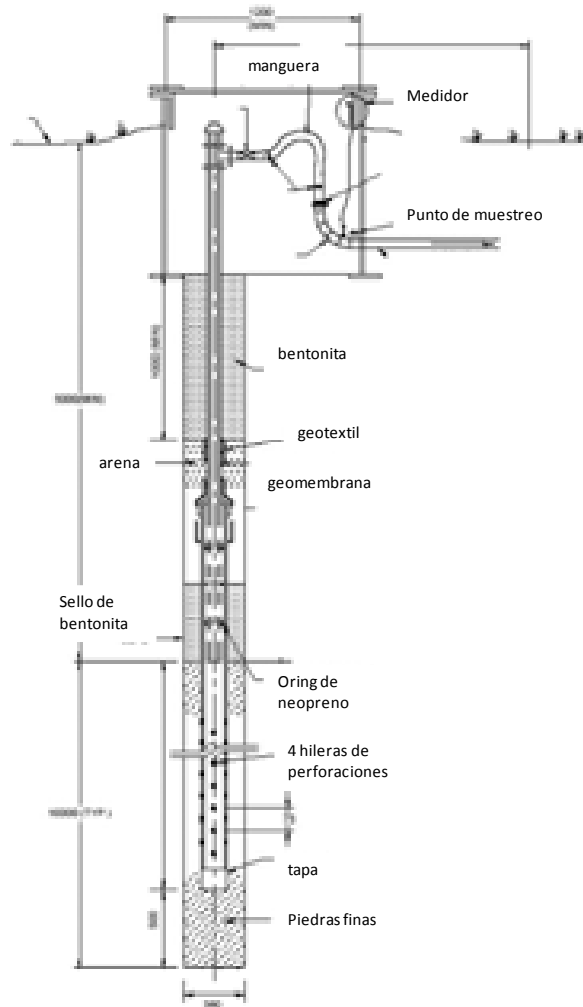


Figura 3.8 Pozo vertical típico para la extracción de biogás⁵²

Cada pozo se conecta a un tubo recolector común de material flexible, que después se conecta a un soplador eléctrico que produce vacío en el colector y en los pozos individuales. Al aplicar el vacío se crea una zona o radio de influencia que se extiende a la masa de residuos sólidos, los pozos se espacian de acuerdo al radio de influencia (entre 8 y 16m) para evitar sobrecarga en el sistema. La figura 3.9 muestra la distribución de los pozos. Tasas de extracción

⁵² Banco Mundial, 2004

excesivas pueden causar que el aire del exterior se infiltre en la masa de residuos afectando los procesos de digestión anaerobia y el potencial calorífico del biogás. Ahora, como el volumen de biogás producido disminuye con el tiempo, un espaciamiento uniforme de los pozos permite ir ajustando el vacío y la zona de influencia clausurando ciertos tubos colectores.

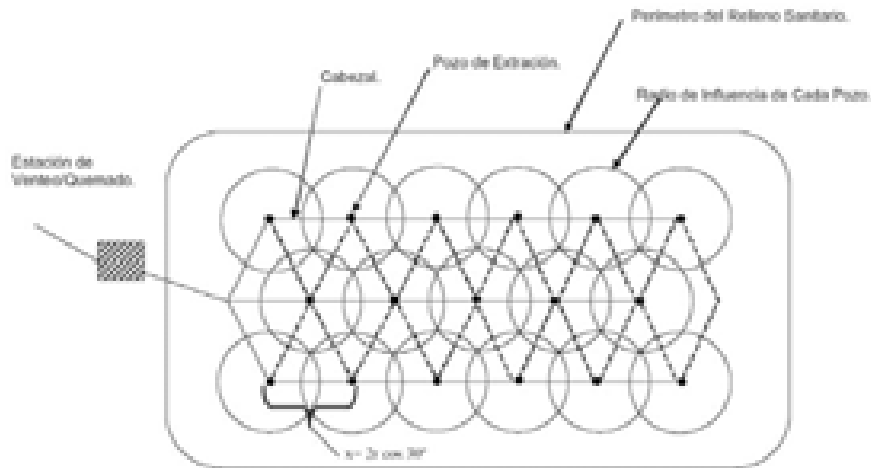


Figura 3.9 Distribución de pozos para la extracción de biogás⁵³

Los gases que se recuperan pueden ser utilizados para generar energía en forma de calor o electricidad. En los rellenos sanitarios, los sistemas de captación de biogás, a diferencia del de lixiviados, puede instalarse durante la operación normal del sitio e incluso después de su clausura.

La eficiencia del sistema de recolección mide la habilidad que tiene el sistema para capturar el biogás generado en el relleno. La eficiencia es el porcentaje aplicado a la proyección de generación de biogás para calcular la cantidad de biogás que puede ser capturado para después ser quemado y aprovechado. A pesar de que la captura de biogás en los rellenos sanitarios puede ser medida, la generación de biogás actual en el relleno sólo puede ser estimada (de ahí que se usen modelos); debido a esto existe una incertidumbre considerable en cuanto a la eficiencia de recolección que un sistema puede alcanzar.

⁵³Tchobanoglous, et.al., 1994

En respuesta a esta incertidumbre concerniente a la eficiencia de los sistemas de recolección de biogás, la USEPA (1998) publicó lo que cree son eficiencias razonables para sistemas de recolección instalados en rellenos de los Estados Unidos de América y que cumplen con los estándares americanos de diseño. De acuerdo con la USEPA, la eficiencia de recolección en estos rellenos típicamente varía entre 60% y 85%, con un promedio de 75%.

Tabla 3.7 Eficiencia de recolección de biogás en rellenos sanitarios⁵⁴

No.	Característica del relleno sanitario	Eficiencia de recolección			
		85%	75%	65%	60%
1	Cubierta de la plantilla (base) consistiendo de material sintético (plástico) sobre 0.6 metros (2 ft) de arcilla o un material similar.	X			
2	Cubierta diaria aplicada a los residuos dispuestos. Rellenos sanitarios clausurados deberán tener una cubierta final construida en los primeros años de clausura.	X	X		
3	La migración del biogás fuera del relleno es insignificante (los rellenos sanitarios de EUA requieren monitoreo de migración de biogás).	X	X	X	
4	Sistema completo y bien diseñado de recolección de biogás con pozos verticales o recolectores horizontales que tengan una cobertura del 100% e instalado después de algunos años de haberse depositado los residuos.	X	X	X	X
5	Un sistema de recolección de biogás operando eficientemente con todos los pozos de extracción operables y en buen funcionamiento (relativamente libre de líquidos que afecten la extracción del biogás).	X	X	X	X

La Tabla 3.7 muestra los valores típicos de eficiencia en la recolección de biogás, para rellenos que cumplan con las características listadas. Si se conocen las características del sistema de recolección de biogás en un relleno sanitario, se puede seleccionar el porcentaje de eficiencia correspondiente. Por ejemplo, si un relleno sanitario cuenta con todas las características listadas, la eficiencia estimada es del 85%. En cambio, en un sitio donde no se cumpla con las características 1 y 2, la eficiencia estimada es sólo del 65%.

⁵⁴ Guzzone, et.al., 2003

Para determinar si un relleno cumple o no con las características listadas, es necesario evaluar frecuentemente la cobertura del sistema de recolección e instalar un sistema de monitoreo de migración de biogás.

3.3.6 Clausura de un relleno sanitario

Con el paso del tiempo el relleno se estabiliza y los residuos se descomponen. Una parte se transforma en líquidos y otra en gases, y el material de cobertura penetra en los vacíos existentes, aumentando la densidad del depósito. Cuando esto sucede, se dice que el relleno se asienta.

El cierre del relleno implica la impermeabilización de la superficie externa una vez que termina la vida útil del mismo. Primero se realiza una impermeabilización temporal, y cuando se asienta el relleno, se lleva a cabo la definitiva. La cubierta final se diseña para minimizar la filtración de precipitación atmosférica y para conducir el drenaje fuera de la sección activa del relleno sanitario. Además, se protege la tierra para controlar la erosión. Al momento del cese de recepción de residuos se pueden instalar pozos verticales para la extracción de biogás.

La supervisión y mantenimiento del relleno debe prevalecer incluso después de su clausura hasta por 40 años. La superficie debe ser protegida contra infiltraciones y los sistemas para control de gas y lixiviados deben seguir funcionando.⁵⁵

⁵⁵ McBean, et.al., 1995

3.4 Aprovechamiento del biogás proveniente de rellenos sanitarios para generar energía

3.4.1 Generalidades

El metano es el segundo gas invernadero más importante después del dióxido de carbono. Es producido por los procesos digestivos del ganado en general y en los procesos de descomposición de materia orgánica, sólida o acuosa. Las bacterias y otros microorganismos que se encuentran en los intestinos de los animales, en los desechos e incluso en el suelo de los arrozales, descomponen la materia orgánica y producen metano. Otras fuentes de metano atmosférico son las minas de carbón, los pozos petroleros y los procesos de producción de gas natural.

Los niveles de CH₄ crecieron en un factor de 2.5 durante la era industrial. El metano de las emisiones pasadas actualmente contribuye en un 20% al efecto ampliado de invernadero.⁵⁶

Cuando se entierran desperdicios en los rellenos sanitarios, tarde o temprano éstos experimentan una descomposición anaeróbica y emiten metano. Si el gas no se capta y emplea como combustible, el metano termina escapándose a la atmósfera. Estas emisiones pueden ocasionar molestias importantes y graves problemas de salud a la población cercana a los sitios de disposición final. Para reducir las emisiones de metano se deben tomar una serie de medidas que eviten fugas y explosiones a lo largo de todo el relleno, tales como la instalación de pozos de extracción que permitan conducir el biogás emitido hacia una zona de tratamiento y aprovechamiento.

El biogás puede ser purificado para obtener gas natural con calidad de gasoducto, o ser quemado para generar energía eléctrica. De cualquier manera, los rellenos sanitarios emiten suficiente gas como para producir energía comercializable. Como se mencionó anteriormente, el metano tiene un poder de

⁵⁶ UNFCCC, *EB*, 2008

captura de energía en la atmósfera 21 veces mayor al del dióxido de carbono, al quemarlo se reducen 21 veces las emisiones de gases efecto invernadero hacia la atmósfera. Estas reducciones de emisiones pueden cuantificarse como toneladas de carbono equivalente (tCOe) y venderse como bonos de carbono en el mercado.⁵⁷

En 2001, se reportó que en el mundo había 955 sistemas de recuperación de biogás, la mayor parte en Estados Unidos de América y Alemania, cuya capacidad de producción energética iba de 0.3 a 4 MW hasta uno de 50MW en California, EUA. La capacidad de generación depende de varios factores. Uno es la cantidad de basura que contiene el relleno y su composición, también son importantes la humedad promedio del ambiente y la temperatura media anual en la zona del relleno sanitario.⁵⁸

3.4.2 Aprovechamiento del biogás

El biogás es una mezcla de gases que de acuerdo a su grado de pureza y poder calorífico, puede ser aprovechado de diferentes maneras. El potencial calorífico del biogás proveniente de un relleno sanitario es aproximadamente de 4 500 kcal/m³. Algunos métodos de aprovechamiento son⁵⁹:

Incineración.- Combustión directa del biogás extraído. La incineración de biogás en rellenos sanitarios es una medida que limita la migración del gas y mitiga los olores que resultan de su emisión hacia la atmósfera. Se instala un sistema activo de recolección y control pero no se recupera la energía contenida en el biogás.

Gas con bajo potencial calorífico.- Se remueve únicamente la humedad. Poder calorífico de 4 000 kcal/m³. La única manera viable de aprovechar este biogás de manera directa es utilizándolo como combustible en calderas para calentar agua y hacer funcionar turbinas de vapor. Sin embargo, el nivel de

⁵⁷ Banco Mundial, 2004; Roine, et.al., 2008

⁵⁸ Themelis, et.al., 2006

⁵⁹ McBean, et.al., 1995

generación en plantas termoeléctricas puede variar demasiado con las fluctuaciones en el nivel de producción de biogás en un relleno sanitario. El biogás de esta calidad no puede utilizarse en motores de combustión directa ya que desgastaría demasiado las partes; se requeriría un mantenimiento cada 700 u 800 horas de operación.

Gas con potencial calorífico medio.- El proceso consiste en una compresión y remoción de humedad, así como de compuestos sulfurosos, siloxanos, partículas sólidas y mercaptanos y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Puede llegar a tener un poder calorífico de $6\,200\text{ kcal/m}^3$.

Gas con potencial calorífico alto.- Se remueve el 100% de humedad, las trazas de otros gases y el dióxido de carbono, dejando una mezcla con grado de gasoducto con poder calorífico de $8\,900\text{ kcal/m}^3$.

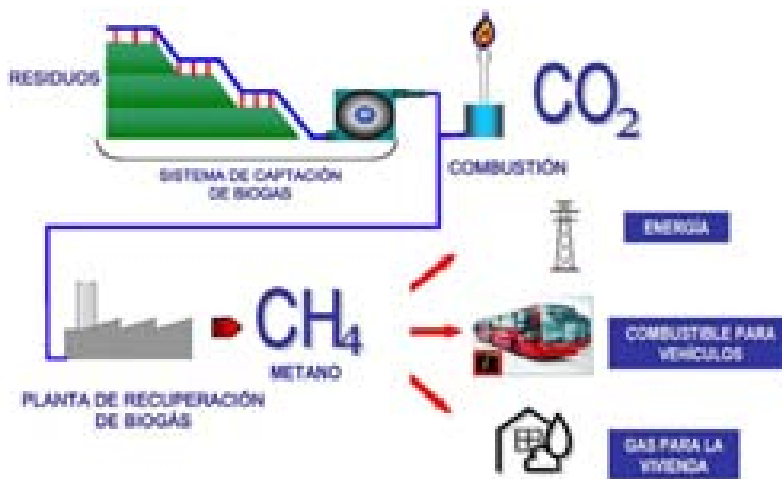


Figura 3.10 Opciones de aprovechamiento del biogás como combustible⁶⁰

En los Estados Unidos de América, el 72% de proyectos de aprovechamiento de metano están destinados a la generación de energía eléctrica.⁶¹

⁶⁰ Fornieles, 2006

⁶¹ USEPA, 1996

3.4.3 Sistemas de recuperación de energía

En la actualidad existen muchas tecnologías probadas y disponibles en el mercado para llevar el biogás a una calidad intermedia que permita su aprovechamiento. El biogás medianamente purificado es un combustible versátil y puede utilizarse para calentamiento y para la generación de energía eléctrica, usando turbinas de vapor, turbinas de gas o motores recíprocos de combustión interna. Las turbinas de vapor se utilizan en sistemas grandes (10 a 50 MW) y las turbinas de gas y los motores recíprocos se utilizan en los sistemas más pequeños (de 1 a 10 MW).

Para poder aprovechar el biogás, estos sistemas utilizan la compresión, refrigeración y algunos procesos fisicoquímicos para la remoción de humedad y las trazas de contaminantes.

Tecnologías disponibles

3.4.3.1 Turbinas de vapor

Es el sistema más común para la generación de energía eléctrica. A partir de la combustión del biogás se produce vapor de agua que se utiliza para mover una turbina de vapor. Después el vapor se condensa de nuevo y se alimenta como agua. La turbina de vapor alimenta un generador eléctrico, la energía puede ser exportada o utilizada en forma directa. Es una versión a menor escala de una planta termoeléctrica.⁶²

3.4.3.2 Turbinas de gas

Las turbinas de gas funcionan de manera similar a un motor a reacción. Consisten en un compresor para incrementar la densidad de la mezcla gas/aire, un combustor y una turbina para convertir los gases calientes de combustión en energía mecánica. El generador eléctrico se conecta directamente al eje de salida de la turbina de gas.

⁶² Tchobanoglous, et.al., 1994; McBean, et.al., 1995

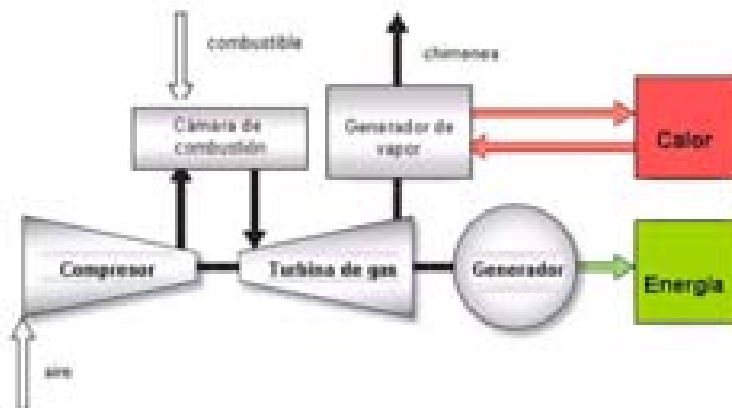


Figura 3.11 Generación de energía mediante turbinas de gas⁶³

Las turbinas de gas son generalmente más resistentes a la corrosión debido a las aleaciones de las que están construidas, generan menos emisiones, cuentan con un sistema dual de aceite que previene paros inesperados y son más simples de operar y adaptar a los cambios en la cantidad y calidad del biogás. Sin embargo, el costo inicial es alto y su eficiencia energética es muy baja (entre 15 y 25%). Las turbinas también brindan una gran cantidad de calor de desecho que puede ser aprovechado por sistemas de generación de ciclo combinado si se cuenta con los recursos suficientes para su instalación, aumentando así la eficiencia general del sistema.⁶⁴

3.4.3.3 Turbinas de ciclo combinado

En la generación de energía, se denomina ciclo combinado a la co-existencia de dos ciclos termodinámicos en un mismo sistema. En uno, el fluido de trabajo es el vapor de agua y en el otro, el fluido es un gas producto de una combustión. El ciclo de gas genera energía eléctrica mediante una turbina de gas y el ciclo de vapor de agua lo hace mediante una o varias turbinas de vapor. Este sistema se basa en utilizar los gases de escape a alta temperatura de la turbina de gas para aportar calor a la caldera o generador de vapor de recuperación. Ésta a su vez, alimenta de vapor a la turbina de vapor. La principal ventaja de utilizar el ciclo

⁶³ RetScreen Int., 2006

⁶⁴ McBean, et.al., 1995

combinado es su alta eficiencia, ya que se obtienen rendimientos superiores al rendimiento de una central de ciclo único y mucho mayores a los de una de turbina de gas.

Un ciclo combinado permite absorber una parte del vapor generado en el ciclo simple, mejorando así la recuperación térmica, o instalar una turbina de gas de mayor tamaño cuya recuperación térmica no estaría aprovechada si no se utilizara el vapor en una segunda turbina de contrapresión. En un ciclo combinado el proceso de vapor es esencial para aumentar la eficiencia del sistema. Al generar electricidad con un motor generador o una turbina, el aprovechamiento de la energía primaria del combustible es del 25% al 35%, lo demás se pierde. Al cogenerar se puede llegar a aprovechar el 70% al 85% de la energía que entrega el combustible. Con estos sistemas se mejora la eficiencia energética y también hay una disminución de las emisiones de CO₂.⁶⁵

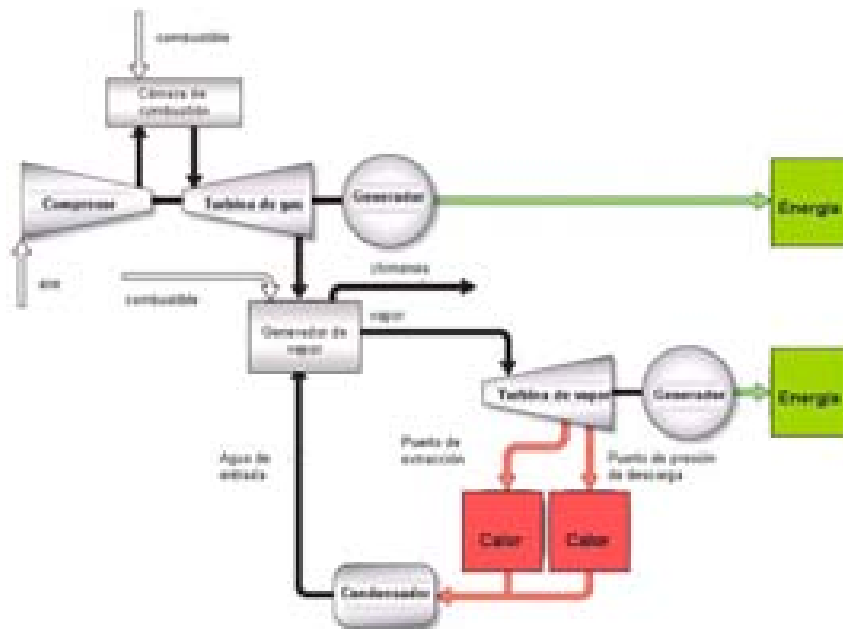


Figura 3.12 Generación de energía mediante turbinas de ciclo combinado ⁶⁶

⁶⁵ Tchobanoglous, et.al., 1994; McBean, et.al., 1995

⁶⁶ RetScreen Int., 2006

3.4.3.4 Motores de combustión interna

Los motores de combustión interna que utilizan pistones y cigüeñal son una alternativa a las turbinas de gas. En los motores de dos o cuatro tiempos, la explosión/inflamación se lleva a cabo en una cámara de combustión que tiene una parte móvil (en los motores más comunes se trata del pistón) que se desplaza dentro del cilindro con un movimiento lineal. El pistón está unido al mecanismo del cigüeñal que transforma el movimiento lineal en giratorio, y que a su vez está conectado al generador.

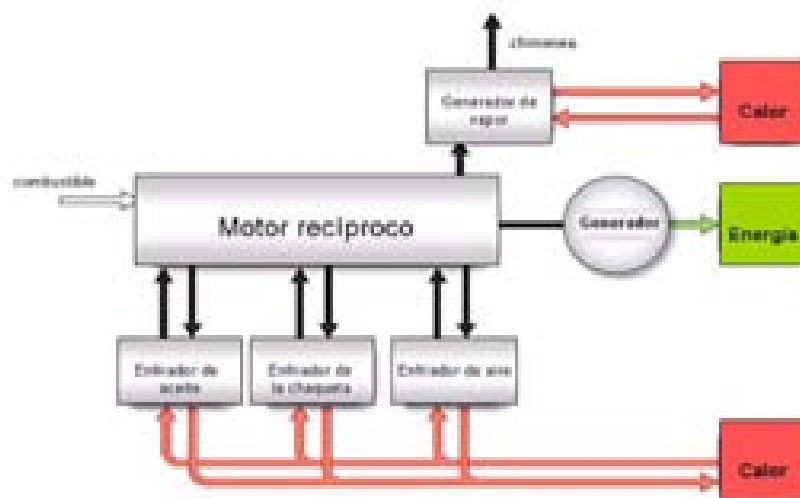


Figura 3.13 Generación de energía mediante motores recíprocos⁶⁷

Los motores para quema de biogás son versiones modificadas de motores industriales diseñados para gas natural o propano. Son los generadores de energía más comunes en los rellenos sanitarios. Sin embargo, el biogás contiene contaminantes que reducen mucho su vida útil por lo que el mantenimiento debe ser continuo (hasta cada 30 días) y puede resultar costoso.⁶⁸

⁶⁷ RetScreen Int., 2006

⁶⁸ McBean, et.al., 1995

3.4.3.5 Eficiencia de los sistemas

Para determinar la eficiencia de un sistema en cuanto de conversión de calor en energía, se calcula la tasa de calor, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Tasa de calor (kJ/KWh)} = \frac{\text{calor suministrado en combustible (kJ)}}{\text{energía generada (KWh)}}$$

Cuando se utiliza esta ecuación es importante recordar que el valor teórico para el equivalente mecánico del calor es igual a 3600 kJ/kWh.⁶⁹



Figura 3.14 Cálculo de eficiencia al convertir calor en energía

3.4.4 Pretratamiento del biogás para su aprovechamiento

Las oportunidades para el aprovechamiento del biogás proveniente de un relleno sanitario dependen directamente del grado de limpieza de la mezcla, y esto, a su vez, está en función de los recursos disponibles para el proceso. Las alternativas de tratamiento van desde una simple remoción de la humedad y condensados, hasta los complejos procesos que se necesitan para llevar al biogás a una calidad de gasoducto (gas natural). De acuerdo a las necesidades específicas del método de aprovechamiento de energía que se quiera utilizar, los procesos de limpieza incluyen: remoción de condensados y partículas suspendidas, remoción de nitrógeno, deshidratación, remoción de dióxido de carbono, remoción de sulfuro de hidrógeno y remoción de siloxanos. Los problemas que pueden presentarse en los componentes de los sistemas mecánicos y de

⁶⁹ Tchobanoglous, et.al., 1994; RetScreen Int., 2006

procesamiento incluyen la corrosión, arrastre de líquido hacia el interior de los equipos y fluctuaciones en la cantidad de biogás proveniente del relleno.⁷⁰

Las regulaciones para la preparación de un relleno y el pretratamiento y para el aprovechamiento del biogás son determinadas por el gobierno y por los organismos encargados de certificar la reducción de emisiones de GEI. El objetivo del sistema de pretratamiento del biogás es extender el tiempo de vida de los equipos para la obtención de energía.

La tabla 3.8 muestra las especificaciones técnicas de algunos equipos que permiten el aprovechamiento energético del biogás. Debido a la calidad con la que el biogás sale del relleno, para poder aprovecharlo es necesario secarlo, remover siloxanos y ácido sulfhídrico, y en algunos casos reducir el contenido de CO₂ en la mezcla. Los procesos para realizar dichas acciones consisten en operaciones unitarias simples que no requieren equipo muy sofisticado y se encuentran disponibles en el mercado.

Tabla 3.8 Especificaciones técnicas de algunos equipos de aprovechamiento del biogás para la obtención de energía⁷¹.

<i>Equipo</i>	<i>Límite de contaminantes</i>				<i>Poder calorífico necesario</i>	<i>Presión de operación</i>
	<i>H₂S (v/v)</i>	<i>CO₂ (v/v)</i>	<i>Humedad relativa</i>	<i>Siloxanos</i>		
GE Jenbacher	0	50 a 60%	<80 % s/condensado	<28mg/m ³	≥15 MJ/m ³	12-30 psig
Caterpillar	0	50 a 60%	60 a 80%	<10mg/m ³	15.7 a 23.6 MJ/m ³	12-30 psig
Deutz	<0.15%	50 %	<80 %	<5mg/m ³	≥14.4MJ/m ³	12-30 psig
Turbinas de gas	-	-	>90%	<0.1mg/m ³	-	150-170 psig
Microturbina Capstone	-	-	-	<0.03mg/m ³	-	12-65 psig

⁷⁰ McBean, et. al., 1995

⁷¹ EAUK, 2002; Wheels, 2006; Estibaliz, 2004

3.4.4.1 Remoción de H₂O

La presencia de vapor de agua en el biogás se debe a que la digestión anaerobia se realiza en un medio acuoso. La humedad relativa del biogás que sale del relleno es del 100%. Como se observa en la tabla 3.8, los equipos demandan un menor contenido de agua en la mezcla. Una deshidratación a temperaturas menores al punto de rocío puede prevenir la formación de hidratos y la corrosión de los equipos. Esta consideración es particularmente importante en mezclas que contengan CO₂ y H₂S, donde los componentes ácidos del gas pueden formar ácidos con el agua condensada.

La capacidad de retención de vapor de agua en una mezcla se reduce cuando la corriente es comprimida o enfriada, así, el agua puede removerse al comprimir o enfriar una corriente.

El agua puede ser eliminada a través de los siguientes procesos:

Condensación del vapor de agua

En este proceso se aprovecha el efecto Joule-Thomson. Al pasar el biogás por una cámara de expansión la temperatura de la mezcla disminuye y el vapor de agua se condensa. El condensado es posteriormente drenado y puede ser reinyectado al relleno sanitario para promover la metanogénesis. La misma línea que transporta el biogás puede inducir la condensación en los puntos más bajos si se encuentra a temperaturas inferiores a la de rocío o de saturación del biogás, por lo que pueden instalarse válvulas de drenado. Este es un sistema muy sencillo y de bajo costo porque la temperatura de saturación no es alta (mayor a 30°C) y sólo es necesario instalar una cámara de expansión.⁷²

Compresión y enfriamiento

Al comprimir un volumen de biogás saturado habrá un excedente de agua en el volumen final sobrecalentado. Si al volumen final le sigue una etapa de enfriamiento hasta la temperatura inicial de la mezcla, la cantidad de agua

⁷² Kidnay, 2006; Tchobanoglous, et.al., 1994

excedente para ese volumen se condensará. Cuando la temperatura de saturación es alta (mayor a 30° C) la compresión no es necesaria y es suficiente un proceso de enfriamiento.

Adsorción del vapor de agua

La adsorción consiste en una adhesión entre el vapor de agua y una superficie de un sólido desecante. El agua forma una película muy delgada que se adhiere a la superficie del sólido por las fuerzas de atracción, pero no existe reacción química. El desecante es un sólido granulado que tiene una gran superficie efectiva por unidad de masa gracias a una multitud de poros y canales capilares microscópicos. Un desecante típico puede tener una superficie de adsorción de cerca de un millón de metros cuadrados por kg de desecante. Los adsorbentes mayormente empleados para la deshidratación del biogás son: alúmina, carbón activado, bauxita, sales de sílica y silicatos en tamices o cribas moleculares.⁷³

En su forma más simple, el sistema de deshidratación por adsorción consiste en dos recipientes cilíndricos y paralelos que contienen el adsorbente (granular o poroso) junto con el equipo necesario para su regeneración. Estos operan alternadamente; así, cuando uno se satura de agua, la segunda columna de adsorbente la releva en lo que es regenerada y así sucesivamente, teniéndose un sistema de deshidratación continuo.

El sistema cuenta con un calentador que permite regenerar el desecador, un enfriador del gas proveniente de la regeneración que permita condensar el agua obtenida, un separador para el agua obtenida en la regeneración y controles para dirigir el flujo a una u otra torre de adsorción.

Ese proceso ofrece temperaturas de rocío extremadamente bajas, es simple en operación y diseño, y capaz de adaptarse a cualquier flujo de biogás; sin embargo, los costos de inversión y mantenimiento son altos.

⁷³ Tchobanoglous, et.al., 1994

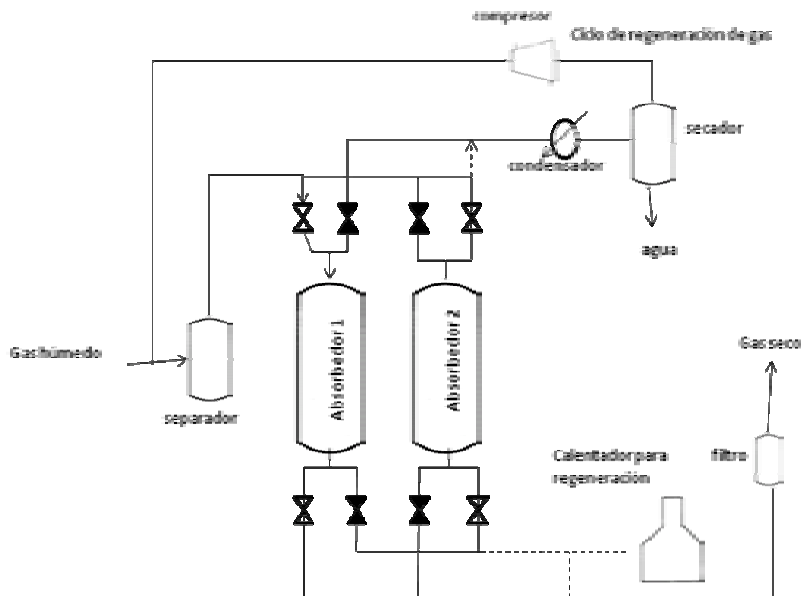


Figura 3.15 Diagrama de flujo para una unidad de adsorción típica de dos torres⁷⁴

Absorción del vapor de agua

La absorción puede ser tanto física como química. En la física, los solventes más usados son los glicoles (trietilenglicol, principalmente) o soluciones concentradas de litio y sodio. Por otro lado, en la absorción química del agua, las soluciones de cal viva ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) son los absorbentes más usados.

Existe una amplia variedad de dispositivos para incrementar el contacto entre el agua y el solvente, como puede ser una columna con aspersores, columnas empacadas, columnas con deflectores, etc. Debido a la alta capacidad de absorción de los solventes, estos sistemas pueden manejar altos volúmenes de biogás a costos de operación relativamente bajos. El absorbente puede ser recuperado mediante un sencillo proceso de destilación.⁷⁵

3.4.4.2 Remoción de gases ácidos (CO_2 y H_2S)

El tratamiento del biogás incluye la reducción de CO_2 y H_2S (gases ácidos) y otras especies con azufre, para prevenir problemas de corrosión y taponamiento.

⁷⁴ Tchobanoglous, et.al., 1994

⁷⁵ Kidnay y Parrish, 2006; Arnold y Stewart, 1999

El gas natural que contiene H_2S y otros compuestos de azufre se conoce como gas *amargo*, mientras que el gas que contiene únicamente CO_2 se conoce como gas *dulce*.

El sulfuro de hidrógeno es un gas altamente tóxico que en presencia de agua forma un ácido débil muy corrosivo. El valor límite para una exposición prolongada es de 10 ppm. Se detecta fácilmente, incluso a bajas concentraciones (0.13 a 4.6 ppm o mg/m^3) por su olor a huevo podrido. Desafortunadamente, en concentraciones elevadas (200 ppm) no produce ningún olor ya que mata las terminaciones nerviosas de la nariz en segundos. A 500 ppm produce problemas respiratorios severos y puede ocasionar la muerte en minutos. Generalmente, un nivel de 100 ppm es motivo de preocupación y se deben tomar medidas correctivas importantes. Otras especies sulfurosas que pueden estar presentes en la mezcla de gases son: disulfuro de carbono (CS_2), mercaptanos (RSH), sulfuros (RSR) y azufre elemental. Si además hay CO_2 , el gas puede contener trazas de sulfuro de carbonilo (COS).

El dióxido de carbono no es inflamable por lo que en altas concentraciones puede inhibir la combustión del metano. Al igual que el H_2S , en presencia de agua forma un ácido débil corrosivo a una presión parcial mayor a 2 bares.⁷⁶

La tabla 3.9 puede resultar útil al tratar de seleccionar un método para la remoción selectiva de gases ácidos.

La concentración de estos gases en el biogás no llega a ser tan alta como en el gas natural de reservas naturales, pero sus niveles deben reducirse para cumplir con las especificaciones de los equipos con los que se desee generar energía y también con la normatividad ambiental.

⁷⁶ Tchobanoglous, et.al., 1994

Tabla 3.9 Procesos de remoción de H₂S y CO₂ en corrientes de gas⁷⁷

Procesos para remoción de CO ₂ y H ₂ S en corrientes de gas					
Proceso	Alcanza especificaciones de H ₂ S	Remueve COS, CS ₂ y Mercaptanos	Remoción selectiva de H ₂ S	Nivel de CO ₂ mínimo obtenido	Se degrada
Mono-etanol-aminas (MEA)	Sí	Parcial	No	100 ppm presiones bajas a moderadas	Sí (COS, CO ₂ , CS ₂ , SO ₂ , SO ₃ y mercaptanos)
Dietanolaminas (DEA)	Sí	Parcial	No	50 ppm proceso SNEA-DEA	Algunos (COS, CO ₂ , CS ₂ , HCN y mercaptanos)
Trietanolaminas (TEA)	No	Ligeramente	No	Presión parcial mínima de 3 kPa (0.5 psia)	Pocos (COS, CS ₂ y mercaptanos)
Metil dietanolamina (MDEA)	Sí	Ligeramente	Algunas	Remoción sólo de forma masiva	No
Diglicolaminas (DGA)	Sí	Parcial	Sí	110 ppm; presiones de moderadas a altas	Sí (COS, CO ₂ y CS ₂)
Di-isopropanolamina (DIPA)	Sí	solo COS	Sí	No aplica	Resistente a degradación por COS
Sulfinol	Sí	Parcial	Sí	50 ppm	Algunos (CO ₂ y CS ₂)
Carbonato de potasio caliente	Sí, con características especiales de diseño	Parcial	No	Sin reportar	Sin reportar
Sterford	Sí	No	Sí	No, cantidad significativa de CO ₂ removida	Sí (CO ₂ en concentraciones altas)
Selexol	Sí	Ligeramente	Algunas	Puede absorberse	No
Rectisol	Sí	Sí	No	1 ppm	Sin reportar
Tamices Moleculares	Sí	Sí (excluyendo CS ₂)	Algunas	Problemas de especificación cuando el contenido de CO ₂ es menor a 2%	No aplica
Membranas	No	Ligeramente	No	Depende de la concentración en alimentación	No aplica

3.4.4.2.1 Endulzamiento del biogás, remoción de H₂S

En la actualidad existen numerosos procesos para la remoción de H₂S del biogás basados en diferentes principios fisicoquímicos. Estos procesos se pueden clasificar de acuerdo a su principio básico de separación del gas ácido. La tabla 3.10 muestra los procesos más comunes.

⁷⁷ Kidnay y Parrish, 2006

Tabla 3.10 Procesos comunes para la remoción de gases ácidos, disponibles en el mercado⁷⁸

Proceso	Licencia
<u>1 Absorción en lecho seco</u>	
Esponja de Hierro	
Sulfa-Treat	The Sulfa Treat company
Óxido de Zinc	
Tamices Moleculares	Union Carbide Corporation
<u>2 Solventes químicos</u>	
Mono-etanol-aminas (MEA)	
Dietanolaminas (DEA)	
Metil dietanolamina (MDEA)	
Diglicolaminas (DGA)	
Di-isopropanolamina (DIPA)	
Carbonato de potasio caliente	
Sistemas carbonatados	
<u>3 Solventes físicos</u>	
Fluor Flexsorb	Fluor Daniel Corporation
Shell Sulfinol	
Selexol	Norton Co. Chemical Process Products
Rectisol	Lurgi, Kohle & Mineraloltechnik
<u>4 Conversión directa de H₂S a azufre elemental</u>	
Claus	
LO-CAT	ARI Technologies
Sterford	Ralph M. Parsons Co.
IFP	Institute Français du Petrole
Sulfa-Check	Exxon Chemical Co.
<u>5 Barridos de sulfuros</u>	
<u>6 Destilación</u>	
Amino-aldehidos condensados	
<u>7 Permeabilidad de los Gases</u>	

La concentración de H₂S en el biogás puede variar mucho dependiendo de la cantidad de azufre elemental en la basura contenida en el relleno.

Adsorción de H₂S

Tanto el agua como los gases ácidos pueden ser removidos mediante la adsorción en zeolitas sólidas sintéticas. Para mejorar la eficiencia en cuanto a la remoción de gases ácidos, es conveniente remover previamente el vapor de agua. La adsorción ocurre generalmente a presiones moderadas (30 atmósferas) y la cama puede ser regenerada haciendo pasar gas dulce

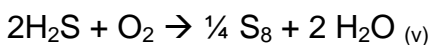
⁷⁸ Arnold y Stewart, 2006

ligeramente caliente a través de la criba. Existen cribas de diferentes porosidades que permiten la remoción selectiva de gases ácidos, una criba molecular de 4Å puede llegar a reducir el nivel de H₂S hasta 6 ppm, pero esta reducción demanda una regeneración a 315° C durante un tiempo prolongado (puede producirse COS).

Este proceso está limitado a corrientes pequeñas, de presión moderada, por lo anterior se usan para pulir gases y no como un proceso de endulzamiento principal.⁷⁹

Carbón activado

El H₂S es pobremente adsorbido por el carbón activado; sin embargo, la presencia de O₂ da paso a una oxidación catalítica que produce azufre elemental y vapor de agua que se adsorben en gran medida.



Se requieren pequeñas cantidades de O₂ para tener altas eficiencias de remoción. Generalmente, el biogás contiene oxígeno suficiente, si no, puede inyectarse una pequeña cantidad de aire al adsorbente. También pueden emplearse catalizadores como I₂ y Fe. Existen columnas adsorbedoras de carbón activado con incrustaciones de Fe capaces de adsorber de 30 a 45 g de H₂S por cada gramo de carbón activado.⁸⁰

Si el catalizador es O₂, el carbón activado puede ser regenerado térmicamente y el azufre se recupera por condensación.

Absorción de H₂S

El H₂S puede ser oxidado en lavadores o depuradores huecos o empacados, empleando soluciones de etanolaminas (MEA, DEA, TEA), carbonatos de sodio

⁷⁹ EAUK, 2002; Kidnay y Parrish, 2006; Arnold y Stewart, 1999

⁸⁰ Kidnay y Parrish, 2006; Arnold y Stewart, 1999

y potasio, hidróxidos alcalinos, óxido férrico, entre otros. Los factores más importantes a considerar en la selección de un método de absorción son la concentración inicial de H_2S , el flujo de biogás (ya que afectan el tamaño y costo del equipo necesario) y la demanda energética para la regeneración del absorbente. La tabla 3.11 presenta algunas ventajas y desventajas de los solventes químicos y físicos.

Tabla 3.11 Diferentes tipos de solventes para absorción de H_2S , ventajas y desventajas⁸¹

Comparación entre solventes químicos y físicos	
Solventes químicos	
Ventajas	Desventajas
Insensible a la presión parcial de H_2S y CO_2	Requiere mucha energía para regenerarse
Puede reducir la concentración de H_2S y CO_2 a ppm	Las aminas están en solución acuosa, por lo tanto el gas sale saturado
Solventes físicos	
Ventajas	Desventajas
Requiere poca energía para regenerarse	Resulta difícil llevar H_2S a ppm
Puede ser selectivo entre H_2S y CO_2	Son muy sensibles a la presión parcial de los gases

Absorción en lecho sólido

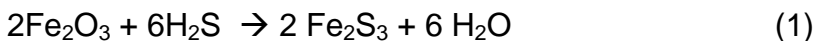
Existen partículas sólidas que pueden absorber gases ácidos a través de reacciones químicas o enlaces iónicos. Usualmente, en procesos de absorción en lecho sólido, la corriente de gas se hace pasar a través del absorbente y cuando éste se satura de gases ácidos, debe ser regenerado o repuesto. Los procesos más comunes en esta categoría son: esponja de fierro y esponja de zinc.

Esponja de fierro

Este proceso utiliza la reacción entre el óxido de fierro y el H_2S para endulzar el gas. Se aplica para mezclas con concentración de H_2S de 300 ppm y opera a presión moderada (50-500 psig). No remueve el CO_2 .

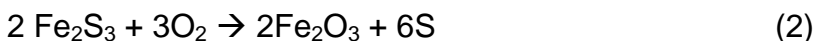
⁸¹ Kidnay y Parrish, 2006

La reacción es la siguiente:



La reacción requiere presencia de agua ligeramente alcalina y una temperatura menor a los 45°C; si el gas no contiene humedad suficiente, puede ser necesario inyectar agua al absorbente.

El óxido de fierro se empaca en viruta de madera para aumentar el área de contacto. La esponja se contiene en un tanque a través del cual fluye el biogás. Una vez removido el H₂S, la esponja se regenera exponiéndola al aire. Se llevan a cabo las siguientes reacciones:



La regeneración libera mucha energía por la naturaleza exotérmica de las reacciones. El aire debe introducirse muy lentamente para poder disipar el calor producido.

Debido a las dificultades en la regeneración de la esponja, la eventual saturación con S₂ (10 ciclos de operación) y el bajo costo de la esponja, este proceso se lleva a cabo por lotes, generalmente. Hay compañías que se encargan de remplazan las esponjas de fierro y de su disposición final.⁸²

Óxido de Zinc

Es un proceso similar al de la ferro-esponja pero utiliza una cama granular de óxido de zinc. Se lleva a cabo la siguiente reacción:



⁸² Kidnay y Parrish, 2006

Este proceso está en desuso debido a los problemas que presenta la disposición final del catalizador, que es una sal de metal pesado.⁸³

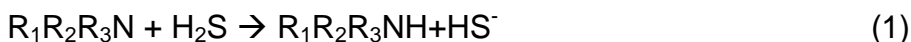
Absorción con aminas

Las aminas son compuestos que se forman cuando el ion amonio (NH_4^+) reemplaza uno o más átomos de hidrógeno en un hidrocarburo, resultando una amina primaria, secundaria, terciaria o cuaternaria. Las aminas primarias son las más reactivas, seguidas por las secundarias y terciarias. Las aminas remueven CO_2 y H_2S en dos pasos:

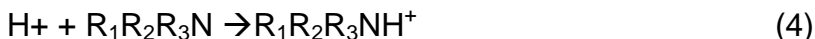
1. El gas se disuelve en el líquido (absorción física)
2. El gas disuelto, que es un ácido débil, reacciona con las aminas, que son ligeramente básicas.

La absorción del gas es gobernada por la presión parcial del H_2S y CO_2 en la mezcla, mientras que en la fase líquida es gobernada por la reactividad de las especies disueltas.

Las reacciones son las siguientes (con amina terciaria):



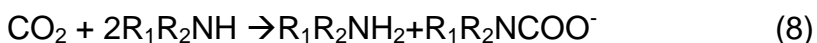
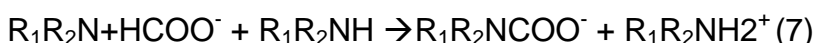
Ahora, cuando el CO_2 se disuelve en agua, se hidroliza para formar ácido carbónico que después se disocia y forma bicarbonato. Después, el bicarbonato lleva a cabo una reacción ácido-base con la amina:



⁸³ Kidnay y Parrish, 2006

Esta reacción ocurre con todas las aminas (primarias, secundarias o terciarias) pero la reacción es más lenta que la del H₂S ya que la disociación del ácido carbónico se lleva a cabo muy lentamente.

Existe un segundo mecanismo de reacción para el CO₂, pero éste requiere la presencia de un hidrógeno reactivo en la estructura de la amina:



Debido a la existencia de estos dos mecanismos de reacción, la absorción de H₂S y de CO₂ varía con las diferentes aminas. Para aminas primarias y secundarias no hay gran diferencia en la tasa de absorción de ambos gases. Sin embargo, las aminas terciarias no cuentan con hidrógeno lábil y no pueden formar carboxilos por lo que la tasa de absorción de H₂S es significativamente mayor que la de CO₂.

Para las reacciones descritas, una alta presión y baja temperatura desplazan el equilibrio hacia la derecha y viceversa. Al aumentar la temperatura y bajar la presión se puede regenerar el absorbente.⁸⁴

Absorción con sales alcalinas

El proceso de remoción con carbonato de potasio caliente, K₂CO₃, es muy similar al de las aminas, donde después de absorbidos físicamente, el H₂S y CO₂ reaccionan químicamente con la solución. La química simplificada es la siguiente:



⁸⁴ Kidnay y Parrish, 2006; Arnold y Stewart, 1999

Las reacciones son reversibles basadas en la presión parcial de los gases ácidos. El H_2S no puede removerse sin suficiente CO_2 ya que éste produce KHCO_3 y éste, a su vez, regenera el carbonato de potasio.

La figura 3.16 muestra un proceso típico de endulzamiento con carbonato de potasio caliente.⁸⁵

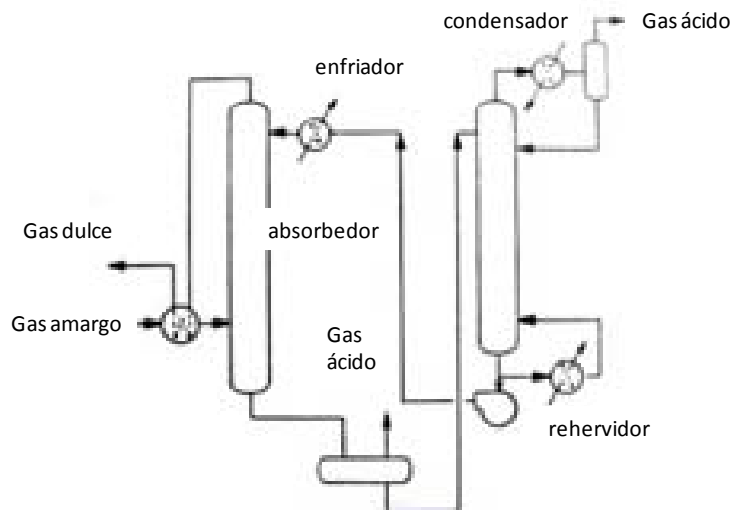


Figura 3.16 Absorción de gases ácidos con carbonato de potasio caliente⁸⁶

Existen varios procedimientos para este tipo de endulzamiento que incluyen el uso de catalizadores que mejoran las tasas de reacción en el absorbedor y el stripper y disminuyen los niveles de corrosión en el sistema. Los siguientes son algunos de los procesos disponibles más utilizados: Benfield, Girdler, Catacarb, Giammarco-Vertocoke.

Absorción física

A diferencia de la absorción química, la absorción física consta de una sola etapa; no ocurre reacción química, la remoción depende únicamente de un proceso físico, y este de la presión parcial de los gases y la temperatura. Los procesos de absorción son más eficientes si la presión parcial de los gases a

⁸⁵ Arnold y Stewart, 1999

⁸⁶ Arnold y Stewart, 1999

remover es elevada (mayor a 3.55 bar). La figura 3.17 muestra un proceso típico de absorción física con flujo cruzado.

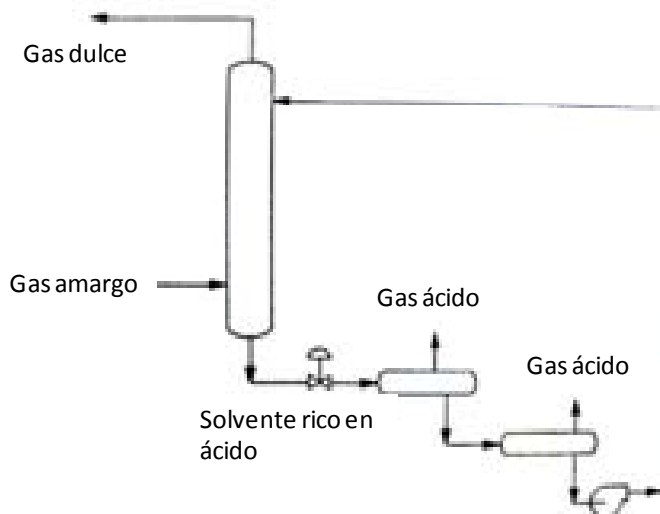


Figura 3.17 Absorción física de gases ácidos⁸⁷

Se pueden usar diferentes solventes para remover selectivamente H_2S ó CO_2 , la mayoría de dichos solventes y procesos de absorción física se encuentran patentados y son vendidos por las compañías que los desarrollaron.

Dos de los procesos más utilizados son:⁸⁸

Sulfinol®.- Remueve H_2S , COS y CS_2 . El CO_2 es removido en menor medida. Se usa generalmente en mezclas con una relación de H_2S y CO_2 mayor que 1:1 y donde no es necesario remover el CO_2 en igual medida.

Selexol®.- Remueve selectivamente los compuestos de azufre y casi el 85% del CO_2 presente en la mezcla. Resulta económico si la presión parcial de los gases ácidos es elevada, y también puede reducir la humedad a menos de 110 kg/MMm^3 .

⁸⁷ Arnold y Stewart, 1999

⁸⁸ Kidnay y Parrish, 2006; Arnold y Stewart, 1999

Conversión de H₂S a S₂

Existen procesos que permiten endulzar el gas y producir azufre elemental. Dichos procesos involucran solventes y catalizadores específicos. En general, son utilizados para mezclas de gas natural con alta concentración de H₂S. Algunos procesos comunes en la conversión de H₂S a azufre elemental son: Claus, IFP, Lo-Cat, Sulfa-Rite, Sulfatreat, Stretford y Sulfa-check.⁸⁹

Lo-Cat®. Es un proceso de oxidación en fase líquida basado en una solución de hierro templado en agua, que convierte el H₂S en agua y azufre elemental. En el proceso el CO₂ no reacciona. El azufre se separa por gravedad, centrifugación o fundición.

El H₂S entra en contacto con el reactivo en el absorbedor, reacciona con el hierro y forma azufre, siguiendo las siguientes reacciones.

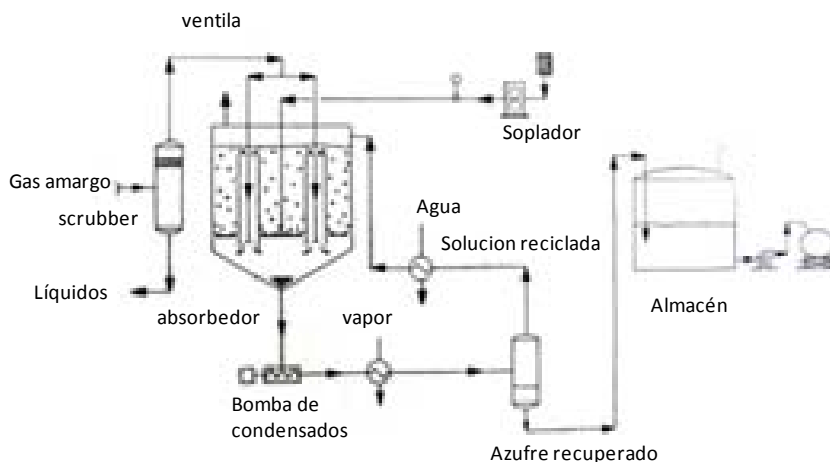
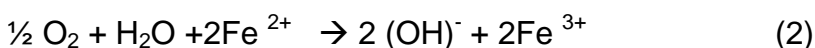
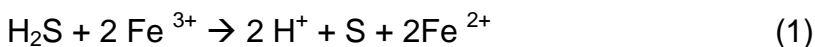


Figura 3.18 Proceso Lo-Cat⁹⁰

⁸⁹ Kidnay y Parrish, 2006; Arnold y Stewart, 1999

⁹⁰ Arnold y Stewart, 1999

Sulfatreat®- Es un proceso similar al de ferro-esponja pero utiliza una mezcla patentada de óxido férrico y óxido triférrico que reacciona con agua para endulzar la mezcla de gas. El proceso se lleva a cabo en la superficie de un material granular y los productos pueden ser reciclados o dispuestos en el relleno sanitario. El sistema cuenta con dos tanques con material absorbente que pueden operar en serie para pulir el gas, o en paralelo cuando alguno de los empaques se acerca al punto de saturación.

3.4.4.2.2 Remoción de CO₂

El porcentaje de CO₂ presente en el biogás depende de múltiples factores: las características de los desechos y la relación C:N, la cantidad de agua, la presión y la temperatura. La solubilidad del CO₂ en agua aumenta cuando se incrementa la presión.

No todos los motores requieren bajos niveles de CO₂; es más, algunos mencionan que un incremento en volumen debido al dióxido de carbono resulta en una combustión más eficiente. Para el caso en que el CO₂ deba reducirse o eliminarse, se pueden emplear los siguientes procesos:

Absorción

La absorción química del CO₂ puede llevarse a cabo con solventes sólidos o líquidos. El absorbente sólido más utilizado es la cal viva. Con respecto a los solventes líquidos, las soluciones más empleadas son las de NaOH, KOH, Ca(OH)₂, Na₂CO₃ y K₂CO₃.

También existen soluciones de aminas (monoetanolaminas, dietanolaminas, etc.) que remueven selectivamente el CO₂. La regeneración de algunas soluciones demanda mucha energía y requiere mantenimiento específico por lo que el uso debe justificarse técnicamente. Si se selecciona un motor que admita CO₂ puede reducirse el costo de la instalación.⁹¹

⁹¹ Arnold y Stewart, 1999

Adsorción de CO₂

La adsorción es llevada a cabo haciendo pasar el biogás a través de cribas moleculares hechas de adsorbentes como carbón activado, zeolita natural, aluminosilicatos, etc., caracterizados por su estructura porosa y gran superficie de adsorción. Las cribas de 4Å son capaces de remover simultáneamente al CO₂, H₂S y H₂O, pero por su elevado costo sólo son recomendables si se desea obtener gas con calidad de gasoducto (95 a 99% de CH₄).⁹²

Separación del CO₂ por medio de membranas

Por principio termodinámico, la fuerza promotora del movimiento a través de las membranas es la diferencia en el potencial químico (μ) en ambos lados de la membrana, para un compuesto determinado. El potencial químico del componente en la corriente de alimentación debe ser mayor al potencial químico en el efluente. Ahora, de acuerdo a la ley de Fick, el flujo de un gas a través de una membrana (J) es directamente proporcional a su solubilidad (S), su coeficiente de difusión (D) y el diferencial de presión (p), que juntos se expresan como la permeabilidad (P), e inversamente proporcional al espesor de la membrana (L).

$$J=SDp/L \quad (1)$$

$$J=P/L \quad (2)$$

Todos los componentes de una mezcla tienen una permeabilidad finita y el grado de separación que se alcance depende de ésta. La selectividad es el ratio entre dos permeabilidades, P_1/P_2 , y resulta importante en el diseño de un sistema de remoción de CO₂. Por ejemplo, una selectividad de 20 para CO₂/CH₄ significa que el CO₂ se mueve 20 veces más rápido a través de la membrana que el CH₄.⁹³

⁹² Arnold y Stewart, 1999

⁹³ Kidnay y Parrish, 2006

Existen diferentes tipos de membranas para un gran número de aplicaciones industriales. Son extremadamente delgadas (500-1000 Å), para maximizar la transferencia de masa y minimizar el costo y la superficie de la instalación. Las membranas comerciales más comunes son las tubulares; una coraza contiene tubos largos atados paralelamente en sus extremos, de manera similar a un intercambiador de calor. También pueden estar dispuestas en capas, enrolladas en tubos por donde fluyen los gases permeables.

En el arreglo de tubos y coraza, el biogás es alimentado por el lado de la coraza a elevadas presiones (mayores a 15 bar) para que fluya sobre la superficie de las membranas y el CO₂ las atraviese hacia el interior de los tubos. El metano no penetra la membrana por su baja solubilidad y baja difusividad. Bajo ciertas condiciones el CO₂ y el H₂S penetran las membranas entre 10 y 20 veces más rápido que el CH₄ y hasta 200 veces más que el H₂O (v). El CO₂ separado sale a una presión de 1.5 bar, aproximadamente.⁹⁴

Los sistemas de membranas tienen la ventaja de ser pequeños y ligeros, de operación y mantenimiento sencillos. Además, no requieren de regeneración por estar hechas de polímeros resistentes a la corrosión. Sin embargo, su naturaleza modular hace que una instalación a gran escala sea costosa y la alta presión de alimentación del biogás puede ser un inconveniente.

3.4.4.3 Remoción de siloxanos

En los rellenos sanitarios existen ciertos compuestos que contienen silicones que se transforman en siloxanos durante la fermentación. Cuando estos compuestos alcanzan altas temperaturas dentro de motores o turbinas, se produce una ruptura de los siloxanos que da lugar a compuestos más estables como: SiO₂, CO₂ y H₂O. Los siloxanos se convierten en silicatos y cuarzo cristalino que se acumulan en los cilindros de los motores disminuyendo el volumen de la cámara de combustión y aumentando la relación de compresión y tendencia a la detonación, así como a la corrosión del equipo.

⁹⁴ Kidnay y Parrish, 2006; Arnold y Stewart, 1999

Estos compuestos pueden ser removidos a través de filtros de carbón activado disponibles comercialmente cuya capacidad de absorción oscila entre 10 000 y 15 000 mg de siloxanos por kilogramo de carbón activado. La presencia de humedad puede afectar su rendimiento, por lo que la corriente alimentada a los filtros debe estar seca y ligeramente caliente. Generalmente, los motores toleran en mayor medida la presencia de siloxanos (ver tabla 3.8).⁹⁵

3.4.5 Sistema de control para el sistema de pretratamiento y aprovechamiento del biogás

El diseño de un sistema de control depende de las particularidades geográficas (humedad, topografía), del diseño del relleno, la composición de los RSU y el equipo auxiliar necesario para el sistema. Al especificar el equipo auxiliar, debe tomarse en cuenta si es necesario un ventilador para transportar el gas a través del sistema y algún tipo de limpieza para acondicionar el gas antes de que entre al dispositivo de control. También, debe determinarse cómo disponer del biogás recuperado.

Una vez que los componentes del sistema han sido seleccionados, éstos deben dimensionarse. El dimensionamiento es el paso crítico; las suposiciones hechas en este punto, influirán en mayor medida en la inversión de capital que cualquier otra consideración técnica.

Los parámetros generales deben especificarse antes de que el costo total del equipo del sistema pueda ser estimado. Estos parámetros incluyen los materiales de construcción, presencia o ausencia de aislantes y la vida útil del sistema. La vida útil no sólo varía según el tipo de sistema de control, pues también influye la severidad del ambiente en el que será instalado.⁹⁶

⁹⁵ Wheels, 2006; Estíbaliz, 2004

⁹⁶ EAU, 2002; Estíbaliz, 2004

4.6 Control ambiental

El funcionamiento de los sistemas para recuperación de energía produce diversos impactos ambientales, incluyendo emisiones gaseosas y de partículas y efluentes líquidos. El tratamiento previo al aprovechamiento energético del biogás, así como el control de emisiones, son partes fundamentales en el diseño de un sistema de procesamiento térmico. En algunos casos el costo del sistema de control ambiental es equivalente o mayor al del propio sistema de recuperación de energía.

4.6.1 Emisiones atmosféricas

La Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA, por sus siglas en inglés) en su Acta Federal del Aire Limpio, identifica los contaminantes con una importancia específica por su impacto en la salud del ser humano y en el medio ambiente. Con la información recopilada, se prepararon criterios de contaminación y de niveles ambientales aceptables conocidos como Normas sobre la Calidad del Aire Ambiental. Los contaminantes de criterio identificados incluyen: monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono, materia aspirable en partículas (PM₁₀) y plomo. Existen otros contaminantes no-clasificados para los cuales aún no se establecen niveles permisibles, pero que también deben estudiarse por su impacto en la salud de los seres humanos.⁹⁷

Óxidos de nitrógeno (NO_x). Los dos óxidos de nitrógeno más importantes son el monóxido y el dióxido de nitrógeno (NO y NO₂) conocidos como NO_x. Los NO_x térmicos se forman mediante reacciones entre el nitrógeno y el oxígeno en el aire utilizado para la combustión. Los NO_x combustibles se forman mediante reacciones entre oxígeno y nitrógeno orgánico en el combustible. Los óxidos de nitrógeno son precursores de la formación del ozono y peroxi-acetonitrilo (PAN), que son oxidantes fotoquímicos conocidos como smog. Los óxidos de nitrógeno

⁹⁷ USEPA, 2008; Tchobanoglous, et.al., 1994

también contribuyen a la formación de aerosoles nítricos que pueden causar niebla y lluvia ácida.

Dióxido de azufre (SO₂). El dióxido de azufre se forma mediante la combustión de combustibles que contienen azufre. Es un gas irritante para los ojos, la nariz y la garganta. En altas concentraciones puede causar enfermedades e incluso la muerte. Se relaciona con la producción de lluvia y nieve ácidas y ha afectado la flora y fauna en ríos, lagos y bosques.

Monóxido de carbono (CO). El monóxido de carbono, formado durante la combustión de materiales carbonosos ante oxígeno insuficiente, reacciona con la hemoglobina en la corriente sanguínea para formar carboxihemoglobina (HbCO). El cuerpo humano confunde la HbCO con la oxihemoglobina (HbO₂) que normalmente transfiere el oxígeno a los tejidos vivos a través del cuerpo. La falta de oxígeno puede causar dolores de cabeza, náuseas e incluso la muerte en concentraciones muy elevadas.

Materia particulada (MP). La materia en partículas se forma durante varios procesos combustivos, la combustión incompleta y el arrastre físico de materiales no combustibles. Las emisiones de partículas sólidas reducen la visibilidad y provocan daños a la salud. Las partículas menores a 10 µm son particularmente dañinas porque pueden penetrar profundamente los pulmones. Aproximadamente, el 30% de las emisiones de partículas son menores a este diámetro, y del 7 al 19% son menores a 2 µm. Varios estados de los Estados Unidos de América, como California, han puesto en vigor límites de concentración para partículas inferiores a las 2 µm.⁹⁸

Gases ácidos. La quema de gases que contienen azufre y nitrógeno puede provocar la formación de gases ácidos. El SO₂ puede oxidarse para formar SO₃ y más tarde reaccionar con el agua del ambiente formando ácido sulfúrico

⁹⁸ Tchobanoglous, et.al., 1994

(H₂SO₄), y el NO₂ puede formar en la atmósfera ácido nítrico (HNO₃); estos ácidos conforman la lluvia ácida.

4.6.2 Control de la contaminación

A pesar de que en el país existen normas que regulan la emisión de contaminantes de fuentes fijas derivadas de la quema de combustibles fósiles (Ver sección 3.2.3.2), se deben revisar los estándares internacionales (Estados Unidos de América, Unión Europea) que, generalmente, son más estrictos.

Tabla 3.12 Límites máximos permisibles de contaminantes para equipos que operen con combustibles fósiles gaseosos, de capacidad mayor a 300 MWh⁹⁹

Contaminante	SEMARNAT			USEPA	ECE
	ZMCM	ZC	RP		
Partículas Suspendidas Totales PST (mg/m³)	NA	NA	NA	NA	NA
SO₂	NA	NA	NA	NA*	35 a 800mg/m ^{3**}
NOx (ppm v)	110	110	375	15	300 mg/m ³

ZMCM-Zona metropolitana de la Ciudad de México.

ZC- Se refiere a las zonas metropolitanas de Monterrey, Guadalajara, Tijuana, Baja California y Ciudad Juárez.

*No puede utilizarse ningún combustible gaseoso cuyo contenido de azufre sea menor a 0.25gH₂S/100scft y menor que 5 g de azufre total/100scft por más de 168 horas acumulables por año.

**Depende del poder calorífico del gas, 800mg/m³ para gas de bajo poder calorífico.

La tabla 3.12 muestra una comparación entre los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes derivados de la quema de combustibles fósiles gaseosos, en equipos de generación de energía con capacidad mayor a 300 MW, como los que se planea analizar en este estudio, determinados por la SEMARNAT, la USEPA y la Comisión Europea del Medio Ambiente (ECE, por sus siglas en inglés).

⁹⁹ Tadeo, 2008

Una vez instalado un sistema de aprovechamiento energético de biogás, debe considerarse uno de los siguientes sistemas para tratar las emisiones atmosféricas gaseosas:¹⁰⁰

1. Precipitadores electrostáticos, filtros de mangas, filtros electrostáticos de lecho de grava (para control de partículas).
2. Separación en origen, controles de combustión, tratamiento de los gases de combustión (control de NOx).
3. Separación en origen, depuración húmeda o seca (control de SO₂ y gas ácido).
4. Controles de combustión (control de CO e HC).
5. Separación en origen, controles de combustión, control de partículas (control de la contaminación no específica).

¹⁰⁰ Tchobanoglous, et.al., 1994

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el proceso de evaluación de la producción de biogás y su aprovechamiento energético en diferentes rellenos sanitarios de México. A partir de la selección de diferentes sitios, se llevó a cabo el cálculo de las emisiones y se analizaron las opciones de aprovechamiento energético existentes, sus costos y la viabilidad financiera de los proyectos en diferentes escenarios; determinando los factores que favorecen la implementación de este tipo de proyectos.

4.1 Selección de rellenos sanitarios a evaluar

Para analizar la producción de biogás y los métodos de aprovechamiento energético del mismo en rellenos con diferentes características, se realizó una selección de sitios para la disposición final de residuos sólidos urbanos considerando las siguientes características:

- Escala (cantidad de residuos contenidos en el relleno)
- Condiciones climatológicas
- Año de clausura y tiempo de operación

Los sitios seleccionados para el estudio se encuentran en zonas con diferentes condiciones climatológicas y tienen capacidades (para disposición de residuos) diferentes. En cuanto al año de clausura, se seleccionaron sitios que están todavía en operación, están próximos a ser clausurados o fueron clausurados hace poco tiempo, ya que después de ciertos años la producción de biogás decae y ya no es aprovechable. Los rellenos elegidos son los siguientes:

- 1) Relleno Nuevo Laredo, Nuevo Laredo, Tamaulipas.
- 2) Relleno Mérida, Mérida, Yucatán.
- 3) Relleno Querétaro, Querétaro, Querétaro.

- 4) Relleno Picachos, Zapopan, Jalisco.
- 5) Relleno El Verde, León, Guanajuato.
- 6) Relleno Bordo Poniente, Texcoco, Estado de México.

Es importante mencionar que en los rellenos seleccionados no se recolecta ni se quema el biogás emitido.

La tabla 4.1 resume las condiciones bajo las que operan los rellenos sanitarios seleccionados. Los datos completos se encuentran en el **Anexo I**.

Tabla 4.1 Características importantes de los rellenos sanitarios seleccionados¹⁰¹

Características importantes de los rellenos seleccionados										
Relleno	Año de apertura	Tiempo de vida (años)	Basura que recibe (ton/día)	Capacidad aproximada (ton)	Superficie (ha)	Profundidad promedio (m)	Precipitación promedio (mm/año)	Temperatura promedio (°C)	k (1/año)	Lo (m ³ /ton)
Nuevo Laredo	1994	16	650	2 700 000	22	24	457	22.9	0.05	80
Mérida	1997	15	680	2 600 000	19	20	1370	26.3	0.08	84
Querétaro	1996	30	700	6 100 000	20	20	569	16.6	0.065	84
Picachos	2000	12	1112	6 000 000	8.5	35	1008	19.2	0.08	84
El Verde	2002	14	1700	10 000 000	30	20	600	16.9	0.065	84
Bordo Poniente	1994	14	12500	63 000 000	375	15	643	16.9	0.065	84

4.2 Cálculo de emisiones

Para analizar los factores que afectan la generación de biogás en un relleno y qué método resulta más rentable de acuerdo a las características del mismo, se decidió utilizar el programa de Análisis de Proyectos de Energía Limpia RETScreen® que, además de calcular las emisiones de biogás de acuerdo a las características específicas de cada relleno, cuenta con una extensa base de datos de la capacidad y eficiencia de los equipos de quema de biogás disponibles en el mercado que ayudan a estimar el potencial energético de las emisiones en distintos escenarios. Dicho programa puede ser utilizado para evaluar la producción de energía limpia y ahorros energéticos, costos en el ciclo

¹⁰¹ SEDESU, 2007; SEMARNAT, 2008; Proactiva, 2007; USEPA, 2008

de vida, reducción de emisiones, aspectos financieros y de riesgo de varios tipos de tecnologías de energía eficiente y renovable.

Como se mencionó anteriormente, existen algunos modelos para estimar la generación de biogás en rellenos sanitarios de acuerdo a la cantidad de basura depositada, que consideran una reacción de descomposición de primer orden (Mexico Landfill Gas Model y E-Plus de la USEPA, RETScreen® en Canada). RETScreen®, el modelo seleccionado, sigue el Modelo del Cañón Scholl, el mismo que utiliza el Modelo Mexicano de Biogás, para hacer sus estimaciones.¹⁰²

El Modelo del Cañón Scholl define automáticamente ciertos parámetros y es el modelo empírico de descomposición de primer orden más utilizado en la industria y por las agencias reguladoras de países como Canadá y los Estados Unidos de América (USEPA). Existen modelos más detallados que exigen información más específica para cada relleno de la que en muchos casos se encuentra disponible; sin embargo, si lo que se desea es hacer estudios de prefactibilidad o comparar la rentabilidad en varios proyectos, este modelo es suficiente ya que asume que existe una fracción fija de material biodegradable por unidad de tiempo y estima la generación de metano a partir de ésta fracción.¹⁰³

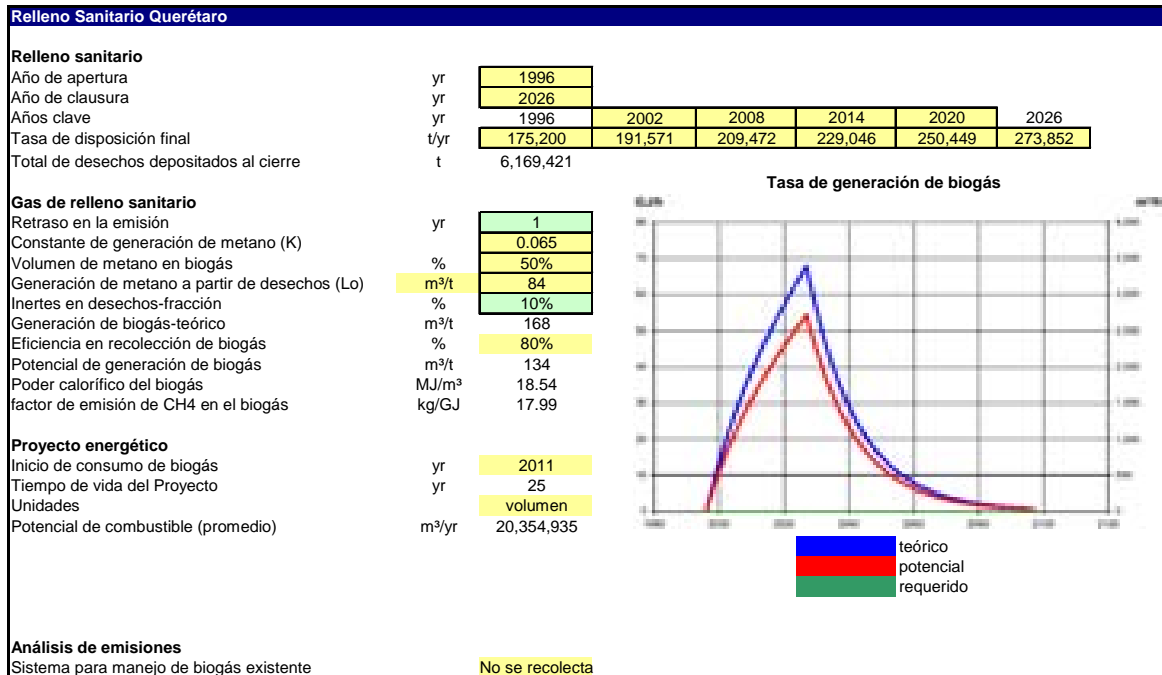
Para calcular las emisiones en un relleno determinado debe conocerse la composición, densidad, humedad y edad de los residuos depositados. Además de las características que se muestran en la tabla 4.1, se asume que el contenido de metano en el biogás, de acuerdo a la composición típica de los RSU en México, es de 50%, ver tabla 3.2.

La gráfica 4.1 señala la información que se debe proporcionar al programa para obtener la curva de las emisiones teóricas y las emisiones potenciales en un

¹⁰² Guzzone, et.al., 2003

¹⁰³ Banco Mundial, 2004

relleno determinado. En el ejemplo se muestra la simulación para el Relleno Querétaro. Los valores en amarillo deben ser proporcionados por el usuario y los marcados en verde son valores preestablecidos por el modelo que pueden sustituirse en caso de contar con información específica para cada caso.



Gráfica 4.1 Cálculo de emisiones de biogás para la cantidad de basura depositada en el Relleno Querétaro

4.3 Opciones de aprovechamiento

Una vez calculadas las emisiones, se deben analizar las opciones de aprovechamiento energético. Para el caso de generación de energía a partir de biogás las opciones más comunes son los motores recíprocos, las turbinas de gas y las turbinas de ciclo combinado, aunque estas últimas se utilizan únicamente en rellenos de grandes dimensiones.¹⁰⁴

El simulador cuenta con una base de datos de los fabricantes y productos que se encuentran disponibles para el aprovechamiento de biogás, así como sus

¹⁰⁴ McBean, et.al., 1995

especificaciones, figura 4.1. Al seleccionar un modelo también se puede determinar el número de unidades necesarias para el proyecto. Para el combustible a utilizar, existen varios modelos de motores y turbinas. Se seleccionaron aquellos cuya potencia se adaptaba al potencial energético del biogás emitido por el relleno, los motores General Electric y las turbinas Honeywell e Ingersoll-Rand han sido adaptados para el uso de biogás y tienen una capacidad menor que los convencionales por lo que resultan un excelente opción para este tipo de proyectos.



Figura 4.1 Ventana de la base de datos para la selección del equipo de aprovechamiento energético

La tabla 4.2 muestra el potencial energético del método seleccionado en la ventana anterior. El usuario determina la disponibilidad, es decir, el factor de operación de la planta.

Una vez seleccionado un modelo y determinado el tiempo de vida del proyecto, en la gráfica aparece en verde el biogás requerido por el método seleccionado, como se muestra en la gráfica 4.2.

Tabla 4.2 Cálculo de la capacidad energética del equipo seleccionado

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Motor recíproco		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	3,165	
Electricidad exportada	MWh	25,369	
Fabricante	GE		
Modelo	JMS 312 GS-B.L - 633kW		
Tasa de Calor	kJ/kWh	9,494	5 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	30.0	

Para que el proyecto sea autosustentable, es necesario que el método seleccionado (verde) no rebace la curva roja. Si lo hiciese, puede modificarse el año de inicio del proyecto, su tiempo de vida, o el modelo del motor o turbina seleccionados para eliminar la demanda de combustible adicional.



Gráfica 4.2 Biogás requerido para la operación del motor o turbina seleccionados

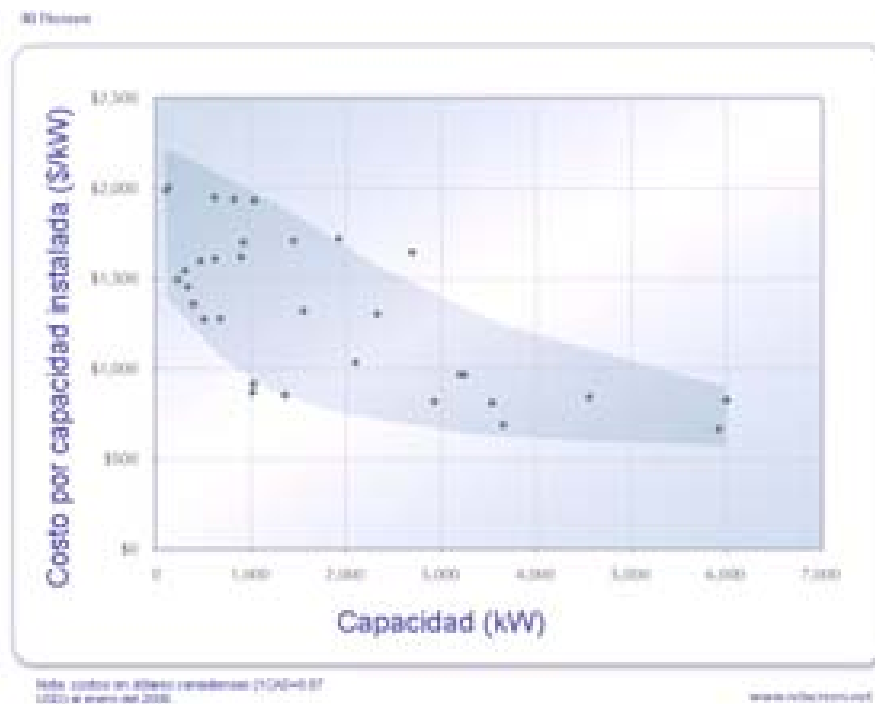
Como se mencionó en la sección 3.4, el biogás debe ser tratado previo a su aprovechamiento para cumplir con las especificaciones técnicas de los

fabricantes. Para simplificar el proceso se consideró que todos los sistemas demandan el mismo pretratamiento: secado, remoción de gases ácidos y remoción de siloxanos, hasta los límites que se muestran en la tabla 3.8. En la sección de análisis de costos se detalla cómo se calculó el costo del pretratamiento.

4.4 Análisis de costos

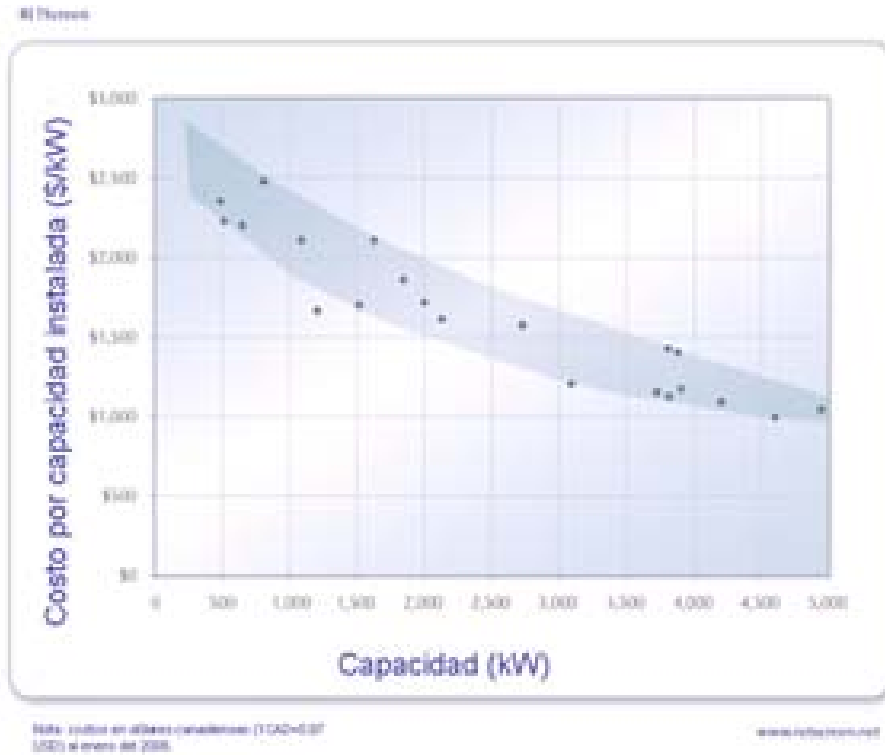
4.4.1 Costos del equipo de generación de electricidad

Los costos de implementación de proyectos de aprovechamiento energético en los sitios seleccionados están regidos por el costo del equipo y la instalación del sistema de generación de energía. Para calcular los costos de dicho equipo se tomaron como referencia las siguientes gráficas.¹⁰⁵



Gráfica 4.3 Costos de equipo e instalación de motores recíprocos

¹⁰⁵ RetScreen Int., 2006



Gráfica 4.4 Costos de equipo e instalación de turbinas de gas (<5MW)



Gráfica 4.5 Costos de equipo e instalación de turbinas de gas (5 a 50 MWH)

En el caso de las turbinas de ciclo combinado, para la turbina de vapor resulta útil la tabla 4.3:

Tabla 4.3 Factores para la determinación de costos de turbinas de ciclo combinado¹⁰⁶

Capacidad (kW)	500	3000	15000
Tipo de turbina	Presión de descarga	Presión de descarga	Presión de descarga
Costo del equipo (\$/kW)	550	325	300
Costo de instalación	1,313	569	525
Flujo de vapor (kg/h)	9,761	57,204	204,300
Presión de operación (bar)	35.5	42.4	49.3
Temperatura sobrecalentamiento (°C)	288	302	343
Presión de descarga (bar)	4.4	11.3	11.3
Temperatura de salida (°C)	148	186	186
Eficiencia de la turbina	47%	65.8%	77.6%
Nota: precios en dólares canadienses a enero de 2006. 1 CAD= 0.86 USD.			

Los precios se encuentran en dólares canadienses al 2006, para hacer la corrección a la fecha se toma en cuenta que el tipo de cambio a noviembre de 2008 es 1 CAD por 0.87 USD y que la inflación en cada uno de los últimos dos años fue de 6%.

4.4.2 Costos de preparación del relleno sanitario y acondicionamiento del biogás

Para calcular los costos de pretratamiento del biogás en cada uno de los rellenos seleccionados se determina qué tipo de pozo conviene para cada relleno y la adaptación del sitio (geomembrana, compresores, etc.) y, posteriormente, qué método conviene para tratar el biogás.

Las tablas 4.4 y 4.5 permiten seleccionar el equipo necesario para la extracción, flujo y control de flujo del biogás.

¹⁰⁶ RetScreen Int., 2006

Tabla 4.4 Selección del sistema de recolección del biogás¹⁰⁷

Sistema de recolección			Costo aproximado			
Nombre	Descripción	Recomendación	Costo relativo	Min	Max	Unidades
Pozos verticales	Se pueden colocar de manera especial para maximizar la recolección de biogás (asistido por software como ARCGIS). El flujo debe ser monitoreado periódicamente.	La ubicación de los pozos debe ser muy precisa para respetar el radio de influencia de cada uno. Si hay exceso de pozos puede filtrarse aire y disminuir la producción de metano.	Medio a bajo, es necesario ventear el biogás producido	210	280	USD/m (perforación e instalación)
	Número de pozos		Adicional	400	650	USD/pozo (cabezal, tuberías y válvulas)
Extractores horizontales	Se pueden colocar mucho antes que los pozos verticales (colectan el biogás antes de que se cierre la sección del relleno)	Se pueden instalar durante el proceso de llenado pero se inundan fácilmente. Se debe esperar a que se produzca biogás para que la recolección sea efectiva.	Bajo	130	180	USD/m (empaquete, instalación)
Extractores de superficie	Funcionan cuando otros tipos fallan debido a la filtración de agua, pueden instalarse hasta que el relleno se llene completamente	Son más efectivos cuando el sellado final del relleno se hace con cobertura sintética o de baja permeabilidad.	Bajo a alto, depende si existe una cobertura sintética	80	115	USD/m (6" HDPE y fosa de 2 m)
Geomembrana	Geotextil impermeable de HDPE instalado en la base del relleno.	Las juntas deben termofusionarse, hacer una revisión exhaustiva para evitar fugas antes de su cobertura.	Alta	99,000	120,000	USD/ha (membrana e instalación general)
Pozos verticales con múltiples profundidades	Son colocados varios pozos a diferentes profundidades en el mismo hoyo y se aplica vacío.	Más viable para rellenos sanitarios profundos, se debe de tomar en cuenta en la etapa de diseño para evitar que los radios de influencia de cada pozo filtren aire del ambiente	Bajo a medio, dependiendo de la profundidad del relleno	260	390	USD/m (tubería de 4" a 6" de PVC e instalación en hoyos de 36")
	Número de pozos		Adicional	650	850	USD/pozo (cabezal, tuberías y válvulas)
Sellos para pozos	Permiten la aplicación de un mayor vacío en los pozos de extracción.	Se recomienda al menos dos sellos por pozo, y en zonas áridas se recomiendan diferentes tipos de sellos (los de bentonita se pueden romper)	Bajo, dependiendo del tipo de sello escogido	500	2,500	USD/pozo sellado

¹⁰⁷ Tchobanoglous, et.al., 1994; CIWMB, 2008

Tabla 4.5 Selección del sistema de flujo y control en la extracción¹⁰⁸

Sistema de flujo y control del biogás						
Nombre	Descripción	Recomendación	Costo relativo	Min	Max	Unidades
Quemador	Las antorchas queman el biogás de forma homogénea con aire en exceso y a una temperatura aproximada de 1 200 °C . Esta última circunstancia asegura una combustión poco contaminante y el cumplimiento de los valores límite de emisiones para este tipo de equipos	Para evacuar el excedente de biogás se debe disponer que la capacidad del quemador sea la suficiente para absorber el flujo máximo derivado de paros no programadas en los puntos de consumo	Alto	80,000	300,000	USD/equipo instalado
Soplador	Este sistema es el que se encarga de generar el vacío necesario para la extracción del biogás, y generalmente consta de un tren de sopladores que funcionan alternadamente para lograr su objetivo	Los sopladores auxiliares pueden ser de menor capacidad para que el costo disminuya, sin afectar de manera considerable la operación del relleno durante los paros imprevistos o por mantenimiento	Alto, debido al consumo de electricidad	15,000	50,000	USD/tren instalado

El tamaño de la geomembrana se puede determinar si se conocen la superficie y profundidad de los rellenos. Para calcular el número de pozos se utilizan las siguientes fórmulas:¹⁰⁹

$$R_i = (Q_w / \pi d_{res} P_{gen})^{1/2}$$

Donde:

R_i = Radio de Influencia

Q_w = Flujo de biogás por cada pozo (m3/y)

d_{res} = Densidad de residuos en el relleno (kg/m3)

P_{gen} = Pico de generación del relleno (m3/y)

$$X = 2R_i \cos 30^\circ$$

Donde:

X= distancia entre pozos

Si se desconocen los datos para calcular R_i , se puede utilizar un radio de 8 a 16m para calcular X. Una vez calculado el número de pozos, conociendo la

¹⁰⁸ CIWMB, 2008

¹⁰⁹ Tchobanoglous, et.al., 1994

superficie y profundidad del relleno sanitario se puede determinar el total de metros de tubería necesaria para los pozos en cada sitio y el costo del sistema de extracción y acondicionamiento del biogás. Es importante respetar los radios de influencia para evitar que el sistema se sobrecargue y pueda penetrar aire del ambiente hacia el relleno, afectando el proceso de digestión anaerobia.

La tabla 4.6 facilita la selección de un sistema de pretratamiento del biogás.

Tabla 4.6 Selección del sistema de pretratamiento del biogás emitido¹¹⁰

Sistema de acondicionamiento del gas							
Proceso	Absorbente	Método de Regeneración	Remoción de contaminantes			Costo inicial (USD)	Mantenimiento (USD/Año)
			CO2	H2S	Siloxanos		
Selexol®	Dimetil eter, polietilén glicol	Presión baja	Sí	Sí	Sí	1,500,000	190,000
Aminas	Monoetanolaminas	Presión baja y rehervir	Sí	Sí	Sin información	680,000	75,000
Benfield	Carbonato de Potasio	Vapor	Sí	Sí	Sin Estudios	670,000	170,000
Catacarb®	Carbonato de Potasio y Aminas boratadas	Vapor	Sí	Sí	Sin Estudios	540,000	60,000
Sulfu-Rite®	Esponja de Hierro	No regenerable	No	Sí	Sin información	45,000	15,000 (6.6USD/Kg)
LO-CAT®	Solución catalítica de Hierro	Aire	No	Sí	Sin información	1,000,000	50,000 (0.22USD/Kg)

Los costos están en dólares americanos actualizados diciembre de 2008.

Una vez seleccionados los métodos más convenientes para la extracción y el acondicionamiento, se suman los costos de instalación, operación y mantenimiento para posteriormente considerarlos en el estimado del costo total de cada proyecto.

4.4.3 Estimación de costos totales

Para estimar los costos de refacciones se considera que, al no ser proyectos muy grandes, pueda requerirse un 30% del costo inicial del equipo en refacciones y que es conveniente adquirirlas al momento de comprar el equipo principal.

Los costos de transporte representan el 5% del costo inicial del equipo.

¹¹⁰ Kidnay y Parrish, 2006; Heguy y Bogner, 2004

El costo de la instrumentación representa el 1% del costo inicial del equipo.

Se considera que para el mantenimiento del equipo a lo largo del tiempo de vida del proyecto se requerirá el equivalente al 5% de la inversión total inicial.

Tanto en la construcción, como en la operación y mantenimiento de la planta, puede haber gastos imprevistos (contingencias). Estimamos que representan entre el 10 y 20% del costo inicial del equipo.

La tabla 4.7 muestra el resumen de los costos para el proyecto de generación de energía del Relleno Querétaro utilizando motores recíprocos.

Tabla 4.7 Estimado de costos para el proyecto de aprovechamiento de energía en el Relleno Querétaro con motores recíprocos

Costo inicial (créditos)	unidad	cantidad	costo unitario	cantidad total	
Sistema de energía					
Motor recíproco	kW	3,165.00	USD 921	USD	2,916,079
Carga intermedia	kW	0.00		USD	-
Carga pico	kW	0.00		USD	-
Emergencia	kW	0.00		USD	-
Construcción de caminos	km			USD	-
Línea de transmisión	km			USD	-
Subestación	proyecto			USD	-
Eficiencia energética	proyecto			USD	-
Pretratamiento del gas	costo	1	USD 4,277,839	USD	4,277,839
Sub-total:				USD	7,193,918 58.3%
Balance y misceláneos					
Refacciones	%	30.0%	USD 7,193,918	USD	2,158,175
Transporte	proyecto	0	USD 7,193,918	USD	359,696
Entrenamiento y comisionamiento	p-d	100	USD 600	USD	60,000
Otros	costo	0	USD 7,193,918	USD	71,939
Contingencias	%	20.0%	USD 9,843,729	USD	1,968,746
Interés durante la construcción	8.80%	12 meses	USD 11,812,475	USD	519,749
Sub-total:				USD	5,138,305 41.7%
Costo inicial total				USD	12,332,223 100.0%
Costo anual (créditos)					
O&M					
Partes y labores	proyecto	616,611	USD 0.015	USD	9,249
Pretratamiento del gas	proyecto	1	USD 3,785	USD	3,785
Contingencias	%	8.0%	USD 13,035	USD	1,043
Sub-total:				USD	14,077

El programa utilizado permite incluir el costo de ciertas operaciones derivadas de la implementación de un sistema de aprovechamiento de energía, como son la construcción de caminos o la instalación de líneas de alta tensión. En este estudio esos costos no se consideran porque los sitios seleccionados ya cuentan con esos servicios.

4.5 Análisis financiero

Una vez estimados los costos de instalación y operación de un sistema de aprovechamiento energético es necesario llevar a cabo un análisis financiero para determinar la rentabilidad y factibilidad económica del proyecto.

De acuerdo con la LSPEE, en México la iniciativa privada puede invertir en proyectos de generación para fines distintos al servicio público; en este caso, los proyectos se consideran como proyectos de cogeneración o producción independiente, como se describe en la sección 3.2.3. Las condiciones para la cogeneración o venta de energía eléctrica a la CFE por permisionarios, se encuentran establecidas en el Reglamento de dicha Ley. Las condiciones de cada contrato son específicas en cuanto a volumen y tarifas de la energía entregada, y deben negociarse con la CFE.¹¹¹

De acuerdo con el Banco Mundial, en México los cogeneradores pueden asociarse con un consumidor del 80% de la energía producida, y vender el 20% restante a la CFE. Si el relleno es administrado por el municipio, un proyecto de aprovechamiento de biogás para generación de energía puede ser visto como un proyecto de cogeneración, y el municipio se ahorraría la compra de la energía que logre generar. Los municipios compran a la CFE energía a 120 USD/MWh, en promedio, para servicios como alumbrado público; y la CFE paga a los productores independientes entre 30 y 60 USD/MWh y cobra 1 a 1.5USD/MWh por acceso a la red de distribución.¹¹² Para el inversionista, es más rentable considerar la venta de energía dentro de la opción de cogeneración, que como productor independiente a la CFE, ya que en la primera puede cobrar más que los 60 USD/MWh que la CFE pagaría como máximo. Por otro lado, si consideramos un precio de 65 USD/MWh por la venta de energía eléctrica derivada de un proceso de cogeneración, el municipio puede ahorrar 55

¹¹¹ LSPEE, 1993; RLSPEE, 2001

¹¹² Banco Mundial, 2004

USD/MWh en la cuenta municipal de electricidad al asociarse con una parte productora, haciendo de este tipo de proyectos una opción atractiva.

En este trabajo se analiza la viabilidad financiera los proyectos de aprovechamiento energético del biogás desde la perspectiva del pequeño generador, suponiendo que se tenga la concesión para la administración de los rellenos sanitarios y un contrato de venta al municipio. Para el precio de venta de energía eléctrica por cogeneración, se consideró un valor de 65 USD/MWh.¹¹³

Para hacer el análisis completo es necesario conocer los parámetros financieros de México a la fecha, tabla 4.8.

Tabla 4.8 Parámetros financieros y tarifas de venta de energía eléctrica, ejemplo Relleno Querétaro

Parámetros financieros			
General			
Incremento en combustibles	%		1.5%
Inflación	%		6.0%
Tasa de descuento	%		15.0%
Vida del proyecto	yr		25
Finanzas			
Donativos	USD		
Porcentaje de deuda	%		70.0%
Deuda	USD		8,632,556
Capital	USD		3,699,667
Tasa de interés	%		8.80%
Plazo	yr		15
Pago de deuda	USD/yr		1,058,333
Impuestos por ingresos			
Impuesto empresarial	%		35.0%
Depreciación		lineal	
Porcentaje a depreciar			80%
Periodo		10 años	
Ingreso anual			
Energía exportada	MWh		25,369
Precio energía exportada	USD/MWh		65.00
Ganancia	USD		1,648,968
Incremento en precio de energía exportada	%		1.5%

¹¹³ Ecomethane, 2006

A partir de los datos anteriores, y conociendo los costos del equipo, se puede calcular el flujo de efectivo para los años de vida del proyecto, ver tablas 4.9 y 4.10.

Tabla 4.9 Resumen de costos iniciales y anuales

Resumen de costos e ingresos del proyecto			
Costo inicial			
Sistema de energía	58.3%	USD	7,193,918
Balance y varios	41.7%	USD	5,138,305
Costo total inicial	100.0%	USD	12,332,223
Costo anual y pagos de la deuda			
Operación y mantenimiento		USD	14,077
Pago del crédito (10 años)		USD	1,058,333
Costo total anual		USD	1,072,410
Costos periódicos (créditos)			
Definidos por el usuario - 25 años		USD	1,000
Clausura		USD	1,000
Ahorro anual e ingresos			
Costo de combustible (caso base)		USD	0
Ingreso por exportación de energía a la red		USD	1,648,968
			0
Ahorro anual e ingresos totales		USD	1,648,968

Tabla 4.10 Flujo de caja anual para el proyecto de aprovechamiento energético en el Relleno Querétaro

Flujo de caja anual			
Año	Antes de Impuestos	Después de Impuestos	Acumulado
#	USD	USD	USD
0	-3,699,667	-3,699,667	-3,699,667
1	600,448	600,448	-3,099,219
2	624,658	624,658	-2,474,562
3	649,191	643,535	-1,831,027
4	674,049	648,804	-1,182,223
5	699,235	653,327	-528,896
6	724,751	657,022	128,127
7	750,599	659,799	787,926
8	776,780	661,558	1,449,484
9	803,297	662,193	2,111,677
10	830,151	661,586	2,773,263
11	857,344	314,307	3,087,571
12	884,877	310,823	3,398,393
13	912,750	305,678	3,704,071
14	940,965	298,708	4,002,779
15	969,523	289,733	4,292,512
16	2,056,755	1,336,891	5,629,403
17	2,085,998	1,355,898	6,985,302
18	2,115,582	1,375,128	8,360,430
19	2,145,507	1,394,580	9,755,010
20	2,175,773	1,414,253	11,169,262
21	2,206,378	1,434,146	12,603,408
22	2,237,320	1,454,258	14,057,666
23	2,268,597	1,474,588	15,532,255
24	2,300,207	1,495,134	17,027,389
25	2,323,561	1,510,315	18,537,704

El valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR) permiten determinar la viabilidad financiera de un proyecto. En este caso, se desea que el VPN sea siempre positivo y que la TIR sea lo más alta posible. También es deseable que el tiempo de recuperación de la inversión no sea mayor a 5 ó 6 años, y que la relación costo beneficio sea mayor a 1. En el ejemplo que se muestra en esta sección, se puede observar que se cumplen todos estos requisitos, por lo que además de presentar un bien a la sociedad, la implementación del proyecto es económicamente exitosa. La tabla 4.11 muestra un resumen de las definiciones de los términos financieros utilizados.

Tabla 4.11 Significado de términos financieros como criterios de viabilidad financiera¹¹⁴

Términos financieros				
Término	Significado	Consideraciones	Criterio	Comentarios
Recuperación Simple	Número de años para recuperar los costos adicionales con los ahorros anuales; es el tiempo que se necesita para poder recuperar el dinero que se invirtió inicialmente en un negocio o proyecto	Considera los flujos de efectivo sin tomar en cuenta el valor del dinero en el tiempo	tiempo de repago < tiempo de vida del proyecto	Engañoso, ignora flujos de caja de financiamiento y de largo plazo
Recuperación de Capital	Número de años en que el ingreso que se obtienen restituye los gastos realizados en las inversiones de capital; los rendimientos que generan las inversiones de una entidad, los cuales pueden ser intereses, utilidades y precios mayores.	Utiliza los flujos de efectivo tomando en cuenta el valor del dinero en el tiempo	tiempo de repago < tiempo máximo definido	Permite calcular el valor de la renta (R) o pago de una serie compuesta de rentas uniformes equivalentes en el tiempo
Valor Presente Neto (VPN)	Valor total del proyecto en dls en el presente, determina cuál es la variación en riqueza en términos presentes que genera el proyecto, con respecto a la alternativa que renta la tasa de descuento utilizada	Consiste en actualizar al momento cero (hoy), todos los flujos netos de caja generados por el proyecto	Valor positivo indica que el proyecto es rentable	Buena estimación, el usuario debe especificar la tasa de descuento
Tasa Interna de Retorno (TIR)	Rendimiento de la inversión durante la vida útil del proyecto; sirve para identificar claramente el tiempo en que recuperaremos el capital asignado a una inversión	Es necesario establecer los gastos para cada uno de los periodos establecidos en el proyecto, a fin de considerar sólo los beneficios netos en cada periodo.	TIR > tasa mínima aceptable	Puede engañar cuando el flujo va de positivo - negativo - positivo
Relación Costo Beneficio	Toma los ingresos y egresos presentes netos del estado de resultados, para determinar cuáles son los beneficios por cada peso que se sacrifica en el proyecto	El estado de flujo neto de efectivo es la herramienta que suministra los datos necesarios para el cálculo de este indicador	Conveniente en la medida en que su RCB es > 1	Se deben tomar los precios reales en lugar de los precios de mercado

A partir del resumen de costos y del flujo de caja anual, se pueden obtener los datos que se muestran en la tabla 4.12 y determinar la viabilidad financiera del proyecto.

Tabla 4.12 Análisis de viabilidad financiera para el proyecto en el Relleno Querétaro

Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	20.7%
TIR antes de impuestos - bienes	%	7.0%
TIR después de impuestos - capital	%	17.4%
TIR después de impuestos - bienes	%	4.1%
Recuperación simple	yr	7.5
Recuperación de capital	yr	5.8
Valor presente neto (VPN)	USD	632,106
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	97,786
Relación Costo-Beneficio		1.17

¹¹⁴ Westerfield, et.al., 2006

A partir del flujo de caja anual acumulado se construye la gráfica 4.6.



Gráfica 4.6 Flujo de capital acumulado para el proyecto de aprovechamiento energético del biogás con motor recíproco, en el Relleno Querétaro

Esta gráfica muestra cómo un proyecto de aprovechamiento de energía en un relleno sanitario es rentable a largo plazo. Puede significar ahorros importantes al municipio donde se construya, proporcionando recursos suficientes para otras actividades de administración pública importantes, sin incluir los beneficios ambientales, a la salud y a la imagen de la región.

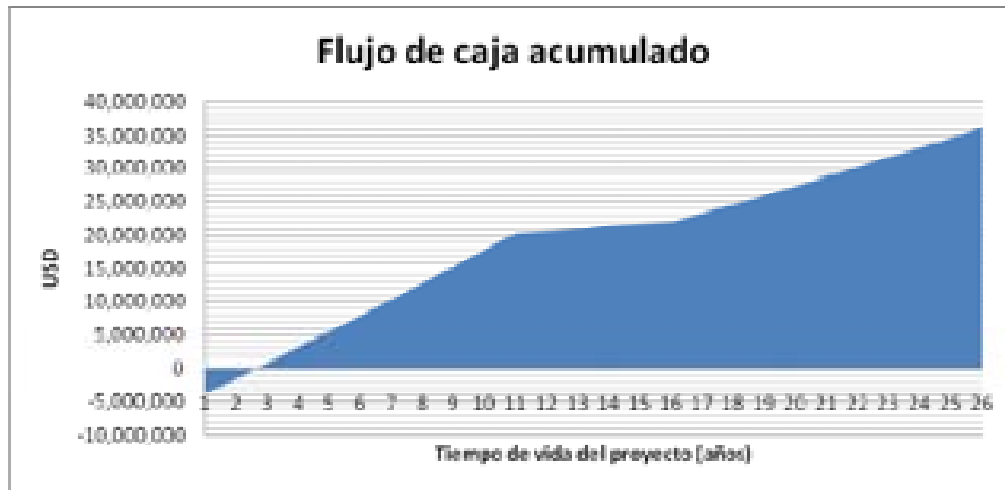
En caso de que un proyecto no fuera rentable por la simple venta de energía eléctrica, también puede considerarse la venta de bonos de carbono, que aunque implica un costo anual ligeramente mayor, por cuestiones de monitoreo y certificación, también representa mayores ingresos. La posibilidad de venta de bonos de carbono depende de la concesión obtenida, los permisos para la venta de certificaciones tienen una duración de entre 7 y 15 años.

El precio de los bonos de carbono oscila entre los 14 y 17 euro /tCO₂e (17 a 20 USD/tCO₂e, noviembre de 2008)¹¹⁵, pero como es un mercado nuevo y volátil, para hacer el análisis se consideró un precio de 17USD/tCO₂e y que dicho precio tendrá un crecimiento de 1.5%, como se muestra en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Factores de ingreso por venta de bonos de carbono

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO ₂ /año		146785.0
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO ₂		3669624.9
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO ₂	\$	17.00
Ingreso por reducción de GEI	USD	\$	2,495,344.94
Duración del proyecto de reducción	año		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO ₂		1467850.0
Tasa de aumento del valor de bonos de carbono			1.5%

La gráfica 4.7 muestra los ingresos que tendría el proyecto si se inscribiera como mecanismo de desarrollo limpio.



Gráfica 4.7 Flujo de capital acumulado para el proyecto de aprovechamiento energético del biogás como MDL con motor recíproco, en el Relleno Querétaro.

¹¹⁵ Roine, et.al., 2008

4.6 Impacto ambiental

El impacto en la reducción de emisiones de GEI al quemar el biogás emitido en un relleno (21CO₂:1CH₄ al absorber radiación) puede entenderse más fácilmente traduciéndolo a la reducción en el uso de combustibles fósiles derivado de otras actividades. La tabla 4.14 muestra el ejemplo de la quema del biogás emitido en el relleno de Querétaro.

Tabla 4.14 Equivalencias en la reducción de emisiones

Equivalencia de la reducción de emisiones					
Reducción neta anual de GEI (con motor)	146,785	tCO ₂	equivalente a	29,841.4	Camión y camiones no utilizados
				304,784.4	Bariles de petróleo no consumido
Reducción neta anual de GEI (con turbina)	145,939	tCO ₂	equivalente a	29,668	Camión y camiones no utilizados
				303,009	Bariles de petróleo no consumido

Para determinar los mejores escenarios para la implementación de proyectos de aprovechamiento de biogás, el proceso anterior se siguió para todos los rellenos seleccionados, variando la tecnología a utilizar, el tiempo de vida de los proyectos, contemplando la opción de venta de bonos de carbono, pero manteniendo constantes los factores financieros (inflación, tasas de interés, etc.). En la sección de resultados se muestran los valores obtenidos para cada uno de los ensayos.

5. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados de la simulación de aprovechamiento energético de biogás en los rellenos sanitarios seleccionados.

5.1 Costos de equipo e instalación para sistemas de extracción y acondicionamiento del biogás

Para la selección del sistema de extracción se consideró la profundidad y extensión del relleno sanitario, así como índice de lluvia, de acuerdo con los criterios definidos en la tabla 4.4. Para el pretratamiento del biogás se seleccionaron tecnologías recomendadas, disponibles en el mercado y que son mencionadas en proyectos similares.¹¹⁶

Tabla 5.1 Selección del sistema de extracción y remoción de contaminantes

Selección del sistema de extracción y pretratamiento											
Relleno	Extractores Horizontales	Extractores de Superficie	Pozos Verticales	Pozos Verticales de profundidad múltiple	Geomembrana inferior	Geomembrana superior	Sellos para pozos	Quemador	Soplador	Sistema de Acondicionamiento del Gas	
Nuevo Laredo	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sulfu-Rite®
Mérida	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sulfu-Rite®
Querétaro	Sí	No	No	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sulfu-Rite®
Picachos	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sulfu-Rite®
El Verde	No	No	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sulfu-Rite®
Bordo Poniente	No	No	Sí	No	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	LO-CAT®

Tabla 5.2 Estimado de costos de equipos de extracción y acondicionamiento del biogás

Relleno	Biogás generado (m3/año)	Volumen de H2S (m3/año)	Costo de equipos e instalación (USD)									
			Extractores Horizontales	Extractores de Superficie	Pozos Verticales	Pozos Verticales con profundidad múltiple	Geomembrana	Sellos para pozos	Quemador	Soplador	Sistema de Acondicionamiento del Gas	
Nuevo Laredo	7,738,691	154,774	2,110,687		1,257,820			2,420,000	487,500	80,000	15,000	45,000
Mérida	23,157,725	463,155		579,734	880,925			4,180,000	421,500	80,000	25,000	45,000
Querétaro	20,354,935	407,099	1,878,297		926,850			2,200,000	442,500	80,000	20,000	45,000
Picachos	21,563,878	431,278		249,273		996,400		1,870,000	187,500	80,000	20,000	45,000
El Verde	36,436,103	728,722		936,606	1,390,275			3,300,000	664,500	80,000	35,000	45,000
Bordo Poniente	180,532,408	7,221,296		11,773,869	12,289,700			41,250,000	8,320,500	300,000	50,000	1,000,000

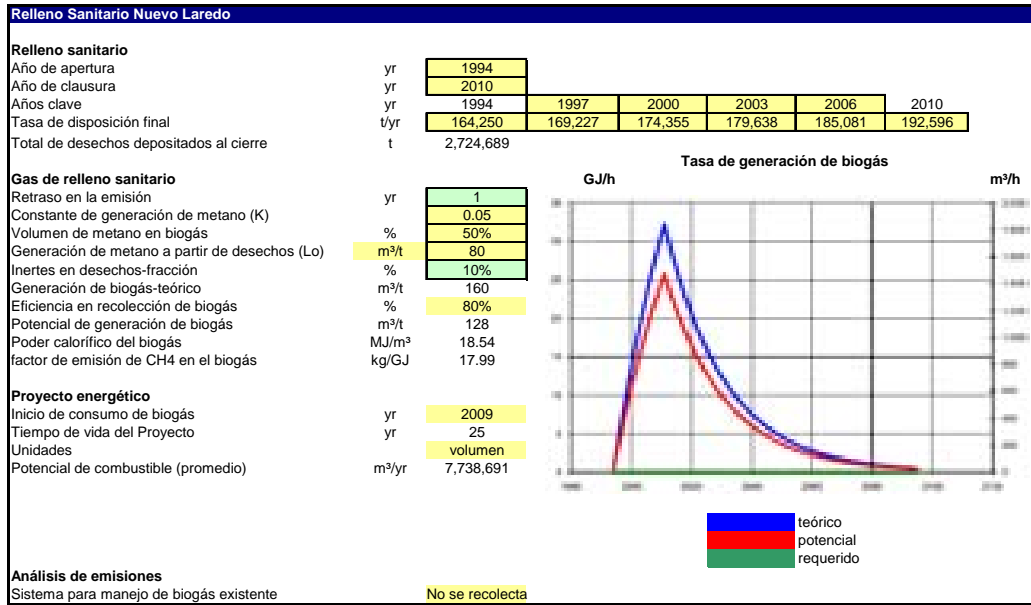
Tabla 5.3 Costos totales de los sistemas de extracción y pretratamiento para cada relleno sanitario

Costo total del acondicionamiento del sitio y biogás		
Relleno	Costo Total Inicial (USD)	Costo de Operación (USD/año)
Nuevo Laredo	4,939,000	1,439
Mérida	6,212,000	4,307
Querétaro	4,278,000	3,785
Picachos	3,448,000	4,010
El Verde	6,451,000	6,776
Bordo Poniente	74,984,000	2,243

¹¹⁶ EAUk, 2002; Kidnay y Parrish, 2006; Arnold y Stewart, 1999

5.2 Resultados de las simulaciones para cada relleno sanitario

5.2.1 Relleno Nuevo Laredo



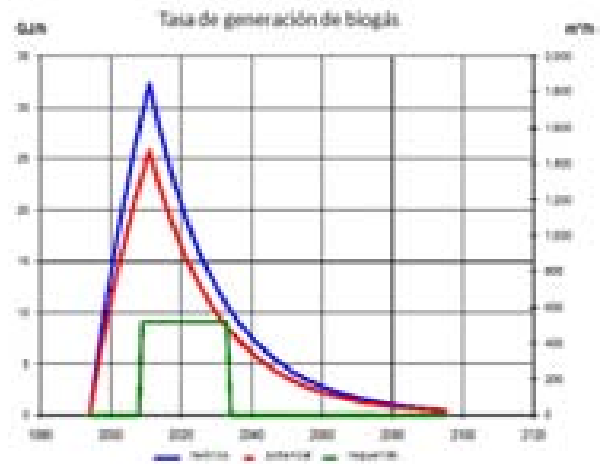
5.2.1.1 Impacto ambiental

Equivalencia de la reducción de emisiones					
Reducción neta anual de GEI (con motor)	58,644	tCO2	equivalente a	11,922.3	Carros y camiones no utilizados
				121,768.4	Barriles de petróleo no consumido
Reducción neta anual de GEI (con turbina)	57,516	tCO2	equivalente a	11,693.0	Carros y camiones no utilizados
				119,426.2	Barriles de petróleo no consumido

5.2.1.2 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 25 años

Costo inicial (créditos)	unidad	cantidad	costo unitario	cantidad total	
Sistema de energía					
Motor recíproco	kW	1,005.00	USD 886	USD	890,810
Carga intermedia	kW			USD	-
Carga pico	kW			USD	-
Emergencia	kW			USD	-
Construcción de caminos	km			USD	-
Línea de transmisión	km			USD	-
Subestación	proyecto			USD	-
Eficiencia energética	proyecto			USD	-
Pretratamiento del gas					
	cost	1	USD 4,938,526	USD	4,938,526
Sub-total:				USD	5,829,336 58.3%
Balance y miscelaneos					
Refacciones	%	30.0%	USD 5,829,336	USD	1,748,801
Transporte	proyecto	5%	USD 5,829,336	USD	291,467
Entrenamiento y comisionamiento	p-d	100	USD 600	USD	60,000
Otros	costo	1%	USD 5,829,336	USD	58,293
Contingencias	%	20.0%	USD 7,987,897	USD	1,597,579
Interés durante la construcción	8.80%	12 meses	USD 9,585,477	USD	421,761
Sub-total:				USD	4,177,902 41.7%
Costo inicial total				USD	10,007,238 100.0%
Costo anual (créditos)					
O&M					
partes y labores	proyecto	500,362	USD 0.015	USD	7,505
Pretratamiento del gas	proyecto	1	1,439	\$	1,439
Contingencias	%	8.8%	\$ 8,945	\$	787
Sub-total:				\$	9,732

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Motor reciproco		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor reciproco			
Capacidad	kW	1,005	
Electricidad exportada	MWh	8,055	
Fabricante	GE		
Modelo	JMS 208 GS-B.L		
Tasa de Calor	kJ/kWh	9,494	3 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	10.0	

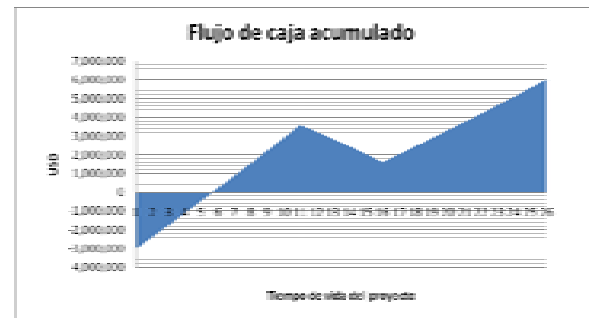
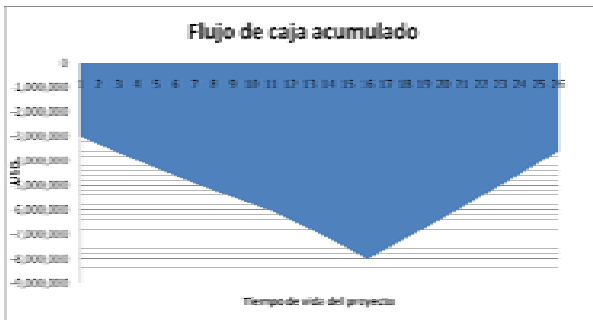


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	8,055	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	523,606	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		58644.1
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		1466103.6
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	996,950.46
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		586441.4457
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	-0.4%
TIR antes de impuestos - bienes	%	-4.0%
TIR después de impuestos - capital	%	-3.9%
TIR después de impuestos - bienes	%	-6.9%
Recuperación simple	yr	19.5
Recuperación de capital	yr	> proyecto
Valor presente neto (VPN)	USD	-4,623,734
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	-715,289
Relación Costo-Beneficio		-0.54

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono		
TIR antes de impuestos - capital	%	21.5%
TIR antes de impuestos - bienes	%	2.5%
TIR después de impuestos - capital	%	16.8%
TIR después de impuestos - bienes	%	-0.9%
Recuperación simple	yr	6.6
Recuperación de capital	yr	4.6
Valor presente neto (VPN)	USD	223,212
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	34,531
Relación Costo-Beneficio		1.07



5.2.1.3 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 15 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Motor recíproco		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	1,675	
Electricidad exportada	MWh	13,426	
Fabricante	GE		
Modelo	JMS 312 GS-B.L - 633kW		
Tasa de Calor	kJ/kWh	9,940	5 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	16.6	

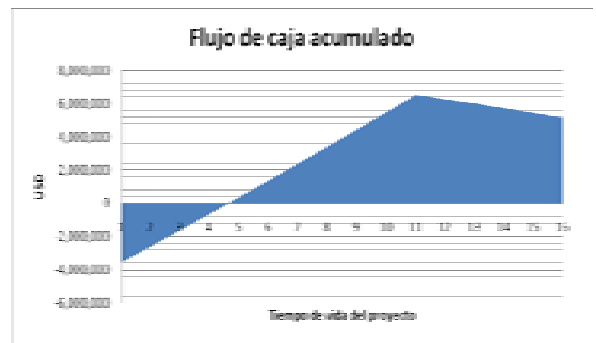
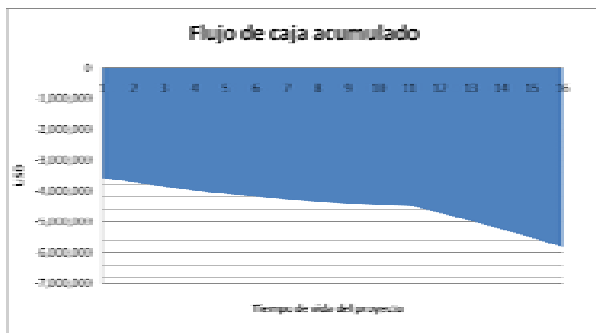


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	13,426	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	872,677	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr	73778.4	
Reducción neta de GEI en 25 años	ICO2	1106675.5	
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$ 17.00	
ingreso por reducción de GEI	USD	\$ 1,254,232.22	
duración de proyecto de reducción	yr	10	
Reducción de GEI en 10 años	tCO2	737783.7	
tasa de aumento de valor de bonos de carbono		1.5%	

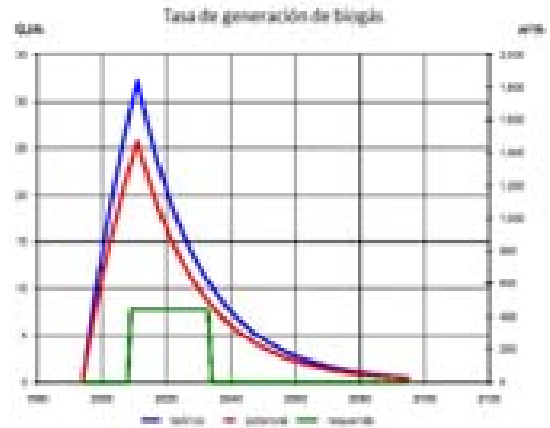
Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	negativo
TIR antes de impuestos - bienes	%	negativo
TIR después de impuestos - capital	%	negativo
TIR después de impuestos - bienes	%	negativo
Recuperación simple	yr	13.8
Recuperación de capital	yr	> proyecto
Valor presente neto (VPN)	USD	-4,317,628
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	-738,388
Relación Costo-Beneficio		-0.21

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono		
TIR antes de impuestos - capital	%	31.6%
TIR antes de impuestos - bienes	%	1.3%
TIR después de impuestos - capital	%	24.0%
TIR después de impuestos - bienes	%	-7.0%
Recuperación simple	yr	5.6
Recuperación de capital	yr	3.6
Valor presente neto (VPN)	USD	1,217,476
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	208,209
Relación Costo-Beneficio		1.34



5.2.1.4 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 25 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Turbina de gas		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	750	
Electricidad exportada	MWh	6,012	
Fabricante	Ingersoll-Rand		
Modelo	MT250		
Tasa de calor	kJ/kWh	11,289	3 unidades
Combustible necesario	GJ/h	8.5	

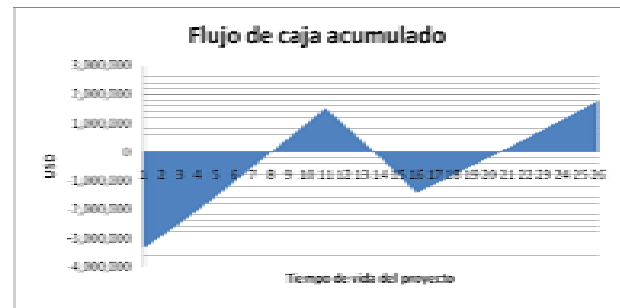
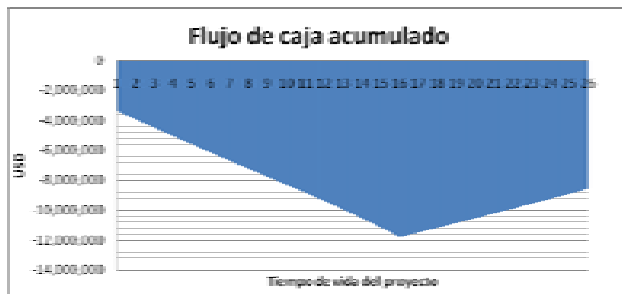


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	6,012	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	390,751	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr	57516.0	
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2	1437900.0	
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$ 17.00	
Ingreso por reducción de GEI	USD	\$ 977,771.98	
duración de proyecto de reducción	yr	10	
Reducción de GEI en 10 años	tCO2	575160.0	
tasa de aumento de valor de bonos de carbono		1.5%	

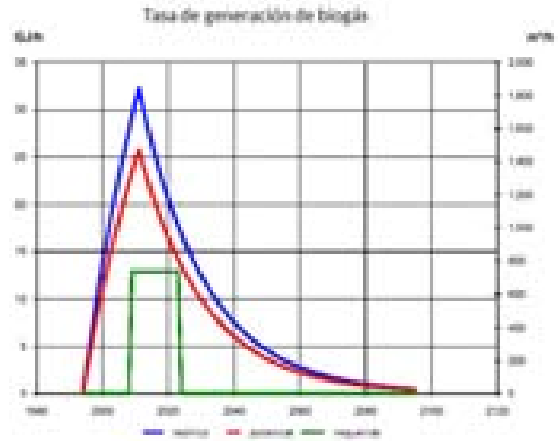
Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	-5.5%
TIR antes de impuestos - bienes	%	-7.8%
TIR después de impuestos - capital	%	-8.9%
TIR después de impuestos - bienes	%	-10.7%
Recuperación simple	yr	29.3
Recuperación de capital	yr	> proyecto
Valor presente neto (VPN)	USD	-6,402,391
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	-990,446
Relación Costo-Beneficio		-0.92

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono		
TIR antes de impuestos - capital	%	8.6%
TIR antes de impuestos - bienes	%	-2.7%
TIR después de impuestos - capital	%	5.0%
TIR después de impuestos - bienes	%	-5.6%
Recuperación simple	yr	8.2
Recuperación de capital	yr	7.0
Valor presente neto (VPN)	USD	-1,247,836
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	-193,039
Relación Costo-Beneficio		0.63



5.2.1.5 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 15 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Turbina de gas		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	1,250	
Electricidad exportada	MWh	10,019	
Fabricante	Ingersoll-Rand		
Modelo	MT250		
Tasa de Calor	kJ/kWh	11,289	5 unidades
Combustible necesario	GJ/h	14.1	

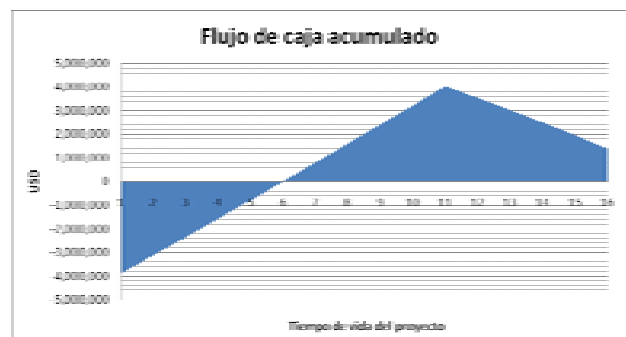
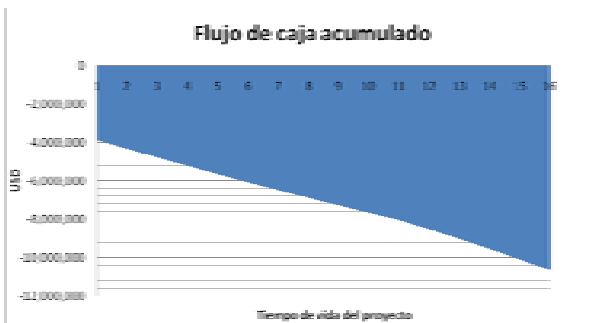


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	10,019	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	651,251	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

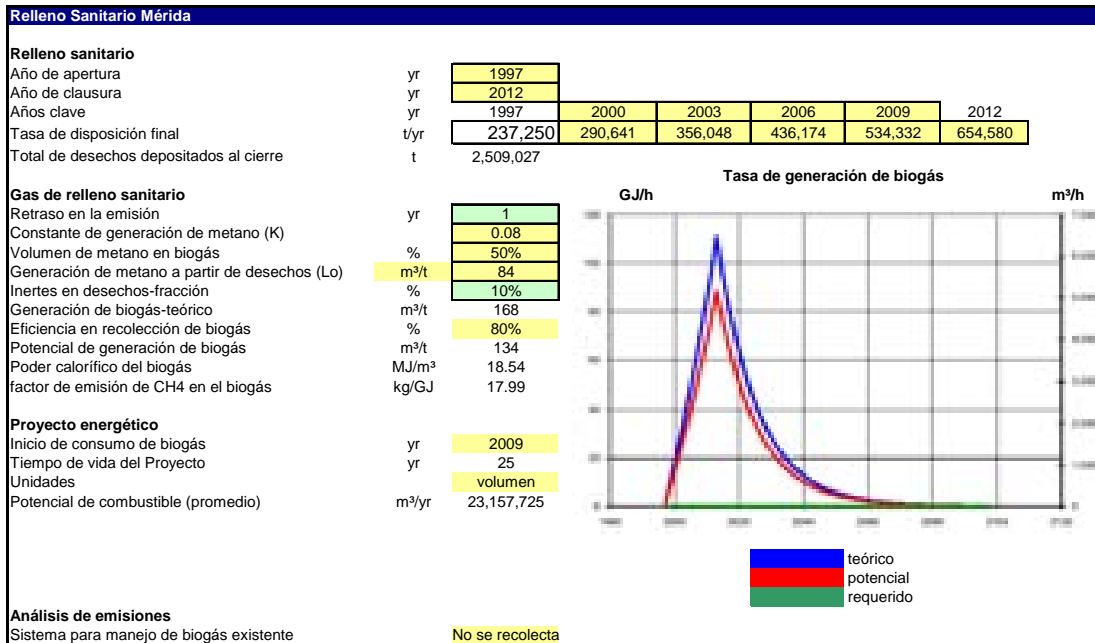
Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		71898.1
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		1078471.9
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	1,222,268.10
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		718981.2
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%		negativo
TIR antes de impuestos - bienes	%		negativo
TIR después de impuestos - capital	%		negativo
TIR después de impuestos - bienes	%		negativo
Recuperación simple	yr		20.2
Recuperación de capital	yr		> proyecto
Valor presente neto (VPN)	USD		-6,448,868
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		-1,102,866
Relación Costo-Beneficio			-0.67

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%		16.8%
TIR antes de impuestos - bienes	%		negativo
TIR después de impuestos - capital	%		-10.7%
TIR después de impuestos - bienes	%		negativo
Recuperación simple	yr		6.9
Recuperación de capital	yr		5.0
Valor presente neto (VPN)	USD		-375,405
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		-64,201
Relación Costo-Beneficio			0.90



5.2.2 Relleno Mérida



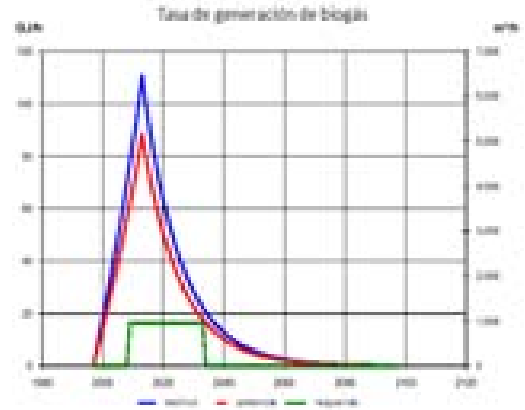
5.2.2.1 Impacto ambiental

Equivalencia de la reducción de emisiones					
Reducción neta anual de GEI (con motor)	167,305	tCO2	equivalente a	46,356.7	Carros y camiones no utilizados
				347,392.1	Barriles de petróleo no consumido
Reducción neta anual de GEI (con turbina)	161,390	tCO2	equivalente a	32,810.6	Carros y camiones no utilizados
				335,110.2	Barriles de petróleo no consumido

5.2.2.2 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 25 años

Costo inicial (créditos)	unidad	cantidad	costo unitario	cantidad total
Sistema de energía				
Motor recíproco	kW	1,899.00	USD 1,244	USD 2,362,024
Carga intermedia	kW			USD -
Carga pico	kW			USD -
Emergencia	kW			USD -
Construcción de caminos	km			USD -
Línea de transmisión	km			USD -
Subestación	proyecto			USD -
Eficiencia energética	proyecto			USD -
Pretratamiento del gas				USD -
Sub-total:	costo	1	USD 6,212,159	USD 6,212,159
Balance y miscelaneos				
Refacciones	%	30.0%	USD 8,574,183	USD 2,572,255
Transporte	proyecto	5.0%	USD 8,574,183	USD 428,709
Entrenamiento y comisionamiento	p-d	100	USD 600	USD 60,000
Otros	costo	1.0%	USD 8,574,183	USD 85,742
Contingencias	%	20.0%	USD 11,720,888	USD 2,344,178
Interés durante la construcción	8.80%	12 meses	USD 14,065,066	USD 618,863
Sub-total:				USD 6,109,746 41.6%
Costo inicial total				USD 14,683,929 100.0%
Costo anual (créditos)				
O&M				
Partes y labores	proyecto	0	USD 15,320	USD 1,532
Pretratamiento del gas	proyecto			USD 16,851
Contingencias	%	8.0%	USD 14,127	USD 1,130
Sub-total:				USD 15,257

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Motor recíproco		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	1,899	
Electricidad exportada	MWh	15,221	
Fabricante	GE		
Modelo	JMS 312 GS-B.L - 633kW		
Tasa de Calor	kJ/kWh	9,464	3 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	18.0	

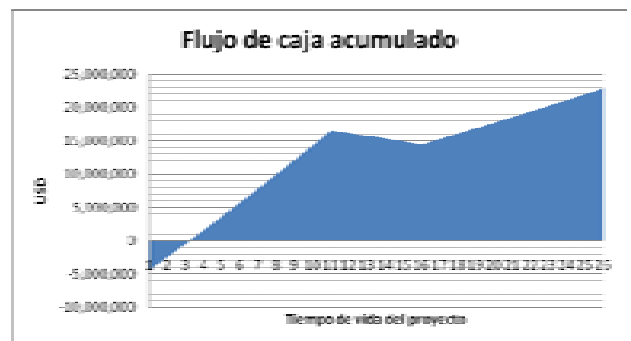


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	15,221	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	989,381	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		167304.8
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		4182619.2
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	2,844,181.06
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		1673047.7
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

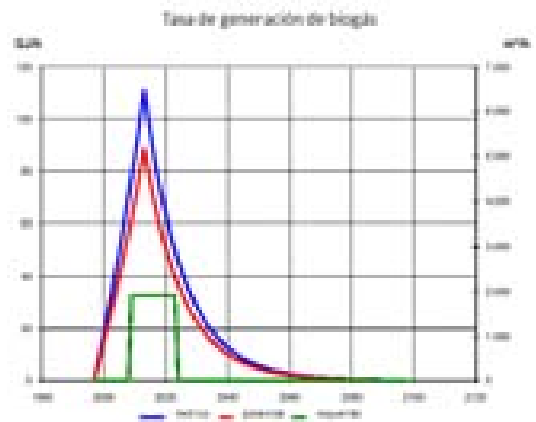
Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%		3.4%
TIR antes de impuestos - bienes	%		-1.5%
TIR después de impuestos - capital	%		-0.1%
TIR después de impuestos - bienes	%		-4.3%
Recuperación simple	yr		15.1
Recuperación de capital	yr		> project
Valor presente neto (VPN)	USD		-5,359,832
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		-829,163
Relación Costo-Beneficio			-0.22

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%		60.9%
TIR antes de impuestos - bienes	%		15.2%
TIR después de impuestos - capital	%		45.0%
TIR después de impuestos - bienes	%		8.3%
Recuperación simple	yr		3.8
Recuperación de capital	yr		2.2
Valor presente neto (VPN)	USD		6,157,336
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		952,536
Relación Costo-Beneficio			2.40



5.2.2.3 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 15 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Motor recíproco		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	3,798	
Electricidad exportada	MWh	30,442	
Fabricante	GE		
Modelo	JMS 312 GS-B.L - 633kW		
Tasa de Calor	kJ/kWh	9,464	6 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	35.9	

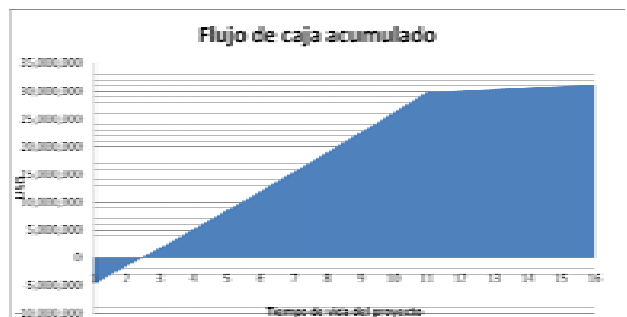
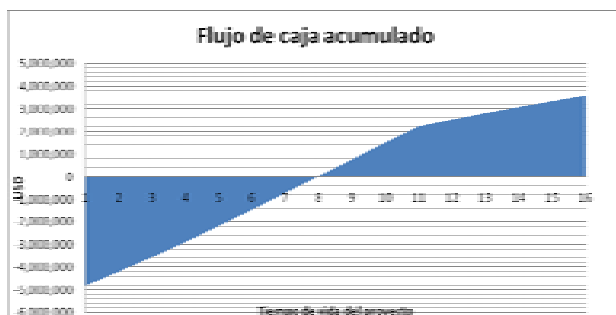


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	30,442	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	1,978,762	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr	228020.8	
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2	3420312.0	
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$ 17.00	
Ingreso por reducción de GEI	USD	\$ 3,876,353.58	
duración de proyecto de reducción	yr	10	
Reducción de GEI en 10 años	tCO2	2280208.0	
tasa de aumento de valor de bonos de carbono		1.5%	

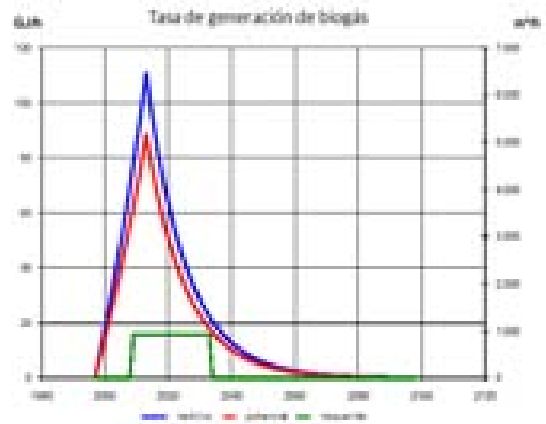
Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%	13.4%	
TIR antes de impuestos - bienes	%	-2.8%	
TIR después de impuestos - capital	%	9.4%	
TIR después de impuestos - bienes	%	-8.3%	
Recuperación simple	yr	8.2	
Recuperación de capital	yr	7.0	
Valor presente neto (VPN)	USD	-1,124,354	
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	-192,284	
Relación Costo-Beneficio		0.77	

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%	96.4%	
TIR antes de impuestos - bienes	%	27.7%	
TIR después de impuestos - capital	%	69.0%	
TIR después de impuestos - bienes	%	17.1%	
Recuperación simple	yr	2.7	
Recuperación de capital	yr	1.5	
Valor presente neto (VPN)	USD	12,578,734	
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	2,151,178	
Relación Costo-Beneficio		3.62	



5.2.2.4 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 25 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Turbina de gas		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	1,050	
Electricidad exportada	MWh	8,416	
Fabricante	Honeywell		
Modelo	ASE8		
Tasa de Calor	kJ/kWh	16,517	2 unidades
Combustible necesario	GJ/h	17.3	

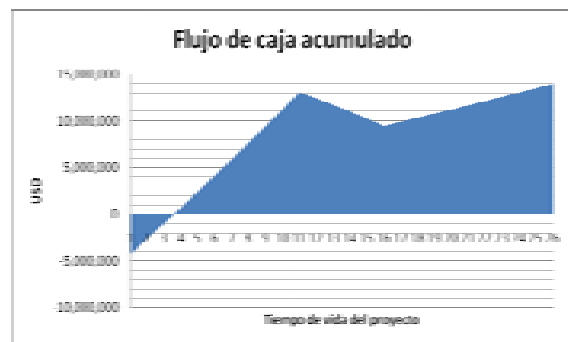
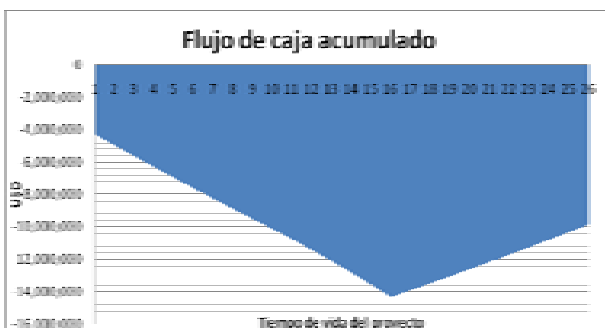


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	8,416	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	547,051	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		161390.4
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		4034760.7
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	2,743,637.25
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		1613904.3
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

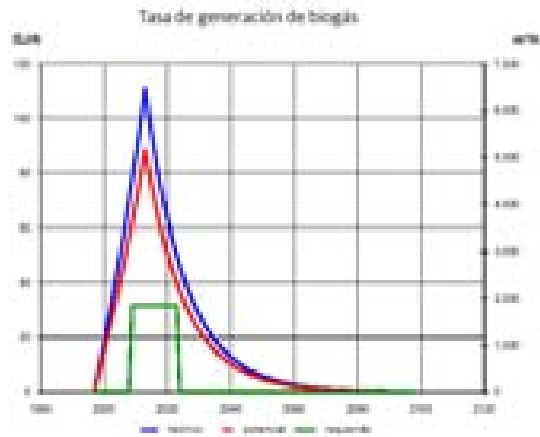
Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%		-4.5%
TIR antes de impuestos - bienes	%		-7.0%
TIR después de impuestos - capital	%		-8.0%
TIR después de impuestos - bienes	%		-9.9%
Recuperación simple	yr		26.8
Recuperación de capital	yr		> project
Valor presente neto (VPN)	USD		-7,867,555
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		-1,217,106
Relación Costo-Beneficio			-0.85

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%		50.5%
TIR antes de impuestos - bienes	%		10.0%
TIR después de impuestos - capital	%		37.6%
TIR después de impuestos - bienes	%		3.6%
Recuperación simple	yr		4.3
Recuperación de capital	yr		2.6
Valor presente neto (VPN)	USD		4,015,654
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		621,219
Relación Costo-Beneficio			1.94



5.2.2.5 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 15 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Turbina de gas		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	2,100	
Electricidad exportada	MWh	16,832	
Fabricante	Honeywell		
Modelo	ASE6		
Tasa de Calor	kJ/kWh	16,517	
Combustible necesario	GJ/h	34.7	

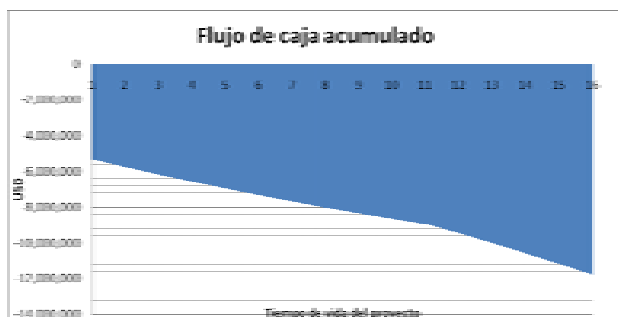


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	16,832	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	1,094,102	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

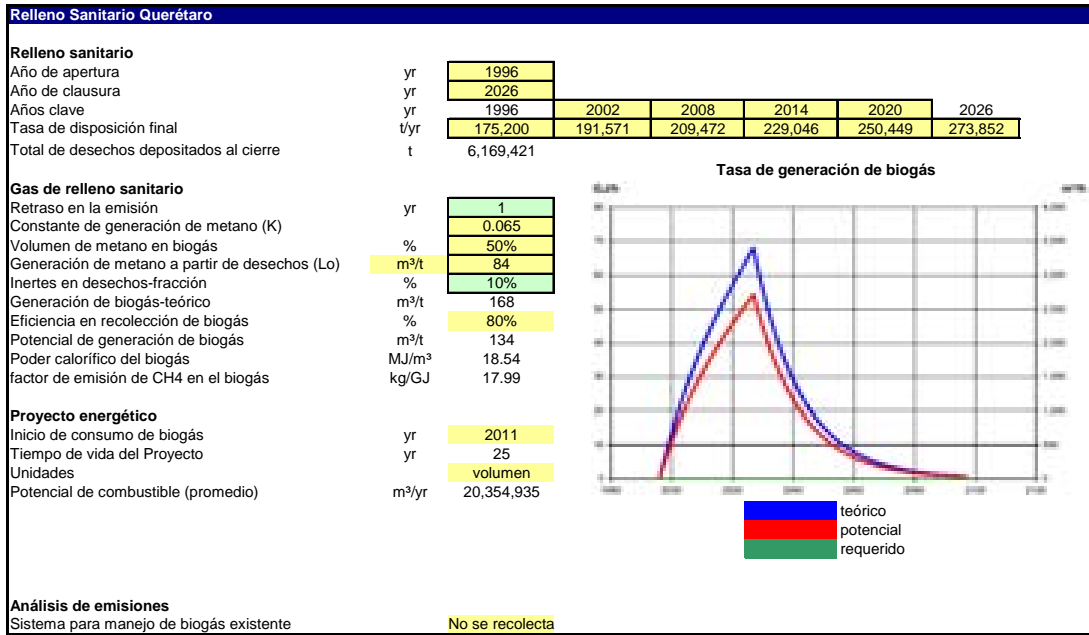
Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr	216192.1	
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2	3242881.7	
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$ 17.00	
ingreso por reducción de GEI	USD	\$ 3,675,265.97	
duración de proyecto de reducción	yr	10	
Reducción de GEI en 10 años	tCO2	2161921.2	
tasa de aumento de valor de bonos de carbono		1.5%	

Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	negative
TIR antes de impuestos - bienes	%	negative
TIR después de impuestos - capital	%	negative
TIR después de impuestos - bienes	%	negative
Recuperación simple	yr	16.5
Recuperación de capital	yr	> project
Valor presente neto (VPN)	USD	-7,693,878
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	-1,315,784
Relación Costo-Beneficio		-0.45

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono		
TIR antes de impuestos - capital	%	63.5%
TIR antes de impuestos - bienes	%	14.8%
TIR después de impuestos - capital	%	46.7%
TIR después de impuestos - bienes	%	6.2%
Recuperación simple	yr	3.7
Recuperación de capital	yr	2.1
Valor presente neto (VPN)	USD	7,242,231
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	1,238,545
Relación Costo-Beneficio		2.36



5.2.3 Relleno Querétaro



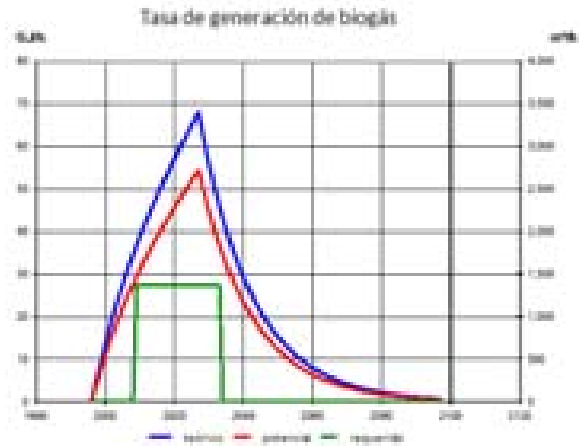
5.2.3.1 Impacto ambiental

Equivalencia de la reducción de emisiones				
Reducción neta anual de GEI (con motor)	146,785	tCO ₂	equivalente a	29,841.4 Carros y camiones no utilizados
				304,784.4 Barriles de petróleo no consumido
Reducción neta anual de GEI (con turbina)	145,930	tCO ₂	equivalente a	29,668 Carros y camiones no utilizados
				303,009 Barriles de petróleo no consumido

5.2.3.2 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 25 años

Costo inicial (créditos)	unidad	cantidad	costo unitario	cantidad total
Sistema de energía				
Motor recíproco	kW	3,165.00	USD 921	USD 2,916,079
Carga intermedia	kW	0.00		USD -
Carga pico	kW	0.00		USD -
Emergencia	kW	0.00		USD -
Construcción de caminos	km			USD -
Línea de transmisión	km			USD -
Subestación	proyecto			USD -
Eficiencia energética	proyecto			USD -
Pretratamiento del gas	costo	1	USD 4,277,839	USD 4,277,839
Sub-total:				USD 7,193,918 58.3%
Balance y misceláneos				
Refacciones	%	30.0%	USD 7,193,918	USD 2,158,175
Transporte	proyecto	0	USD 7,193,918	USD 359,696
Entrenamiento y comisionamiento	p-d	100	USD 600	USD 60,000
Otros	costo	0	USD 7,193,918	USD 71,939
Contingencias	%	20.0%	USD 9,843,729	USD 1,968,746
Interés durante la construcción	8.80%	12 meses	USD 11,812,475	USD 519,749
Sub-total:				USD 5,138,305 41.7%
Costo inicial total				USD 12,332,223 100.0%
Costo anual (créditos)				
O&M				
Partes y labores	proyecto	616,611	USD 0.015	USD 9,249
Pretratamiento del gas	proyecto	1	USD 3,785	USD 3,785
Contingencias	%	8.0%	USD 13,035	USD 1,043
Sub-total:				USD 14,077

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Motor reciproco		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencilla (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor reciproco			
Capacidad	kW	3,165	
Electricidad exportada	MWh	25,369	
Fabricante	GE		
Modelo	JMS 312 GS-B.L - 633kW		
Tasa de Calor	kJ/kWh	9,494	5 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	30.0	

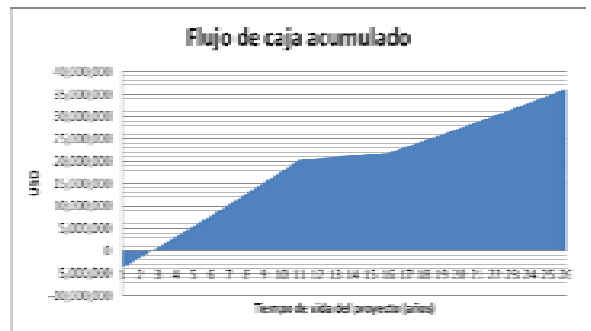


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	25,369	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	1,648,968	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		146785.0
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		3669624.9
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	2,495,344.94
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		1467850.0
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

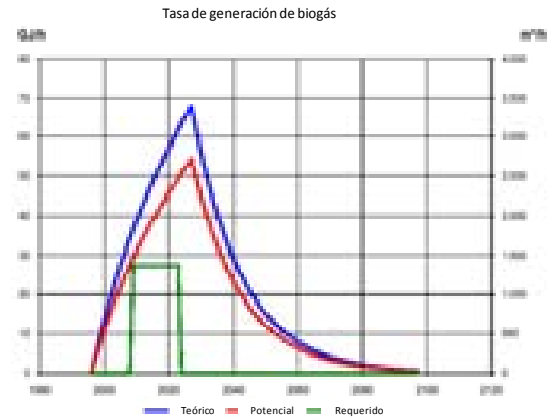
Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	20.7%
TIR antes de impuestos - bienes	%	7.0%
TIR después de impuestos - capital	%	17.4%
TIR después de impuestos - bienes	%	4.1%
Recuperación simple	yr	7.5
Recuperación de capital	yr	5.8
Valor presente neto (VPN)	USD	632,106
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	97,786
Relación Costo-Beneficio		1.17

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%		86.5%
TIR antes de impuestos - bienes	%		25.1%
TIR después de impuestos - capital	%		62.4%
TIR después de impuestos - bienes	%		16.2%
Recuperación simple	yr		3.0
Recuperación de capital	yr		1.6
Valor presente neto (VPN)	USD		9,365,043
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		1,448,766
Relación Costo-Beneficio			3.53



5.2.3.3 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 15 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Motor recíproco		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	3,165	
Electricidad exportada	MWh	25,369	
Fabricante	GE		
Modelo	JMS 312 GS-B.L. - 633kW		
Tasa de Calor	kJ/kWh	9,494	5 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	30.0	

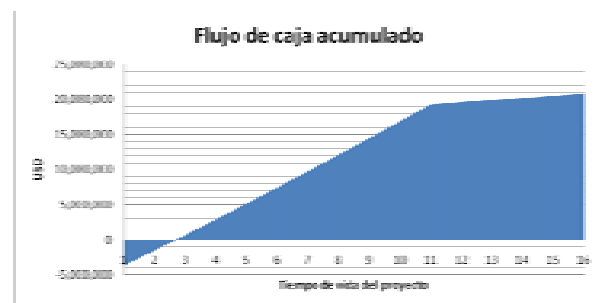
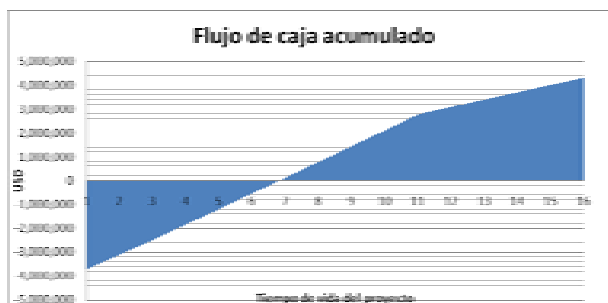


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	25,369	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	1,648,968	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		137158.5
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		2057377.1
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	2,331,694.01
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		1371584.7
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

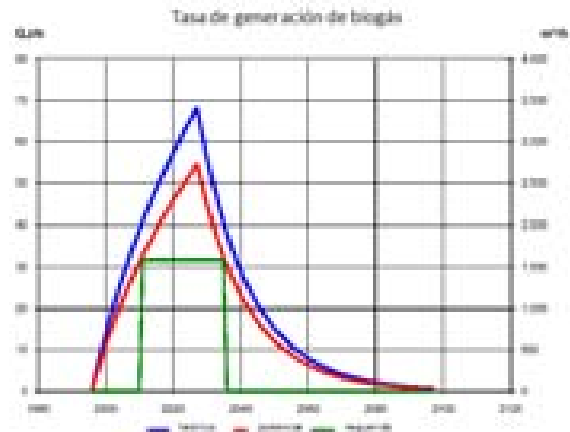
Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%		17.4%
TIR antes de impuestos - bienes	%		-0.6%
TIR después de impuestos - capital	%		13.6%
TIR después de impuestos - bienes	%		-5.7%
Recuperación simple	yr		7.5
Recuperación de capital	yr		5.8
Valor presente neto (VPN)	USD		-233,206
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		-39,882
Relación Costo-Beneficio			0.94

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%		82.0%
TIR antes de impuestos - bienes	%		22.9%
TIR después de impuestos - capital	%		59.4%
TIR después de impuestos - bienes	%		13.6%
Recuperación simple	yr		3.1
Recuperación de capital	yr		1.7
Valor presente neto (VPN)	USD		7,929,390
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		1,356,061
Relación Costo-Beneficio			3.14



5.2.3.4 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 25 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología Turbina de gas			
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto sencillo (continuo)			
Combustible gas de relleno sanitario			
Motor recíproco			
Capacidad	kW	2,100	
Electricidad exportada	MWh	0	
Fabricante	Honeywell		
Modelo	ASE8		
Tasa de Calor	kJ/kWh	16,500	4 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	34.7	

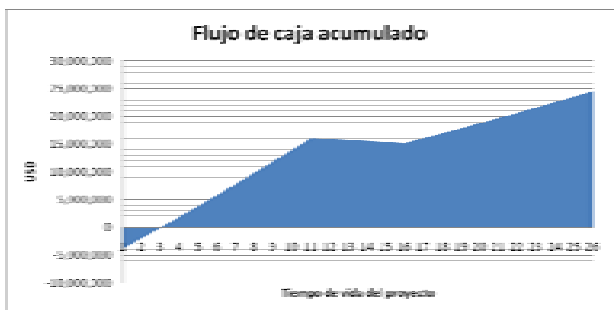
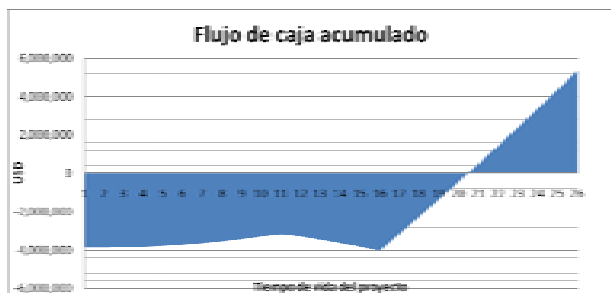


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	16,832	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	1,094,102	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		145929.8
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		3648245.7
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	2,480,807.07
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		1459298.3
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

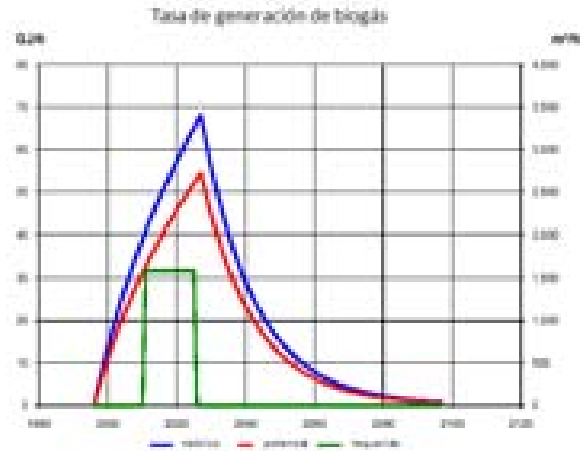
Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	7.9%
TIR antes de impuestos - bienes	%	1.2%
TIR después de impuestos - capital	%	4.5%
TIR después de impuestos - bienes	%	-1.6%
Recuperación simple	yr	11.9
Recuperación de capital	yr	19.4
Valor presente neto (VPN)	USD	-3,155,701
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	-488,185
Relación Costo-Beneficio		0.18

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono		
TIR antes de impuestos - capital	%	67.1%
TIR antes de impuestos - bienes	%	17.9%
TIR después de impuestos - capital	%	49.3%
TIR después de impuestos - bienes	%	10.6%
Recuperación simple	yr	3.6
Recuperación de capital	yr	2.0
Valor presente neto (VPN)	USD	6,454,644
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	998,530
Relación Costo-Beneficio		2.68



5.2.3.5 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 15 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Turbina de gas		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	2,100	
Electricidad exportada	MWh	0	
Fabricante	Honeywell		
Modelo	ASE8		
Tasa de Calor	kJ/kWh	16,500	4 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	34.7	

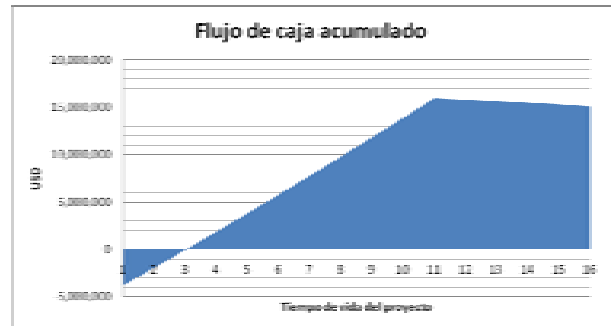
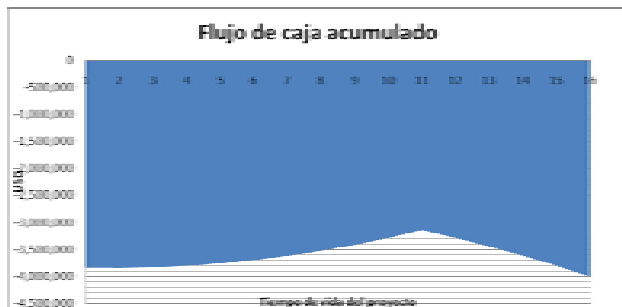


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	25,369	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	1,094,102	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

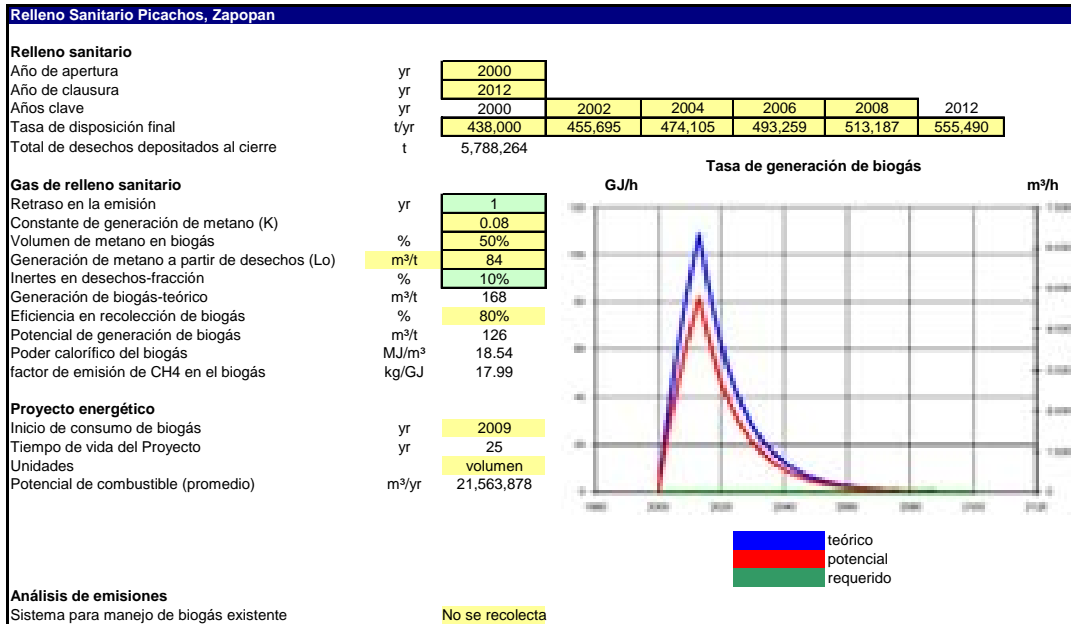
Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr	144781.2	
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2	2171718.7	
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$ 17.00	
ingreso por reducción de GEI	USD	\$ 2,461,281.14	
duración de proyecto de reducción	yr	10	
Reducción de GEI en 10 años	tCO2	1447812.4	
tasa de aumento de valor de bonos de carbono		1.5%	

Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%	-7.1%	
TIR antes de impuestos - bienes	%	-16.0%	
TIR después de impuestos - capital	%	negative	
TIR después de impuestos - bienes	%	negative	
Recuperación simple	yr	11.9	
Recuperación de capital	yr	> project	
Valor presente neto (VPN)	USD	-3,723,417	
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	-636,768	
Relación Costo-Beneficio		0.03	

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%	66.6%	
TIR antes de impuestos - bienes	%	16.6%	
TIR después de impuestos - capital	%	48.9%	
TIR después de impuestos - bienes	%	8.1%	
Recuperación simple	yr	3.6	
Recuperación de capital	yr	2.0	
Valor presente neto (VPN)	USD	5,818,878	
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	995,127	
Relación Costo-Beneficio		2.51	



5.2.4 Relleno Picachos, Zapopan



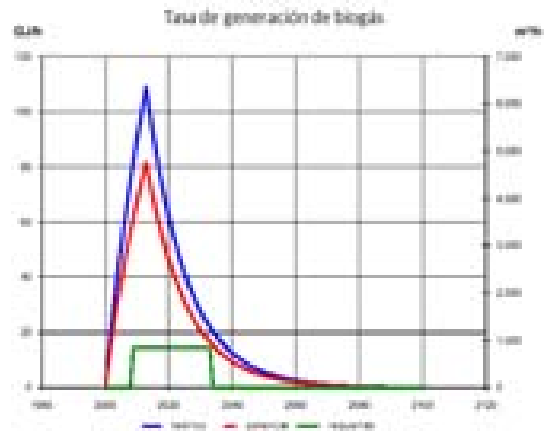
5.2.4.1 Impacto ambiental

Equivalencia de la reducción de emisiones					
Reducción neta anual de GEI (con motor)	158,190	tCO ₂	equivalente a	32,160.03	Carros y camiones no utilizados
				328,465.7	Barriles de petróleo no consumido
Reducción neta anual de GEI (con turbina)	155,668	tCO ₂	equivalente a	31,647.3	Carros y camiones no utilizados
				323,229.0	Barriles de petróleo no consumido

5.2.4.2 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 25 años

Costo inicial (créditos)	unidad	cantidad	costo unitario	cantidad total	
Sistema de energía					
Motor recíproco	kW	1,620.00	USD 1,198	USD	1,940,367
Carga intermedia	kW			USD	-
Carga pico	kW			USD	-
Emergencia	kW			USD	-
Construcción de caminos	km			USD	-
Línea de transmisión	km			USD	-
Subestación	proyecto			USD	-
Eficiencia energética	proyecto			USD	-
Pretratamiento del gas					
	costo	1	USD 3,448,173	USD	3,448,173
Sub-total:				USD	5,388,541 58.2%
Balance y misceláneos					
Refacciones	%	30.0%	USD 5,388,541	USD	1,616,562
Transporte	proyecto	5.0%	USD 5,388,541	USD	269,427
Entrenamiento y comisionamiento	p-d	100	USD 600	USD	60,000
Otros	costo	1.0%	USD 5,388,541	USD	53,885
Contingencias	%	20.0%	USD 7,388,415	USD	1,477,683
Interés durante la construcción	8.80%	12 meses	USD 8,866,098	USD	390,108
Sub-total:				USD	3,867,666 41.8%
Costo inicial total				USD	9,256,206 100.0%
Costo anual (créditos)					
O&M					
Partes y labores	proyecto	462,810	USD 0.015	USD	6,942
Pretratamiento del gas	proyecto	1	4,010	USD	4,010
Contingencias	%	8.0%	USD 10,952	USD	876
Sub-total:				USD	11,829

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Motor reciproco		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor reciproco			
Capacidad	kW	1,620	
Electricidad exportada	MWh	12,985	
Fabricante	GE		
Modelo	JMS 312 GS-B.L - 540kW		
Tasa de Calor	kJ/kWh	9,680	3 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	15.7	

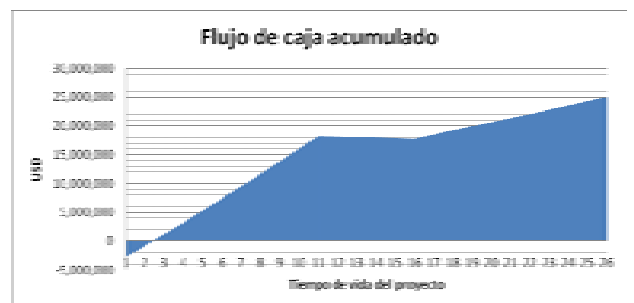
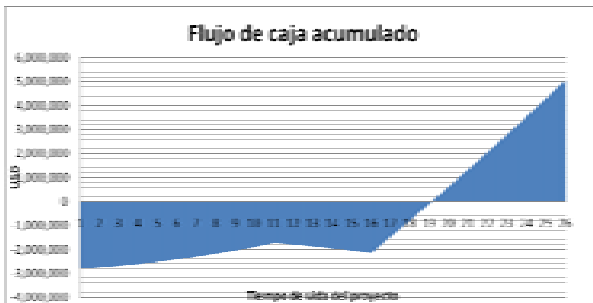


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	12,985	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	844,022	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		158189.7
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		3954741.5
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	2,689,224.21
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		1581896.6
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

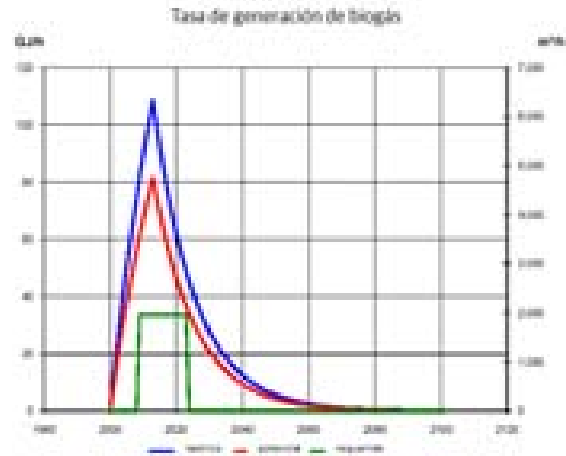
Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%	9.3%	
TIR antes de impuestos - bienes	%	1.9%	
TIR después de impuestos - capital	%	5.9%	
TIR después de impuestos - bienes	%	-0.9%	
Recuperación simple	yr	11.1	
Recuperación de capital	yr	18.1	
Valor presente neto (VPN)	USD	-1,946,584	
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	-301,135	
Relación Costo-Beneficio		0.30	

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%	101.9%	
TIR antes de impuestos - bienes	%	29.5%	
TIR después de impuestos - capital	%	72.6%	
TIR después de impuestos - bienes	%	18.8%	
Recuperación simple	yr	2.6	
Recuperación de capital	yr	1.4	
Valor presente neto (VPN)	USD	8,026,570	
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	1,241,706	
Relación Costo-Beneficio		3.89	



5.2.4.3 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 15 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Motor recíproco		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	3,798	
Electricidad exportada	MWh	30,442	
Fabricante	GE		
Modelo	JMS 312 GS-B.L. - 633kW		
Tasa de Calor	kJ/kWh	9,680	6 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	36.8	

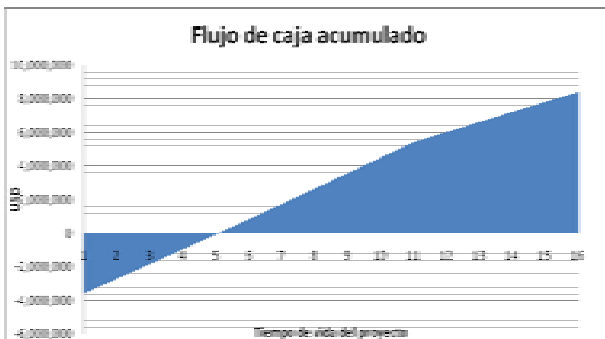


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	30,442	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	1,978,762	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr	215008.8	
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2	3225132.7	
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$ 17.00	
Ingreso por reducción de GEI	USD	\$ 3,655,150.41	
duración de proyecto de reducción	yr	10	
Reducción de GEI en 10 años	tCO2	2150088.5	
tasa de aumento de valor de bonos de carbono		1.5%	

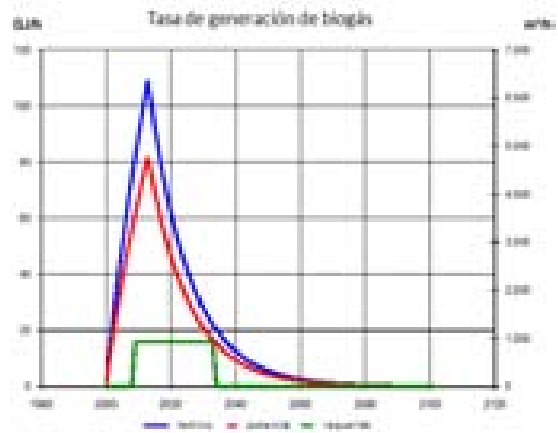
Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	29.2%
TIR antes de impuestos - bienes	%	5.1%
TIR después de impuestos - capital	%	23.1%
TIR después de impuestos - bienes	%	0.1%
Recuperación simple	yr	6.1
Recuperación de capital	yr	4.1
Valor presente neto (VPN)	USD	1,403,946
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	240,099
Relación Costo-Beneficio		1.39

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono		
TIR antes de impuestos - capital	%	132.8%
TIR antes de impuestos - bienes	%	39.8%
TIR después de impuestos - capital	%	92.9%
TIR después de impuestos - bienes	%	26.1%
Recuperación simple	yr	2.1
Recuperación de capital	yr	1.1
Valor presente neto (VPN)	USD	14,142,521
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	2,418,612
Relación Costo-Beneficio		4.96



5.2.4.4 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 25 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Turbina de gas		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	1,050	
Electricidad exportada	MWh	8,416	
Fabricante	Honeywell		
Modelo	ASE8		
Tasa de Calor	kJ/kWh	16,517	
Combustible necesario	GJ/h	17.3	

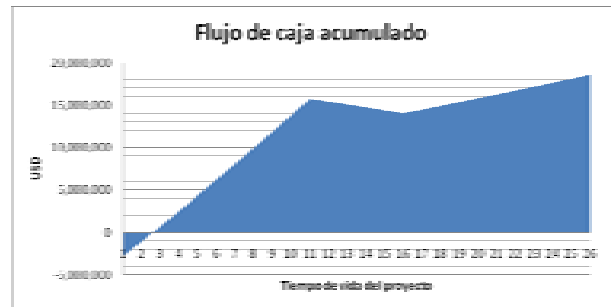
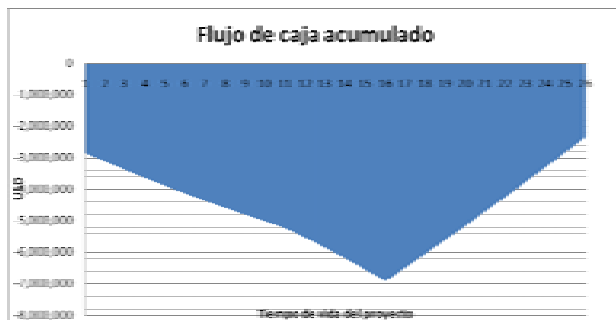


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	8,416	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	547,051	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr	155667.9	
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2	3891698.1	
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	2,646,354.68
duración de proyecto de reducción	yr	10	
Reducción de GEI en 10 años	tCO2	1556679.2	
tasa de aumento de valor de bonos de carbono		1.5%	

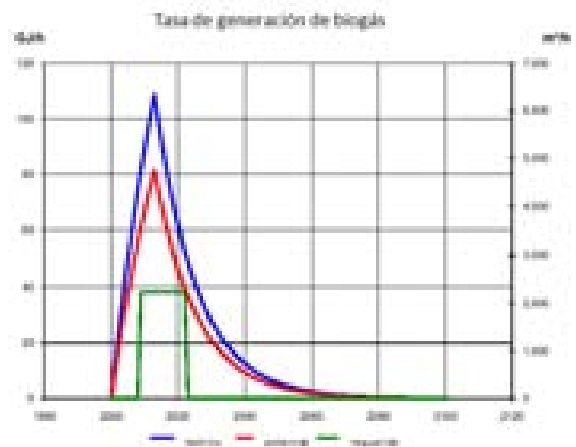
Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	0.8%
TIR antes de impuestos - bienes	%	-3.2%
TIR después de impuestos - capital	%	-2.7%
TIR después de impuestos - bienes	%	-6.0%
Recuperación simple	yr	17.7
Recuperación de capital	yr	> project
Valor presente neto (VPN)	USD	-4,082,234
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	-631,519
Relación Costo-Beneficio		-0.43

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono		
TIR antes de impuestos - capital	%	86.5%
TIR antes de impuestos - bienes	%	23.9%
TIR después de impuestos - capital	%	62.3%
TIR después de impuestos - bienes	%	14.2%
Recuperación simple	yr	3.0
Recuperación de capital	yr	1.6
Valor presente neto (VPN)	USD	6,354,689
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	983,067
Relación Costo-Beneficio		3.23



5.2.4.5 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 15 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Turbina de gas		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	3,286	
Electricidad exportada	MWh	26,339	
Fabricante	Honeywell		
Modelo	ASE40		
Tasa de Calor	kJ/kWh	12,700	1 unidades
Combustible necesario	GJ/h	41.7	

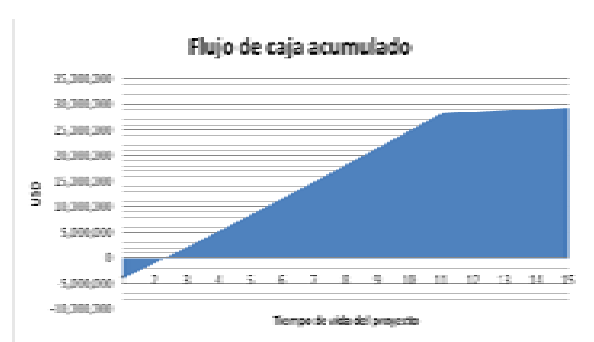
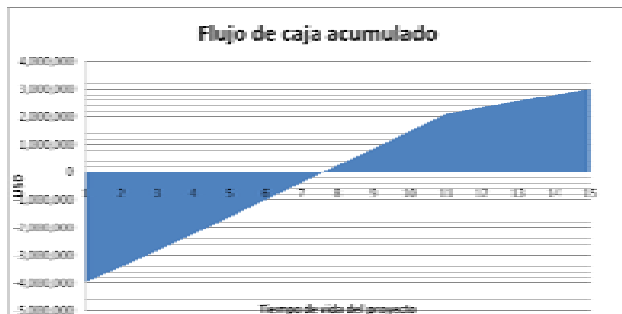


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	26,339	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	1,712,009	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

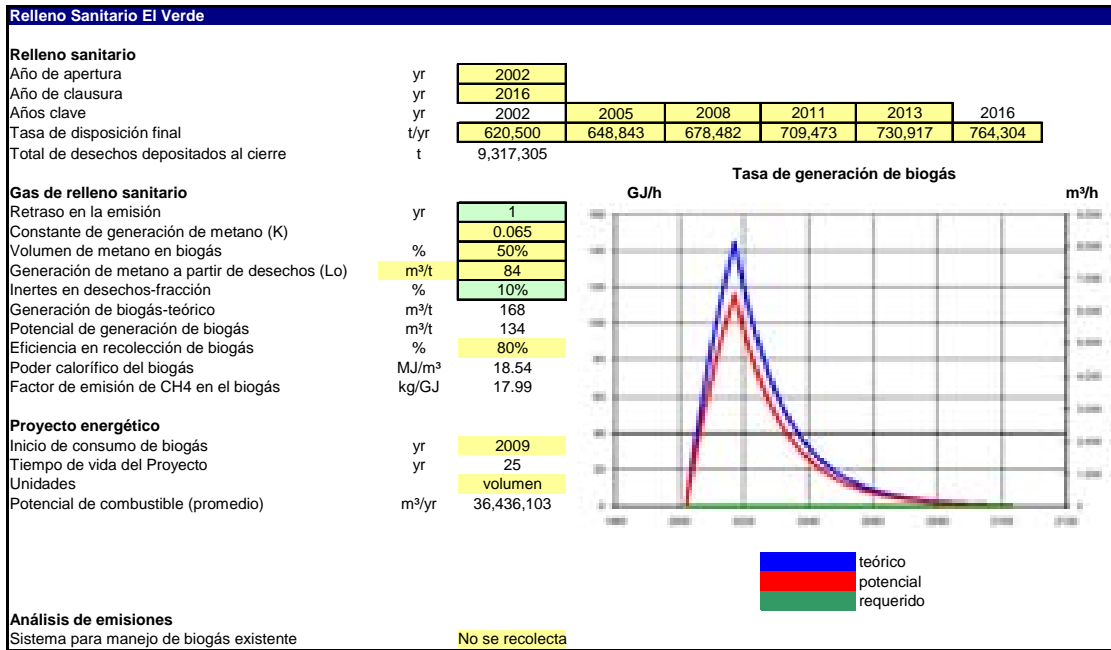
Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr	218231.9	
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2	3055246.7	
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$ 17.00	
ingreso por reducción de GEI	USD	\$ 3,709,942.42	
duración de proyecto de reducción	yr	10	
Reducción de GEI en 10 años	tCO2	2182319.1	
tasa de aumento de valor de bonos de carbono		1.5%	

Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	14.3%
TIR antes de impuestos - bienes	%	-3.1%
TIR después de impuestos - capital	%	10.1%
TIR después de impuestos - bienes	%	-8.7%
Recuperación simple	yr	7.8
Recuperación de capital	yr	6.6
Valor presente neto (VPN)	USD	-793,660
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	-138,643
Relación Costo-Beneficio		0.80

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%	111.1%	
TIR antes de impuestos - bienes	%	32.5%	
TIR después de impuestos - capital	%	78.2%	
TIR después de impuestos - bienes	%	20.5%	
Recuperación simple	yr	2.4	
Recuperación de capital	yr	1.3	
Valor presente neto (VPN)	USD	12,208,575	
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	2,132,698	
Relación Costo-Beneficio		4.09	



5.2.5 Relleno El Verde, León



Análisis de emisiones
 Sistema para manejo de biogás existente No se recolecta

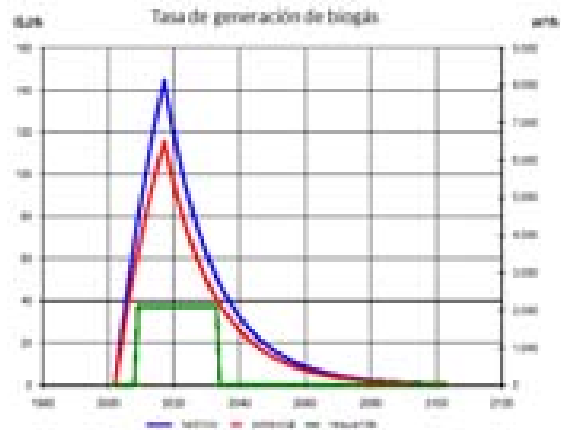
5.2.5.1 Impacto ambiental

Equivalencia de la reducción de emisiones					
Reducción neta anual de GEI (con motor)	274,292	tCO ₂	equivalente a	55,763.56	Carros y camiones no utilizados
				569,539.9	Barriles de petróleo no consumido
Reducción neta anual de GEI (con turbina)	271,886	tCO ₂	equivalente a	55,274.4	Carros y camiones no utilizados
				564,544.1	Barriles de petróleo no consumido

5.2.5.2 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 25 años

Costo inicial (créditos)	unidad	cantidad	costo unitario	cantidad total
Sistema de energía				
Motor recíproco	kW	4,320.00	USD 829	USD 3,582,217
Carga intermedia	kW			USD -
Carga pico	kW			USD -
Emergencia	kW			USD -
Construcción de caminos	km			USD -
Línea de transmisión	km			USD -
Subestación	proyecto			USD -
Eficiencia energética	proyecto			USD -
Pretratamiento del gas	costo	1	USD 6,451,381	USD 6,451,381
Sub-total:				USD 10,033,597 58.4%
Balance y misceláneos				
Refacciones	%	30.0%	USD 10,033,597	USD 3,010,079
Transporte	proyecto	5.0%	USD 10,033,597	USD 501,680
Entrenamiento y comisionamiento	p-d	100	USD 600	USD 60,000
Otros	costo	1.0%	USD 10,033,597	USD 100,336
Contingencias	%	20.0%	USD 13,705,692	USD 2,741,138
Interés durante la construcción	8.80%	12 meses	USD 16,446,831	USD 723,661
Sub-total:				USD 7,136,894 41.6%
Costo inicial total				USD 17,170,491 100.0%
Costo anual (créditos)				
O&M				
Partes y labores	proyecto	858,525	USD 0.015	USD 12,878
Pretratamiento del gas	proyecto	1	6,776	USD 6,776
Contingencias	%	8.0%	USD 19,654	USD 1,572
Sub-total:				USD 21,226

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Motor recíproco		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	4,320	
Electricidad exportada	MWh	34,627	
Fabricante	GE		
Modelo	JMS 312 GS-B.L - 540kW		
Tasa de Calor	kJ/kWh	9,464	8 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	40.9	

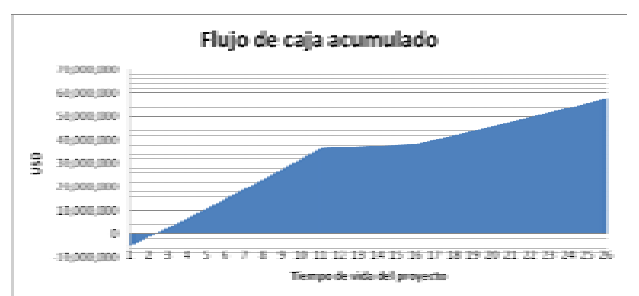
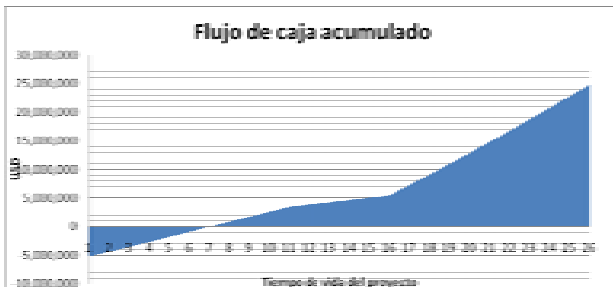


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	34,627	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	2,250,724	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		274292.4
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		6857309.0
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	4,662,970.12
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		2742923.6
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

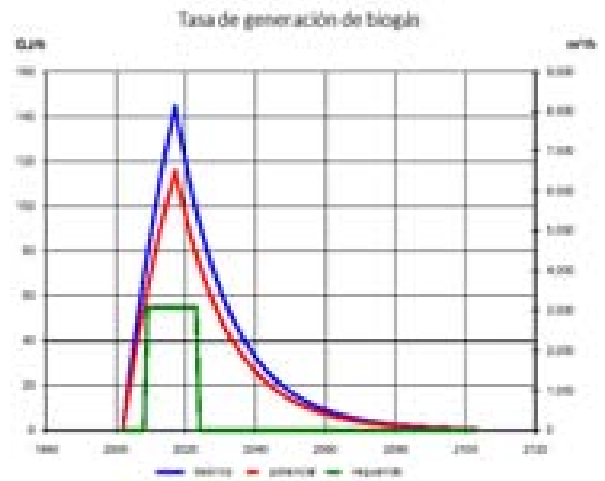
Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%		19.9%
TIR antes de impuestos - bienes	%		6.7%
TIR después de impuestos - capital	%		16.7%
TIR después de impuestos - bienes	%		3.9%
Recuperación simple	yr		7.7
Recuperación de capital	yr		6.1
Valor presente neto (VPN)	USD		624,859
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		96,665
Relación Costo-Beneficio			1.12

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%		109.0%
TIR antes de impuestos - bienes	%		32.2%
TIR después de impuestos - capital	%		77.3%
TIR después de impuestos - bienes	%		21.0%
Recuperación simple	yr		2.5
Recuperación de capital	yr		1.3
Valor presente neto (VPN)	USD		16,959,896
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		2,623,686
Relación Costo-Beneficio			4.29



5.2.5.3 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 15 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Motor recíproco		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	6,330	
Electricidad exportada	MWh	50,737	
Fabricante	GE		
Modelo	JMS 312 GS-B.L - 633kW		
Tasa de Calor	kJ/kWh	9,464	10 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	59.9	

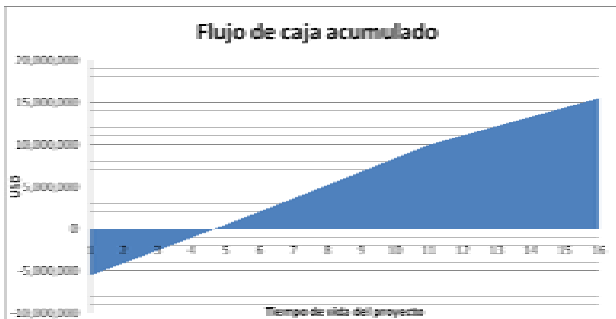


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	50,737	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	3,297,936	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr	330335.9	
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2	4955037.9	
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$ 17.00	
ingreso por reducción de GEI	USD	\$ 5,615,709.63	
duración de proyecto de reducción	yr	10	
Reducción de GEI en 10 años	tCO2	3303358.6	
tasa de aumento de valor de bonos de carbono		1.5%	

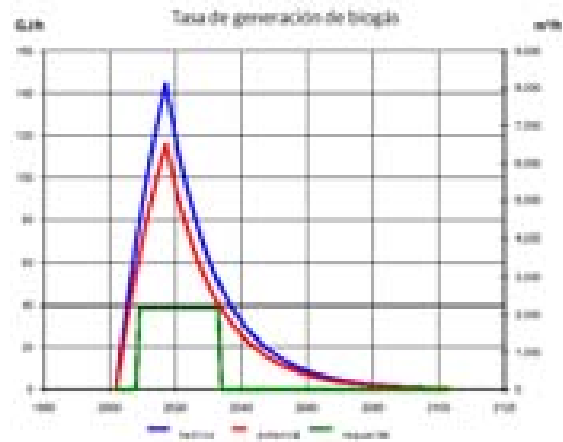
Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%	33.3%	
TIR antes de impuestos - bienes	%	7.0%	
TIR después de impuestos - capital	%	26.2%	
TIR después de impuestos - bienes	%	1.8%	
Recuperación simple	yr	5.7	
Recuperación de capital	yr	3.7	
Valor presente neto (VPN)	USD	3,096,353	
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	529,529	
Relación Costo-Beneficio		1.56	

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%	135.6%	
TIR antes de impuestos - bienes	%	40.7%	
TIR después de impuestos - capital	%	94.8%	
TIR después de impuestos - bienes	%	26.8%	
Recuperación simple	yr	2.1	
Recuperación de capital	yr	1.1	
Valor presente neto (VPN)	USD	22,667,678	
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	3,876,560	
Relación Costo-Beneficio		5.08	



5.2.5.4 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 25 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Turbina de gas		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	3,776	
Electricidad exportada	MWh	30,266	
Fabricante	Honeywell		
Modelo	ASE50		
Tasa de Calor	kJ/kWh	11,151	1 unidad
Combustible necesario	GJ/h	42.1	

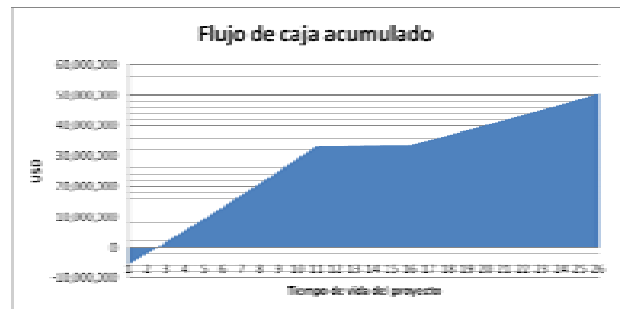


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	30,266	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	1,967,300	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO ₂ /yr		271885.6
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO ₂		6797141.2
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO ₂	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	4,622,056.05
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO ₂		2718856.5
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%		13.2%
TIR antes de impuestos - bienes	%		3.8%
TIR después de impuestos - capital	%		10.1%
TIR después de impuestos - bienes	%		1.1%
Recuperación simple	yr		9.5
Recuperación de capital	yr		15.1
Valor presente neto (VPN)	USD		-2,037,900
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		-315,262
Relación Costo-Beneficio			0.63

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%		93.4%
TIR antes de impuestos - bienes	%		26.9%
TIR después de impuestos - capital	%		67.0%
TIR después de impuestos - bienes	%		17.1%
Recuperación simple	yr		2.8
Recuperación de capital	yr		1.5
Valor presente neto (VPN)	USD		14,751,103
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		2,281,987
Relación Costo-Beneficio			3.66



5.2.5.5 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 15 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología Turbina de gas			
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto sencillo (continuo)			
Combustible gas de relleno sanitario			
Motor recíproco			
Capacidad	kW	7,552	
Electricidad exportada	MWh	60,532	
Fabricante	Honeywell		
Modelo	ASE50		2 unidades
Tasa de Calor	kJ/kWh	11,151	
Combustible necesario	GJ/h	84.2	

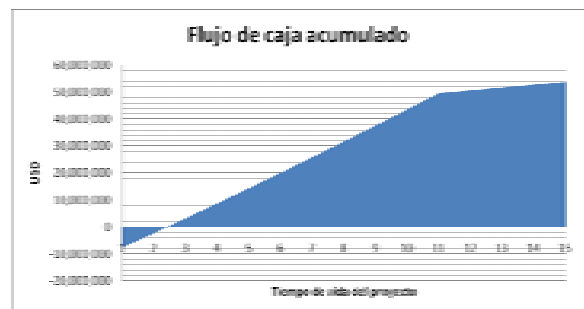
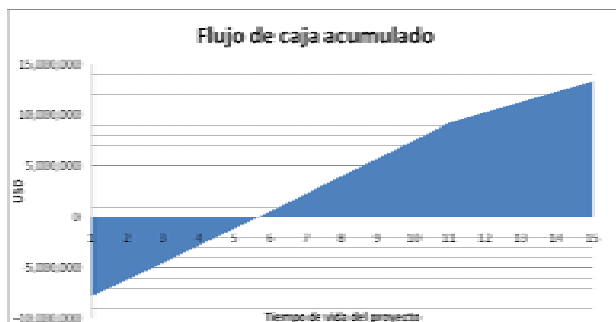


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	60,532	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	3,934,600	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

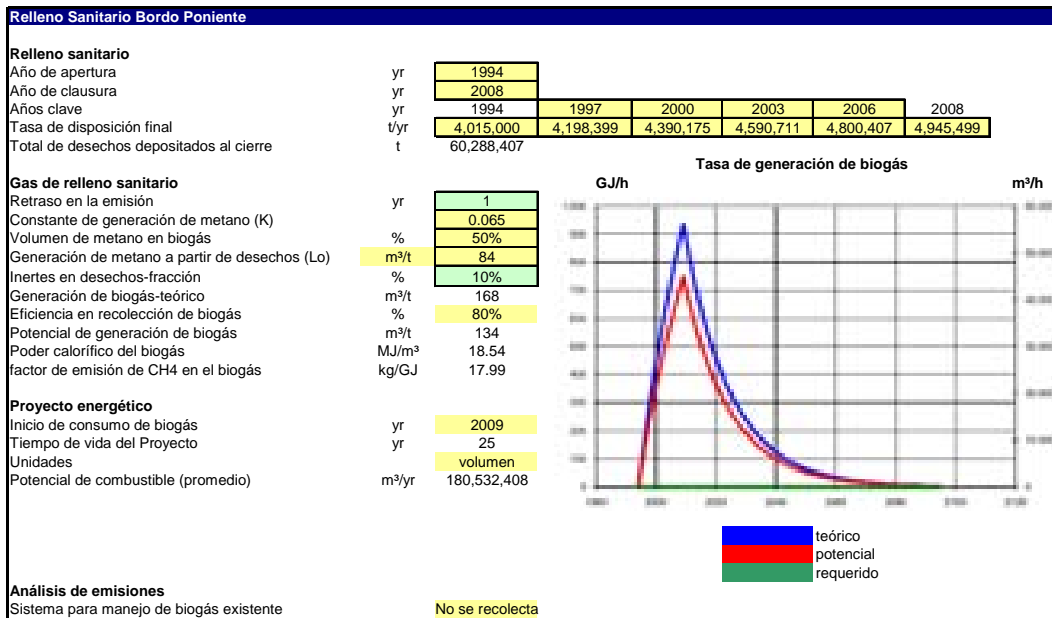
Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		335742.1
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		5036131.7
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	5,707,615.88
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		3357421.1
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%		24.2%
TIR antes de impuestos - bienes	%		2.8%
TIR después de impuestos - capital	%		19.3%
TIR después de impuestos - bienes	%		-2.1%
Recuperación simple	yr		6.6
Recuperación de capital	yr		4.7
Valor presente neto (VPN)	USD		1,551,464
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		265,327
Relación Costo-Beneficio			1.20

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%		98.9%
TIR antes de impuestos - bienes	%		28.7%
TIR después de impuestos - capital	%		70.6%
TIR después de impuestos - bienes	%		18.1%
Recuperación simple	yr		2.7
Recuperación de capital	yr		1.4
Valor presente neto (VPN)	USD		21,443,092
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		3,667,134
Relación Costo-Beneficio			3.76



5.2.6 Relleno Bordo Poniente



Análisis de emisiones
 Sistema para manejo de biogás existente: No se recolecta

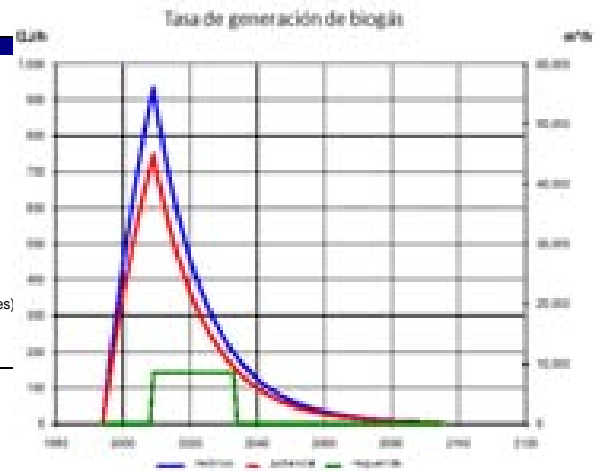
5.2.6.1 Impacto ambiental

Equivalencia de la reducción de emisiones				
Reducción neta anual de GEI (con motor)	1,337,171	tCO2 equivalente a	271,847	Carros y camiones no utilizados
			2,776,502	Barriles de petróleo no consumido
Reducción neta anual de GEI (con turbina)	1,331,180	tCO2 equivalente a	270,629	Carros y camiones no utilizados
			2,764,062	Barriles de petróleo no consumido
Reducción neta anual de GEI (con turbina)	1,314,871	tCO2 equivalente a	267,313	Carros y camiones no utilizados
			2,730,198	Barriles de petróleo no consumido

5.2.6.2 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 25 años

Costo inicial (créditos)	unidad	cantidad	costo unitario	cantidad total
Sistema de energía				
Motor recíproco	kW	16,458.00	USD 645	USD 10,614,528
Carga intermedia	kW			USD -
Carga pico	kW			USD -
Emergencia	kW			USD -
Construcción de caminos	km			USD -
Línea de transmisión	km			USD -
Subestación	proyecto			USD -
Eficiencia energética	proyecto			USD -
Pretratamiento del gas	costo	1	USD 74,984,069	USD 74,984,069
Sub-total:				USD 85,598,597 58.7%
Balance y miscelaneos				
Refacciones	%	30.0%	USD 85,598,597	USD 25,679,579
Transporte	proyecto	5.0%	USD 85,598,597	USD 4,279,930
Entrenamiento y comisionamiento	p-d	100	USD 600	USD 60,000
Otros	costo	1.0%	USD 85,598,597	USD 855,986
Contingencias	%	20.0%	USD 116,474,092	USD 23,294,818
Interés durante la construcción	8.80%	12 meses	USD 139,768,911	USD 6,149,832
Sub-total:				USD 60,320,146 41.3%
Costo inicial total				USD 145,918,743 100.0%
Costo anual (créditos)				
O&M				
Partes y labores	proyecto	7,295,937	USD 0.015	USD 109,439
Pretratamiento del gas	proyecto	1	USD 2,243	USD 2,243
Contingencias	%	8.0%	USD 111,682	USD 8,935
Sub-total:				USD 120,617

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Motor reciproco		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor reciproco			
Capacidad	kW	16,458	
Electricidad exportada	MWh	131,917	
Fabricante	GE		
Modelo	JMS 312 GS-B.L - 633kW		
Tasa de Calor	kJ/kWh	9,464	26 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	155.8	

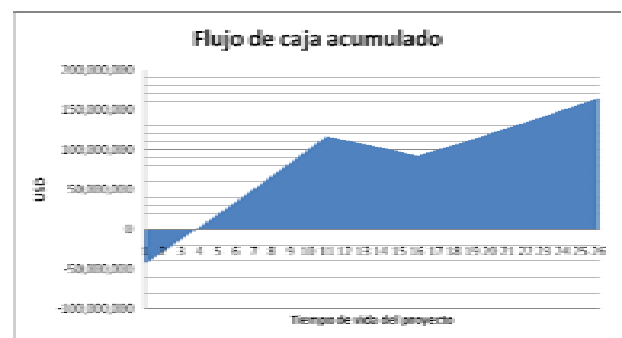
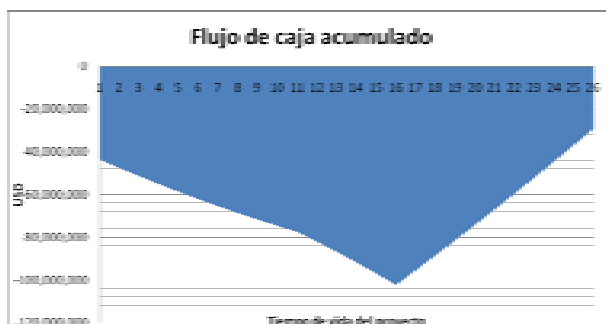


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	131,917	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	8,574,634	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		1337170.6
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		33429263.9
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	22,731,899.46
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		13371705.6
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

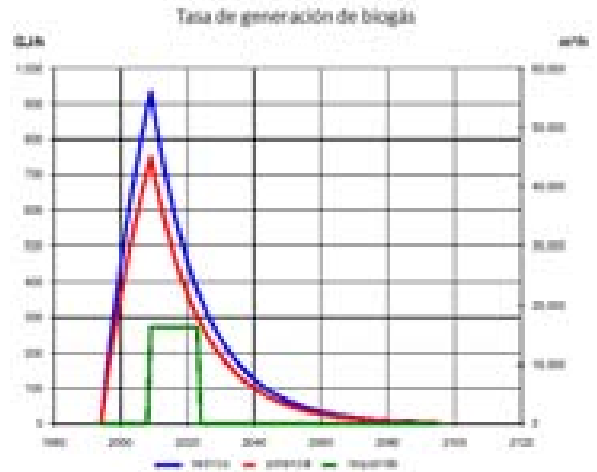
Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	1.4%
TIR antes de impuestos - bienes	%	-2.8%
TIR después de impuestos - capital	%	-2.2%
TIR después de impuestos - bienes	%	-5.7%
Recuperación simple	yr	17.3
Recuperación de capital	yr	> project
Valor presente neto (VPN)	USD	-61,074,617
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr	-9,448,207
Relación Costo-Beneficio		-0.40

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%		44.7%
TIR antes de impuestos - bienes	%		9.5%
TIR después de impuestos - capital	%		33.7%
TIR después de impuestos - bienes	%		4.2%
Recuperación simple	yr		4.7
Recuperación de capital	yr		2.8
Valor presente neto (VPN)	USD		36,348,359
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		5,623,069
Relación Costo-Beneficio			1.83



5.2.6.3 Aprovechamiento con motores recíprocos, tiempo de vida 15 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Motor recíproco		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	31,650	
Electricidad exportada	MWh	253,687	
Fabricante	GE		
Modelo	JMS 312 GS-B.L - 633kW		
Tasa de Calor	kJ/kWh	9,464	50 unidad(es)
Combustible necesario	GJ/h	299.5	

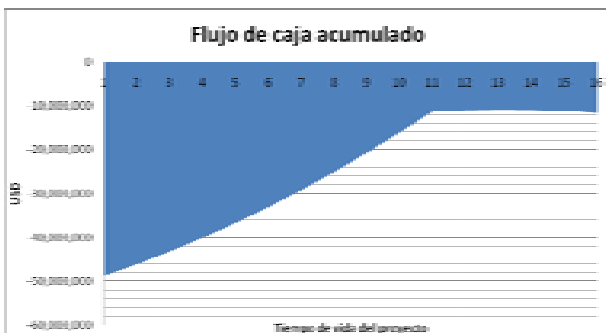


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	253,687	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	16,489,682	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		1774239.6
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		26613594.0
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	30,162,073.19
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		17742396.0
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

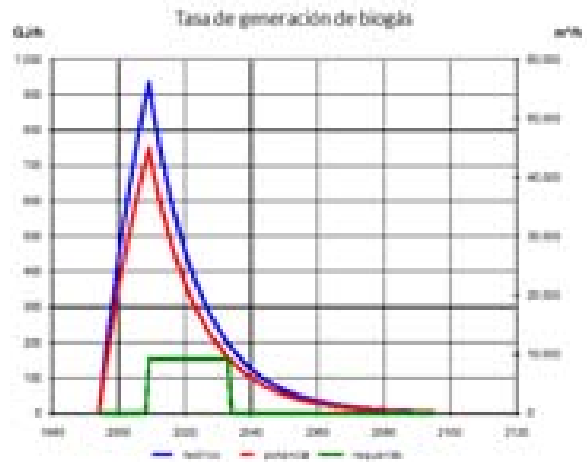
Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%		3.6%
TIR antes de impuestos - bienes	%		-8.7%
TIR después de impuestos - capital	%		-4.3%
TIR después de impuestos - bienes	%		-20.1%
Recuperación simple	yr		9.9
Recuperación de capital	yr		> project
Valor presente neto (VPN)	USD		-31,345,369
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		-5,360,593
Relación Costo-Beneficio			0.36

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%		69.9%
TIR antes de impuestos - bienes	%		18.1%
TIR después de impuestos - capital	%		51.2%
TIR después de impuestos - bienes	%		9.6%
Recuperación simple	yr		3.5
Recuperación de capital	yr		2.0
Valor presente neto (VPN)	USD		81,071,573
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		13,864,621
Relación Costo-Beneficio			2.66



5.2.6.4 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 25 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Turbina de gas		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor reciproco			
Capacidad	kW	15,104	
Electricidad exportada	MWh	121,165	
Fabricante	Honeywell		
Modelo	ASE50		
Tasa de Calor	kJ/kWh	11,151	4 unidades
Combustible necesario	GJ/h	168.4	

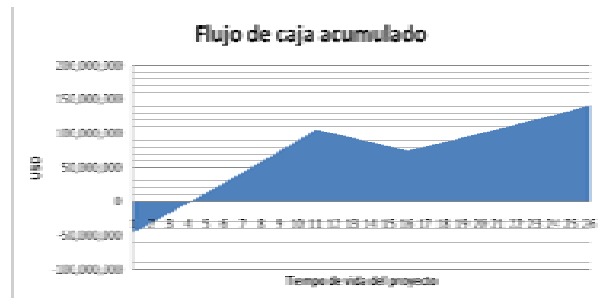


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	121,065	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	7,869,199	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		1331180.3
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		33279508.1
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	22,630,065.52
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		13311803.2
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

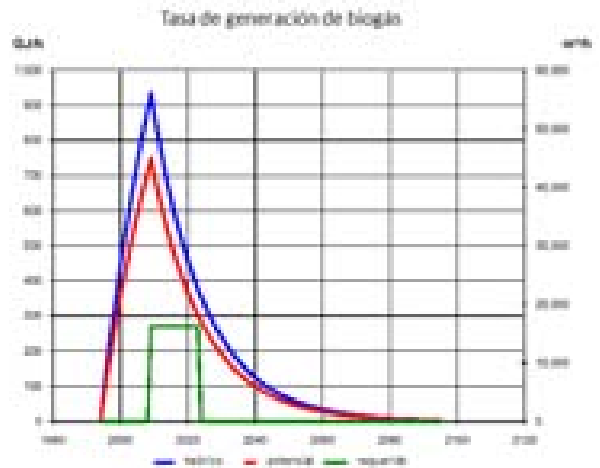
Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%		-0.7%
TIR antes de impuestos - bienes	%		-4.2%
TIR después de impuestos - capital	%		-4.2%
TIR después de impuestos - bienes	%		-7.0%
Recuperación simple	yr		19.9
Recuperación de capital	yr		> project
Valor presente neto (VPN)	USD		-72,115,473
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		-11,156,221
Relación Costo-Beneficio			-0.56

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%		38.7%
TIR antes de impuestos - bienes	%		7.1%
TIR después de impuestos - capital	%		29.3%
TIR después de impuestos - bienes	%		2.2%
Recuperación simple	yr		5.1
Recuperación de capital	yr		3.2
Valor presente neto (VPN)	USD		28,155,248
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		4,355,600
Relación Costo-Beneficio			1.61



5.2.6.5 Aprovechamiento con turbinas de gas, tiempo de vida 15 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Turbina de gas		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	26,432	
Electricidad exportada	MWh	211,863	
Fabricante	Honeywell		
Modelo	ASE50		
Tasa de Calor	kJ/kWh	11,151	7 unidades
Combustible necesario	GJ/h	294.7	

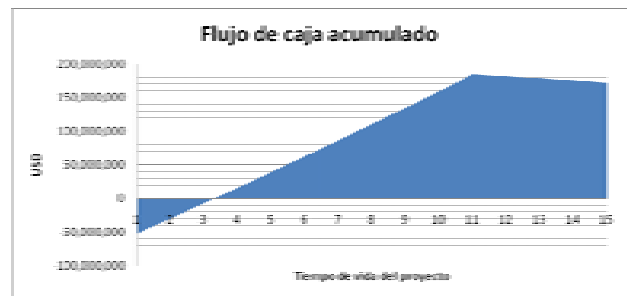
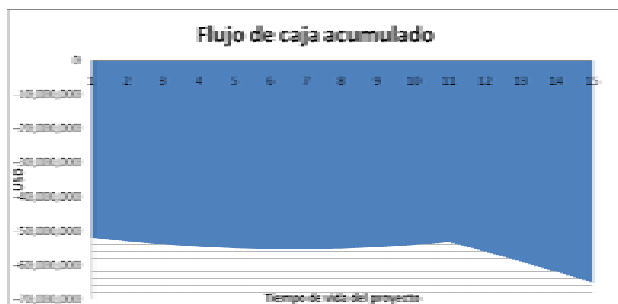


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	211,863	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	13,771,098	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		1751154.6
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		26267319.7
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	29,769,628.97
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		17511546.5
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%		-13.0%
TIR antes de impuestos - bienes	%		-20.3%
TIR después de impuestos - capital	%	negative	
TIR después de impuestos - bienes	%	negative	
Recuperación simple	yr		12.7
Recuperación de capital	yr		> project
Valor presente neto (VPN)	USD		-56,374,570
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		-9,641,013
Relación Costo-Beneficio			-0.08

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%		57.5%
TIR antes de impuestos - bienes	%		12.9%
TIR después de impuestos - capital	%		42.6%
TIR después de impuestos - bienes	%		5.0%
Recuperación simple	yr		4.0
Recuperación de capital	yr		2.3
Valor presente neto (VPN)	USD		62,298,920
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		10,654,178
Relación Costo-Beneficio			2.20



5.2.6.6 Aprovechamiento con turbinas de ciclo combinado, tiempo de vida 15 años

Sistema de energía propuesto			
Tecnología	Turbina de ciclo combinado		
Disponibilidad	%	91.50%	8,015 h
Selección de abasto	sencillo (continuo)		
Combustible	gas de relleno sanitario		
Motor recíproco			
Capacidad	kW	11,080	
Electricidad exportada	MWh	8,416	
Fabricante	Kawasaki Heavy Industries		
Modelo	M7A-01 CC		
Tasa de Calor	kJ/kWh	8,591	1 unidad
Eficiencia	42%		
Combustible necesario	GJ/h	95.2	

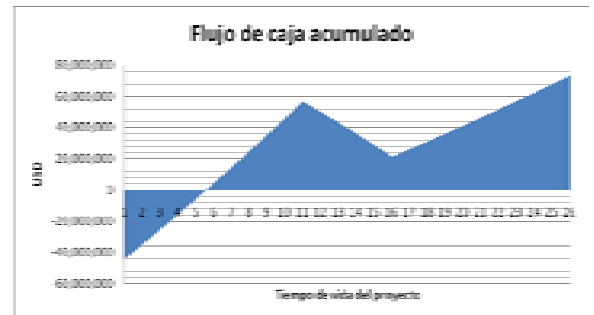


Ingreso anual			
Energía exportada	MWh	91,517	
Precio energía exportada	USD/MWh	65.00	
Ganancia	USD	5,948,594	
Incremento en precio de energía exportada	%	1.5%	

Ingreso por Reducción de GEI			
Reducción neta de GEI	tCO2/yr		1314871.4
Reducción neta de GEI en 25 años	tCO2		32871785.8
Valor de bono por reducción de GEI	USD/tCO2	\$	17.00
ingreso por reducción de GEI	USD	\$	22,352,814.33
duración de proyecto de reducción	yr		10
Reducción de GEI en 10 años	tCO2		13148714.3
tasa de aumento de valor de bonos de carbono			1.5%

Viabilidad financiera			
TIR antes de impuestos - capital	%		-3.4%
TIR antes de impuestos - bienes	%		-6.1%
TIR después de impuestos - capital	%		-6.8%
TIR después de impuestos - bienes	%		-9.0%
Recuperación simple	yr		25.0
Recuperación de capital	yr		> project
Valor presente neto (VPN)	USD		-79,116,531
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		-12,239,280
Relación Costo-Beneficio			-0.78

Viabilidad financiera con venta de bonos de carbono			
TIR antes de impuestos - capital	%		36.3%
TIR antes de impuestos - bienes	%		5.4%
TIR después de impuestos - capital	%		16.6%
TIR después de impuestos - bienes	%		-2.1%
Recuperación simple	yr		5.2
Recuperación de capital	yr		4.6
Valor presente neto (VPN)	USD		2,793,087
Ahorro anual en ciclo de vida	USD/yr		432,089
Relación Costo-Beneficio			1.06



5.3 Resumen de resultados

A continuación se muestra, nuevamente, la tabla 4.1. Ésta resume las características de los rellenos sanitarios seleccionados para analizar la producción de biogás y los métodos de aprovechamiento energético en rellenos con diferentes características.

Tabla 4.1 Características importantes de los rellenos sanitarios seleccionados

Características importantes de los rellenos seleccionados										
Relleno	Año de apertura	Tiempo de vida (años)	Basura que recibe (ton/día)	Capacidad aproximada (ton)	Superficie (ha)	Profundidad promedio (m)	Precipitación promedio (mm/año)	Temperatura promedio (°C)	k (1/año)	Lo (m ³ /ton)
Nuevo Laredo	1994	16	650	2 700 000	22	24	457	22.9	0.05	80
Mérida	1997	15	680	2 600 000	19	20	1370	26.3	0.08	84
Querétaro	1996	30	700	6 100 000	20	20	569	16.6	0.065	84
Picachos	2000	12	1112	6 000 000	8.5	35	1008	19.2	0.08	84
El Verde	2002	14	1700	10 000 000	30	20	600	16.9	0.065	84
Bordo Poniente	1994	14	12500	63 000 000	375	15	643	16.9	0.065	84

La tabla 5.4 resume los indicadores de viabilidad financiera obtenidos de las simulaciones de distintos escenarios y métodos de aprovechamiento energético para cada uno de los rellenos seleccionados. Se han destacado en verde las opciones más viables para la implementación de proyectos de aprovechamiento energético de biogás, en diferentes rellenos sanitarios. Para cada sitio, la opción más viable es la que presenta mayor VPN, mayor TIR y una mejor relación costo-beneficio.

Tabla 5.4 Resumen de viabilidad financiera de los proyectos propuestos en diferentes escenarios

Resumen de viabilidad financiera de los proyectos								
Relleno	Tecnología	Tiempo de Vida	Venta de Bonos de Carbono	Recuperación Simple (años)	Recuperación de Capital (años)	Valor Presente Neto (VPN, MUSD)	Tasa Interna de Retorno (TIR)*	Relación Costo Beneficio
Nuevo Laredo	Motor Recíproco	25 años	No	19.5	> proyecto	\$4,624	-3.9%	-0.54
			Sí	6.6	4.6	\$223	16.8%	1.07
		15 años	No	13.8	> proyecto	\$4,318	negativo	-0.21
			Sí	5.6	3.6	\$1,217	24.0%	1.34
	Turbinas de Gas	25 años	No	29.3	> proyecto	\$6,402	-8.9%	-0.92
			Sí	8.2	7	\$1,248	5.0%	0.63
		15 años	No	20.2	> proyecto	\$6,449	negativo	-0.67
			Sí	6.9	5	\$375	-10.7%	0.9
Mérida	Motor Recíproco	25 años	No	15.1	> proyecto	\$5,360	-0.1%	-0.22
			Sí	3.8	2.2	\$6,157	45.0%	2.4
		15 años	No	8.2	7	\$1,124	9.4%	0.77
			Sí	2.7	1.5	\$12,579	69.0%	3.62
	Turbinas de Gas	25 años	No	26.8	> proyecto	\$7,868	-8.0%	-0.85
			Sí	4.3	2.6	\$4,016	37.6%	1.94
		15 años	No	16.5	> proyecto	\$7,694	negativo	-0.45
			Sí	3.7	2.1	\$7,242	46.7%	2.36
Querétaro	Motor Recíproco	25 años	No	7.5	5.8	\$632	17.4%	1.17
			Sí	3.0	1.6	\$9,365	62.4%	3.53
		15 años	No	7.5	5.8	\$233	13.6%	0.94
			Sí	3.1	1.7	\$7,929	59.4%	3.14
	Turbinas de Gas	25 años	No	11.9	19.4	\$3,156	4.5%	0.18
			Sí	3.6	2	\$6,455	49.3%	2.68
		15 años	No	11.9	> proyecto	\$3,723	negativo	0.03
			Sí	3.6	2	\$5,819	48.9%	2.51
Picachos, Zapopan	Motor Recíproco	25 años	No	11.1	18.1	\$1,947	5.9%	0.3
			Sí	2.6	1.4	\$8,027	72.6%	3.89
		15 años	No	6.4	4.1	\$1,404	23.1%	1.39
			Sí	2.1	1.1	\$14,143	92.9%	4.96
	Turbinas de Gas	25 años	No	17.7	> proyecto	\$4,082	-2.7%	-0.43
			Sí	3.0	1.6	\$6,355	62.3%	3.23
		15 años	No	7.8	6.6	\$794	10.1%	0.8
			Sí	2.4	1.3	\$12,209	78.2%	4.09
El Verde, León	Motor Recíproco	25 años	No	7.7	6.1	\$625	16.7%	1.12
			Sí	2.5	1.3	\$16,960	77.3%	4.29
		15 años	No	5.7	3.7	\$3,096	26.2%	1.57
			Sí	2.1	1.1	\$22,668	94.8%	5.08
	Turbinas de Gas	25 años	No	9.5	15.1	\$2,038	10.1%	0.63
			Sí	2.8	1.5	\$14,751	67.0%	3.66
		15 años	No	6.6	4.7	\$1,551	19.3%	1.2
			Sí	2.7	1.4	\$21,443	70.6%	3.75
Relleno Bordo Poniente	Motor Recíproco	25 años	No	17.3	> proyecto	\$61,075	-2.2%	-0.4
			Sí	4.7	2.8	\$36,348	33.7%	1.83
		15 años	No	9.9	> proyecto	\$31,345	-4.3%	0.36
			Sí	3.5	2.0	\$81,072	51.2%	2.66
	Turbinas de Gas	25 años	No	19.9	> proyecto	\$72,115	-4.2%	-0.56
			Sí	5.1	3.2	\$28,155	29.3%	1.61
		15 años	No	12.7	> proyecto	\$56,375	negativo	-0.08
			Sí	4.0	2.3	\$62,299	42.6%	2.2
Ciclo Combinado	15 años	No	25.0	> proyecto	\$79,117	-6.8%	-0.78	
		Sí	5.2	4.6	\$2,793	36.3%	1.06	

* TIR después de impuestos - capital

** las cifras en rojo representan valores negativos

5.4 *Discusión de resultados*

Como se observa en la tabla 4.1, el índice de precipitación afecta los valores del índice de generación de metano (k) y el potencial de generación de metano (L_0). Entre mayor es la precipitación, mayores son los valores de k y L_0 y también, la cantidad de biogás producido (ver sección 3.3.5.2). En la tabla 5.4 se puede observar que en rellenos de tamaño similar pero con mayor índice de precipitación, la rentabilidad es mayor. Tal es el caso del Relleno Mérida, donde el mismo escenario de aprovechamiento con motor recíproco a 15 años con venta de bonos de carbono tiene un VPN casi 10.3 veces mayor que en el Relleno Nuevo Laredo. El valor de k y L_0 para el Relleno Mérida son de 0.080 año^{-1} y $84 \text{ m}^3/\text{ton}$, respectivamente. Mientras que, para el Relleno Nuevo Laredo son de 0.050 año^{-1} y $80 \text{ m}^3/\text{ton}$. También, se observa que el escenario de aprovechamiento con motor recíproco a 15 años con venta de bonos de carbono en el Relleno Picachos tiene un VPN casi 1.8 veces mayor que en el Relleno Querétaro. En este caso, la diferencia es menor porque ambos tienen el mismo valor de L_0 y el valor de k en Zapopan es 0.080 año^{-1} y en Querétaro es de 0.065 año^{-1} .

Se observa que los proyectos de mayor rentabilidad son los de corto plazo (15 años), ya que aprovechan el pico en la producción de biogás para generar el máximo de energía en un periodo más corto de tiempo, sin usar combustible adicional.

En rellenos con clima similar, el VPN se incrementa conforme se incrementa la capacidad del relleno. Para los rellenos Querétaro, El Verde y Bordo Poniente, que tienen temperatura e índice de lluvia similar, se observa que el VPN del proyecto en el Bordo Poniente es 3.6 veces mayor al del Relleno El Verde y éste es a su vez 2.4 veces mayor al del Relleno Querétaro. El VPN en el Bordo Poniente es 8.7 veces mayor al del Relleno Querétaro. Esto se debe a que a en

rellenos de mayor tamaño hay más materia orgánica y por lo tanto, se produce más biogás aprovechable.

Los proyectos de mayor rentabilidad para cada caso son los que utilizan motores recíprocos para la generación de energía ya que, a pesar de que los motores demandan mayor mantenimiento, su costo inicial es menor que el de las otras opciones tecnológicas. En los escenarios de aprovechamiento con turbinas de gas el costo inicial es tan alto que en pocos casos se logra recuperar la inversión, o el tiempo de retorno es muy elevado. El único caso en que resulta viable el aprovechamiento con turbina de ciclo combinado es el del Bordo Poniente, debido a su gran tamaño. Sin embargo, dicha opción es menos rentable que la de motores recíprocos e incluso la de turbinas de gas.

En todos los casos, la venta de bonos de carbono incrementa la rentabilidad de los proyectos propuestos. Para el Relleno Querétaro el VPN para el caso de motor recíproco a 25 años se incrementa 15 veces si se venden los bonos; para el Relleno Picachos el VPN para el caso de motor recíproco a 15 años se incrementa 10 veces; para el Relleno El Verde el VPN para el caso de motor recíproco a 15 años se incrementa 7.3 veces. Algunos escenarios sólo se vuelven rentables con la venta de reducciones de emisiones; tal es el caso de los rellenos Nuevo Laredo, Mérida y Bordo Poniente. Esto se debe a que el ingreso por venta de bonos durante los 10 primeros años del proyecto ayuda a absorber la inversión inicial y a pagar el crédito para la compra e instalación del sistema. Como se observa en las gráficas de flujo de caja acumulado (con venta de bonos de carbono), para los proyectos resaltados en verde, en los 5 años siguientes la ganancia disminuye porque se continúa pagando el crédito. La ganancia que se obtiene a partir del año 10 depende únicamente de la venta de energía eléctrica.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al comparar los resultados para rellenos de tamaño similar, situados en regiones con diferentes climas, se puede notar que los que se encuentran en regiones cálidas y húmedas (precipitación mayor a 600 mm/año) son más rentables que en zonas con menor índice de precipitación. Tal es el caso de los rellenos Nuevo Laredo y Mérida donde el segundo tiene un VPN casi 10 veces mayor al de Nuevo Laredo; y el de los rellenos Querétaro y Picachos donde el segundo tiene un VPN casi 2 veces mayor que el primero.

Los proyectos a 15 años son más rentables, ya que aprovechan los picos en la producción de biogás permitiendo generar mayor energía eléctrica, sin necesidad de combustible adicional, y vender más reducciones de emisiones.

De acuerdo con los casos analizados, para rellenos en zonas de clima similar, la escala del depósito es un factor importante en la rentabilidad de proyectos de aprovechamiento de biogás. Entre más RSU se recolecten y depositen en el mismo sitio, mayor será la ganancia en este tipo de proyectos. Por ejemplo, el VPN en el Bordo Poniente es casi 9 veces mayor al del Relleno Querétaro. Sin embargo, sería necesario valorar los costos de transporte de RSU hacia un mismo sitio en regiones extensas para confirmar esta afirmación.

Los proyectos de mayor rentabilidad para cada caso son los que utilizan motores recíprocos para la generación de energía.

Es importante notar que la venta de bonos de carbono incrementa en todos los casos la rentabilidad de los proyectos propuestos. Incluso, algunos escenarios no serían económicamente viables si no se aprovechara dicho mercado. Sin embargo, de no existir esta opción, podría implementarse el proyecto que represente menores pérdidas, valorando la importancia de este servicio público por su impacto positivo en la salud y el medio ambiente de las comunidades donde se alojen.

REFERENCIAS

1. Agencia Ambiental del Reino Unido (EAUK), Guidance on Gas Treatment Technologies for Landfill Gas Engines, Bristol, Reino Unido, 2002, pp. 9-13; 41-61. Disponible en: <http://www.environment-agency.gov.uk> (agosto, 2008).
2. Agencia para la protección ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA), Global Anthropogenic Non-CO2 Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020, Sección 3, 6, Washington, EUA, 2006, pp. 3: 1-10, Apéndice E.
3. Agencia para la protección ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA), Turning a Liability into an Asset: A Landfill Gas-to-Energy Project Development Handbook, EPA, Washington, EUA, 1996, pp. 3: 1-23.
4. Agencia para la protección ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA), USEPA's Landfill Methane Outreach Program. <http://www.epa.gov/lmop> (agosto, 2008).
5. Agencia para la protección ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA), Methane to Markets International Landfill Database, disponible en: <http://www.epa.gov/lmop/international.htm#5> (octubre, 2008).
6. Análisis de la temperatura de la superficie terrestre, Instituto Goddard para Estudios Espaciales, NASA, disponible en: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/> (septiembre, 2008).
7. Arnold, Ken y Stewart, Maurice, Surface Production Operations, Design of Gas-Handling systems and Facilities, Vol. 2, 2ª ed., Petroleum Engineering, USA, 1999, pp. 150-230.
8. Arvizu, José Luis, et. al. Bioqás de rellenos sanitarios para producción de electricidad, Boletín del Instituto de Investigaciones Eléctricas, octubre-diciembre, 2003.
9. Arvizu, José Luis, et. al. Estimación de los factores de emisión, Informe final, Instituto de Investigaciones Eléctricas, División de Energías Alternas, Gerencia de Energías No Convencionales, preparado para el Instituto Nacional de Ecología, septiembre, 2007.
10. ASCE, Landfill Closures: Environmental Protection and Land Recovery Proceedings, Geotechnical Special Publication No.53, San Diego, California, EUA, 1995.
11. Baasel, William D., Preliminary Chemical Engineering Plant Design, 2ª ed., Ohio University, Elsevier, 1990.
12. Banco Mundial, Handbook for preparing LFG-to-Energy Projects in Latin America and the Caribbean – September 2003, Energy Sector Management Assistance Program, Conestoga-Rovers and Associates, enero, 2004, pp. 2: 6-31; 3: 41-50; 4: 68-70; 6: 86-101.

13. Banco Mundial, World Development Indicators, Environment, 2008. Disponible en: <http://www.worldbank.org> (octubre, 2008).
14. California Integrated Waste Management Board (CIWMB), Technologies and Management Options for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Landfills, California, EUA, abril, 2008.
15. Cointreau, Sandra, Sanitary Landfill Design and Siting Criteria, Urban Infrastructure Note, Banco Mundial, noviembre, 2004.
16. Datos de temperatura y precipitación, disponibles en: <http://www.worldclimate.com/> (octubre, 2008)
17. Ecomethane, Ecatepec – EcoMethane Landfill Gas to Energy Project, PDD Form, México, 2006.
18. Estadísticas de medio ambiente, actividades humanas y asentamientos, residuos sólidos urbanos INEGI, disponible en: <http://www.inegi.gob.mx/> (marzo, 2008).
19. Estadísticos en materia de gestión de residuos sólidos urbanos, INE, disponible en: <http://www.ine.gob.mx> (marzo, 2008).
20. Estadísticos en materia de gestión de residuos sólidos urbanos, SEMARNAT, disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/Pages/inicio.aspx> (abril, 2008).
21. Estíbaliz A., José I., Siloxanos en motores de gas, Boletín mensual sobre lubricación y mantenimiento, Ciria, 2004. Disponible en: www.wearcheckiberica.es/boletinMensual/PDFs/siloxanos.pdf (noviembre, 2008).
22. Fornieles, Juan Antonio, MDL en rellenos sanitarios, Grupo Hera, México, noviembre, 2006. Disponible en: www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/JTs/JT9/JT9 (octubre, 2008).
23. Gobierno del Distrito Federal (GDF), Inventario de residuos sólidos del Distrito Federal, México D.F., 2006. Disponible en: www.sma.df.gob.mx (agosto, 2008).
24. Golder Associates, Cost Estimation Model for Implementing GHG Emission Reduction Projects at Landfills in British Columbia, Canadá, marzo, 2008. Disponible en: www.rdosmaps.bc.ca/min_bylaws/contract_reports/Committees/2008/September/WM/6_1GHGCommitteeReportAug2508.pdf (diciembre, 2008).
25. Golder Associates, GasSim2 User Manual, Environmental Agency, Reino Unido, 2006.
26. Guzzone, Brian, et.al., Manual de Usuario, Modelo Mexicano de Biogás, Agencia para la Protección del Ambiente (USEPA), preparado para SEDESOL, IIE, CONAE, noviembre, 2003.

27. Guzzone, Brian, et.al., Modelo Mexicano de Bioqás, Agencia para la Protección del Ambiente (USEPA), preparado para SEDESOL, IIE, CONAE, noviembre, 2003.
28. Heguy, Doug y Bogner, Jean, Cost-Effective Hydrogen Sulfide Treatment Strategies for Commercial Landfill Gas Recovery: Role of Increasing C&D (Construction and Demolition) Waste, Pollution Online, noviembre, 2004. Disponible en: www.pollutiononline.com/Content/news/article.asp (diciembre, 2008).
29. Imágenes satelitales, GoogleEarth, octubre, 2008.
30. Jacobs, Joeri, et.al., Comparison of Methane Emission Models and Methane Emission Measurements, Afvalzorg, Holanda, 2008. Disponible en: http://www.airclimate.eionet.europa.eu/docs/meetings/050502_GHGEm_Waste_WS/Scharff_EEA_CPH_050503.pdf (enero, 2009).
31. Kidnay, Arthur J., Parrish, William R., Fundamentals of Natural Gas Processing, Ch: Gas Treating, Ed. Taylor & Francis, EUA, 2006.
32. Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, Diario Oficial de la Federación, actualizada a 1993, México.
33. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente, Diario Oficial de la Federación, México, 2005.
34. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, Diario Oficial de la Federación, actualizada al 19-junio-2007, México.
35. Mc Bean, Edgard A, et.al, Solid Waste Landfill Engineering and Design, Prentice Hall, EUA, 1995.
36. Mussatti, Daniel C., Manual de costos de control de contaminación del aire de la EPA, 6ª ed., USEPA, Research Triangle Park, N.C., noviembre, 2002.
37. Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo y clausura de un sitio de disposición final de residuos urbanos.
38. Point Carbon, Información más reciente del mercado de bonos de carbono, disponible en: <http://www.pointcarbon.com> (abril, 2008).
39. Proactiva, Mérida Landfill Gas Capture and Flaring Project, PDD Form, Mérida, México, Julio 2007.
40. Ray, Martin S. y Johnston, David W., Chemical Engineering Design Project, A Case Study Approach, Gordon and Breack Science Publishers, Inglaterra, 1989.
41. Reglamento de la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica, actualizada a 2001, Diario Oficial de la Federación, México.
42. Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, Diario Oficial de la Federación, actualizado al 11-diciembre-2006, México.

43. RetScreen® International, Clean Energy Project Analysis: Engineering & Cases Textbook, Canadá, 2006. Disponible en: <http://www.retscreen.net/ang/home.php> (noviembre, 2008).
44. RetScreen® International, **RetScreen Clean Energy Project Analysis Software**, Canadá, 2006. Disponible en: <http://www.retscreen.net/ang/home.php> (noviembre, 2008).
45. Roine, Kjetil, et.al., Carbon 2008 Post 2012 is Now, Point Carbon, 2008, pp. 1-5; 17-23. Disponible en: <http://www.pointcarbon.com> (abril, 2008).
46. Secretaría de Medio Ambiente del Distrito Federal, disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/sma/index.php> (marzo, 2008).
47. Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), Indicadores básicos y manual de evaluación para rellenos sanitarios, Dirección General de Infraestructura y Equipamiento, México, 2006.
48. SEDESOL, Manual para la operación de rellenos sanitarios, Dirección General de Infraestructura y Equipamiento, México.
49. Secretaría de Desarrollo Sustentable (SEDESU), Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos en el estado de Querétaro, Querétaro, México, 2007. Disponible en: <http://www.queretaro.gob.mx/sedesu/MEDAMB/CRTAMB/contenidos/ressolidos.html> (octubre, 2008).
50. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Proyectos de aprovechamiento de metano en rellenos sanitarios, disponible en: http://www.semarnat.gob.mx/quessemarnat/politica_ambiental/cambioclimatico/Documents/MDL/sanitarios.html (octubre, 2008).
51. SEMARNAT-INE. Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos en México, México, 2001.
52. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN), Informe sobre la situación del medio ambiente en México, Cap 1, 8, SEMARNAT, 2005. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/INFORMACIONAMBIENTAL/Pages/publicaciones.aspx> (octubre, 2008).
53. Tadeo Enríquez, Pamela, Trabajo Monográfico de Actualización: Opciones Tecnológicas para el Control de la Emisión de Partículas en Suspensión Totales, Óxidos de Azufre y Óxidos de Nitrógeno en Corrientes Gaseosas Provenientes de Equipos de Combustión, Facultad de Química, UNAM, México D.F, 2008, pp 25-33.
54. Tchobanoglous, George, et.al, Gestión integral de residuos sólidos, Vol II, Ed. Mc GrawHill, España, 1994.
55. The Environment, Health, and Safety Division, Biogas Utilization Handbook, Georgia Tech Institute, Atlanta, Georgia, EUA, 1988, pp. 23-45; 73-79; 105-109.

56. Themelis, Nicolás J., et.al., Methane generation in landfills, Earth Engineering Center and Department of Earth and Environment Engineering, Columbia University. Elsevier, Science Direct, 2006.
57. Thompson, S. y Tanapat, S., Waste Management Options for Greenhouse Gas Reduction: Modeling Methane Generation for Different Waste Management Options, Environmental Informatics Archives, Vol. 2, Instituto de Recursos Naturales, Universidad de Manitoba, Canadá, 2004. Disponible en: www.iseis.org/EIA/pdfstart.asp?no=04025 (octubre, 2008).
58. UNFCCC, *Essential background and Introduction*, 2006. Disponible en: http://unfccc.int/essential_background/items/2877.php (agosto, 2008).
59. UNFCCC, *Greenhouse Gas Data*, 2006. Disponible en: http://unfccc.int/ghg_data/ghg_data_unfccc/items/4146.php (agosto, 2008).
60. UNFCCC, Protocolo de Kyoto, disponible en: <http://www.oncl.gob.ni/kyoto.html> (agosto, 2008).
61. UNFCCC, *Clean Development Mechanism*, 2006. Disponible en: <http://cdm.unfccc.int/index.html> (agosto, 2008).
62. Westerfield, Ross and Jordan, Fundamentals of Corporate Finance, 7^a ed., Ed. McGrawhill, EUA, 2006.
63. Wheels, Ed, Siloxanes in Landfill and Digester Gas Update, Los Angeles County Sanitation Districts, Long Beach, California, EUA, 2006. Disponible en: www.scsengineers.com/Papers/Pierce (noviembre, 2008).

Anexo I

Información recopilada de los rellenos sanitarios seleccionados.

1) Relleno Nuevo Laredo

Municipio: Nuevo Laredo, Tamaulipas.

Superficie: 22 ha

Basura que recibe: 550 a 600 ton/día,

Capacidad total: 2 800 000 ton, aproximadamente.

Profundidad promedio: 24 m

Año de apertura: 1994

Vida útil: 15 años, cerró en 2009

Equipamiento: Cuenta con laguna para evaporación de lixiviados. No cuenta con geomembrana; no se recolecta el biogás

Ubicación: Kilómetro 10.5 en la carretera Nuevo Laredo-Piedras Negras, Nuevo Laredo, Tamaulipas. Coordenadas geográficas: 27°32'41" L.N y 99°34'58" L.O

Situación: Es operado por la empresa Servicios de Tecnología Ambiental SA de CV (SETASA).

Índice de precipitación: 457 mm/año

Temperatura media anual: 22°C



Vista aérea Relleno Sanitario Nuevo Laredo. Fuente: Google Earth (octubre, 2008).

2) Relleno Mérida

Municipio: Mérida, Yucatán

Superficie: 19 ha

Basura que recibe: 680 ton/día

Capacidad total: 2 595 000 ton, aproximadamente

Profundidad promedio: 20 m

Año de apertura: 1997

Vida útil: 15 años, operará hasta el 2012

Equipamiento: El relleno está dividido en ocho celdas, actualmente la celda 7 está comenzando a operar. El relleno cuenta con fosa de lixiviados, geomembrana y ductos de venteo (2 pozos por ha)

Ubicación: Kilómetro 1.5 en la carretera a Chalmuch, Periférico Poniente, Mérida, Yucatán. Coordenadas geográficas: 20°58'12" L.N. y 89°42'34" L.O.

Situación: Es operado por la empresa Servicios de Tecnología Ambiental SA de CV. Existe un proyecto registrado para vender bonos de carbono a partir de la quema de biogás que se planea recolectar.

Índice de precipitación: 1370 mm/año

Temperatura media anual: 25.8°C



Vista aérea Relleno Mérida. Fuente: Google Earth (octubre, 2008).

3) Relleno Querétaro

Municipio: Querétaro, Querétaro.

Superficie: 20 ha

Basura que recibe: 650 ton/día

Capacidad total: 6 420 000 ton, aproximadamente.

Profundidad promedio: 20 m

Año de apertura: 1996

Vida útil: 30 años

Equipamiento: Cuenta con camino de acceso, malla perimetral, geomembrana, ductos y fosa de lixiviados y ductos de venteo (pasivo). Se realiza composta; no se recolecta ni se quema el biogás.

Ubicación: Noroeste de la ciudad de Querétaro, carretera satélite Mompaní Km 5.5, Querétaro. Con coordenadas geográficas: 20°40'41" L.N. y 100°29'16" L.O.

Situación: Es operado por la empresa Proactiva de Medio Ambiente MMA SA de CV. Cuenta con Reglamento de Limpia.

Índice de precipitación: 569 mm/año

Temperatura media anual: 18.7°C



Vista aérea Relleno Querétaro. Fuente: Google Earth (octubre, 2008).

4) Relleno Picachos

Municipio: Zapopan, Jalisco.

Superficie: 8.5 ha

Basura que recibe: 1 112 ton/día (2% de crecimiento anual)

Capacidad total: 6 132 000 ton, aproximadamente.

Profundidad promedio: 35 m

Año de apertura: 2000

Vida útil: 12 años, cerrará hasta 2012

Equipamiento: Cuenta con camino de acceso, geomembrana, ductos y fosa de lixiviados y ductos de venteo (pasivo). Se realiza composta; no se recolecta ni se quema el biogás.

Ubicación: Kilómetro 15.5 carretera Zapopan-San Cristobal de la Barranca.
Coordenadas geográficas: 20°55'21" L.N y 103°27'1" L.O.

Índice de precipitación: 800 mm/año

Temperatura media anual: 19.2°C



Vista aérea Relleno Picachos. Fuente: Google Earth (octubre, 2008).

5) Relleno El Verde

Municipio: León, Guanajuato

Superficie: 30 ha

Basura que recibe: 1700 ton/día (7% de crecimiento anual)

Capacidad total: 10 000 000 ton, aproximadamente.

Profundidad promedio: 20 m

Año de apertura: 2002

Vida útil: 14 años, cerrará hasta 2016

Equipamiento: Cuenta con camino de acceso, malla perimetral, geomembrana, ductos y fosa de lixiviados y 50 ductos de venteo (pasivo). Se realiza composta; no se recolecta ni se quema el biogás.

Ubicación: Kilómetro 18.5 carretera León-Lagos de Morenos, León, Guanajuato.
Coordenadas geográficas: 21°10'28" L.N. y 101°46'32" L.O

Situación: Es operado por la empresa Promotora Ambiental SA de CV (PASA)

Índice de precipitación: 600 mm/año

Temperatura media anual: 18°C



Vista aérea Relleno El verde. Fuente: Google Earth (octubre, 2008).

5) Relleno Sanitario Bordo Poniente, etapa IV

Municipio: Texcoco, Estado de México.

Superficie: 375 ha para disposición final

Basura que recibe: 125000 ton/día

Capacidad total: 63 000 000 ton, aproximadamente.

Profundidad promedio: 12 a 15 m

Año de apertura: 1994

Vida útil: 14 años

Equipamiento: Cuenta con básculas, compactadoras, malla perimetral, geomembrana, ductos y fosa de lixiviados y ductos de venteo (pasivo). Se realiza composta; no se recolecta ni se quema el biogás.

Ubicación: kilómetro 3 carretera México-Texcoco, Poniente de la Ciudad de México. Coordenadas geográficas: 19°27'37" L.N y 99°01'08" L. O.

Situación: Es operado por el Gobierno del Distrito Federal. Ha llegado a su capacidad máxima. Se encuentra ubicado parte de la cuenca del antiguo Lago de Texcoco, una región sísmica.

Índice de precipitación: 643 mm/año

Temperatura media anual: 18°C



Vista aérea Bordo Poniente. Fuente: Google Earth (octubre, 2008).