

Marzo 2009

Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás

Versión 2.0

Preparado en nombre de:

Victoria Ludwig
Landfill Methane Outreach Program
Agencia para la Protección del Ambiente (U.S. EPA)
Washington, D.C.

Preparado por:

G. Alex Stege
Jose Luis Davila
SCS Engineers
Phoenix, AZ 85008
Contrato de EPA No. EP – W -06-023
Actividad 30

Gerente del Proyecto
Dana L. Murray, P.E.
SCS Engineers
Reston, VA 20190

LIMITACIONES DE RESPONSABILIDAD

Este manual del usuario fue preparado específicamente para México en nombre del Programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la Agencia para la Protección del Ambiente de los EEUU (US EPA), como parte de las actividades en México del programa Methane to Markets (M2M). Los métodos contenidos en este manual están basados en criterios profesionales de ingeniería y representan los estándares de cuidado que se ejercen por los profesionistas con experiencia en el campo de las proyecciones de biogás de rellenos sanitarios. SCS Engineers (SCS) no garantiza la cantidad de biogás disponible y no otra garantía es expresada o implícita. Nadie es beneficiario único de este producto, su contenido, o la información incluida en él. El uso de esta guía será a su propio riesgo. US EPA y SCS no asume ninguna responsabilidad por la exactitud de la información obtenida, recolectada o proveída por otras personas.

RESUMEN

Este documento es el manual del usuario del Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 (Modelo), utilizado para la estimación de biogás generado y capturado en rellenos sanitarios municipales en México. Este modelo fue desarrollado por SCS Engineers bajo un contrato con el programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la USEPA. Este Modelo puede ser utilizado para estimar generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios mexicanos que cuenten o planeen tener un sistema de recolección de biogás.

El Modelo está elaborado en una hoja de cálculo en Excel® y está basado en una ecuación de degradación de primer orden. Este modelo requiere que el usuario alimente datos específicos tales como el año de apertura, año de clausura, índices de disposición anual, ubicación del sitio y contestar algunas preguntas referente a las condiciones físicas pasadas y presentes del sitio. El modelo provee automáticamente valores para el índice de generación de metano (k) y la generación potencial de metano (L_0) para cada uno de los estados y estima la eficiencia de captura en base a las respuestas proveídas. Estos valores fueron desarrollados usando datos específicos de clima, caracterización de residuos y prácticas de disposición de residuos de México y estima el efecto de estas condiciones en las cantidades y índices de generación de biogás. También se evaluó información de recuperación de biogás actual en cuatro rellenos sanitarios en México para ayudarnos en la selección de los valores de k and L_0 .

El Modelo fue desarrollado con el objetivo de proveer proyecciones de generación y recuperación de biogás más exactas y conservadoras. Otros modelos evaluados durante el proceso de desarrollo incluye: El Modelo Mexicano de Biogás Versión 1.0 y el Modelo de Residuos 2006 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). El Modelo incorpora datos de caracterización de residuos usados para desarrollar el Modelo Mexicano de Biogás Versión 1.0, los expande para incluir datos adicionales de ciudades y rellenos sanitarios de México. El Modelo también incorpora la estructura del Modelo IPCC con algunas revisiones para que refleje de mejor forma las condiciones del clima y condiciones de los sitios en México.

ÍNDICE

Sección	Página
Limitaciones de Responsabilidad.....	ii
Resumen	iii
Índice	iv
Lista de Figuras	iv
Lista de Tablas	iv
Glosario.....	v
1.0 Introducción.....	1
2.0 Descripción del Modelo	5
2.1 Generalidades en el Modelo Mexicano de Biogás Versión 1.0	5
2.2 Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0	6
2.2.1 Valores de k.....	6
2.2.2 Caracterización de Residuos y Generación Potencial de Metano(L_0).....	8
2.2.3 Factor de Corrección de Metano	9
2.2.4 Ajustes por Impacto de Incendios	9
2.2.5 Estimación de la Eficiencia de Captura y Recuperación de Biogás	10
3.0 Instrucciones del Modelo.....	17
3.1 Hoja de Alimentación.....	18
3.2 Hoja de Disposición y Recuperación de Biogás.....	18
3.2.1 Estimación de la Disposición de Residuos.....	18
3.2.2 Recuperación de Biogás Actual.....	22
3.2.3 Eficiencia de Captura	23
3.2.4 Línea Base de Recuperación de Biogás	23
3.3 Caracterización de Residuos	24
3.4 Resultados - Tabla	25
3.5 Resultados - Gráfica	27
4.0 Referencias	29

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Regiones Climáticas de México	3
2. Sección de Alimentación de la Hoja de Alimentación	19
3. Sección de Instrucciones de la Hoja de Alimentación	20
4. Sección de Alimentación de la Hoja de Disposición y Recup. de Biogás	21
5. Sección de Instrucciones de la Hoja de Disposición y Recup. de Biogás	23
6. Porción de la Hoja de Caracterización de Residuos	24
7. Ejemplo de la Hoja de Resultados - Tabla	25
8. Ejemplo de Hoja de Resultados - Gráfica	27

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1. Valores del Índice de Generación de Metano (k)	7
2. Valores de la Generación Potencial de Metano (L_0)	8

GLOSARIO

Año de Clausura – El año en el cual el relleno sanitario dejó o se proyecta dejar de recibir residuos.

Biogás - Biogás es el producto de la degradación de los residuos depositados en el relleno sanitario y consiste principalmente de metano y dióxido de carbono, con cantidades muy pequeñas de otros compuestos orgánicos y contaminantes atmosféricos.

Capacidad de Diseño del Relleno Sanitario – La cantidad total de residuos que pueden depositarse en el relleno sanitario, calculada en términos de volumen (m^3) o masa (Mg).

Cobertura del Sistema de Captura – El porcentaje estimado de la masa de residuos que esta potencialmente bajo la influencia de los pozos de extracción del sistema de captura.

Eficiencia de Recuperación del Sistema - El porcentaje de la generación del biogás que se estima que puede ser recuperado por el sistema de recolección. La eficiencia de recuperación está en función de la cobertura del sistema y la eficiencia de operación del sistema de captura.

Estimaciones de Disposición de Residuos - Cantidad de residuos total registradas anualmente en la báscula o estimadas usando otros métodos. Unidades: Toneladas o Megagramos (Mg).

Factor de Corrección de Metano (MCF) – Es un ajuste a las estimaciones de generación de biogás del modelo que toma en cuenta el grado de descomposición anaeróbica de los residuos (Para mayor información ver Sección 1.2.2.1).

Generación de Biogás – La cantidad de biogás producido por la descomposición de los residuos orgánicos presentes en el relleno sanitario.

Generación Potencial de Metano (L_0).- L_0 es la constante del modelo que representa la capacidad potencial para generar metano (componente principal del biogás) del relleno sanitario. L_0 depende de la cantidad de celulosa disponible en los residuos. Unidades = m^3 /Mg.

Índice de Generación de Metano (k) - El valor de k está relacionado con el periodo de vida ($t_{1/2}$) de acuerdo a la formula: $t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k}$. La k está en función del contenido de humedad en los residuos, la disponibilidad de nutrientes para los metanógenos, el pH, y la temperatura. Unidades = 1/año.

Línea Base de la Recuperación de Biogás (m^3 /hr a 50% CH_4) – Este término es utilizado en proyectos que buscan créditos de carbón y está definido como la cantidad de biogás recuperado ocurriendo antes del inicio del proyecto y continuara ocurriendo (como lo es requerido por leyes, normas o practicas comunes). Para una definición más exacta de este término favor de consultar el glosario de proyectos MDL disponible en la página web del UNFCCC: http://cdm.unfccc.int/Reference/Guidclarif/glos_CDM_v04.pdf

Recuperación de Biogás – La fracción de la generación de biogás que es ó puede ser capturada por el sistema de captura de biogás. La Recuperación de biogás del modelo es calculada multiplicando el índice de generación por la eficiencia de recuperación del sistema de captura.

Recuperación de Biogás Promedio Anual– Recuperación de biogás promedio anual registrada en la estación de succión/combustión en metros cúbicos por hora normalizados a 50% metano. Ver instrucciones en como normalizar a 50% metano en la Sección 2.2 del este manual. Unidades = m³/hr a 50% CH₄.

Residuos Vegetales – Es la fracción de los residuos que contienen poda de casas y jardines municipales.

Sitio de Disposición Con Manejo – Se define como el sitio que controla la colocación de los residuos (los residuos son dirigidos a una área específica, tiene un grado de control de los pepenadores e incendios), y tiene uno o más de los siguientes: material de cobertura, compactación mecánica, y/o conformación de los residuos.

Sitio de Disposición Semi-anaeróbico – Este tipo de sitio cuenta con una colocación controlada de residuos y todas las siguientes estructuras que permiten la introducción de aire en los residuos: material de cobertura permeable, sistema de drenaje de lixiviados, y sistema de venteo de biogás.

Sitio de Disposición No Manejado – Es el sitio que opera como tiradero a cielo abierto y no cumple con la definición de sitio de disposición con manejo.

1.0 INTRODUCCIÓN

El biogás es generado por la descomposición de los residuos en el relleno sanitario bajo condiciones anaeróbicas y puede ser recuperado mediante la instalación de un sistema de captura de biogás que generalmente quema el biogás en antorchas. Alternativamente, el biogás capturado puede ser usado benéficamente como combustible en equipo como moto generadores de combustión interna, micro turbinas, calderas, y otros equipos que usan el biogás para generación de energía eléctrica o térmica.

Además de los beneficios energéticos del uso del biogás, la captura de este biogás ayuda a reducir las emisiones que son emitidas al ambiente. La USEPA ha determinado que las emisiones de biogás de rellenos sanitarios municipales causan o contribuyen significativamente a la contaminación del aire que potencialmente puede causar daños a la salud pública. Algunos de los contaminantes contenidos en el biogás se suponen son carcinógenos, o pueden causar otros efectos adversos a la salud. Algunos problemas para el bienestar público incluyen el mal olor del biogás y el potencial de migración del mismo dentro y fuera de la propiedad del relleno sanitario que podría causar incendios y/o explosiones. El metano emitido por rellenos sanitarios también causa problemas por ser un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático global.

El objetivo principal del Modelo es proveer a los propietarios de rellenos sanitarios y operadores en México una herramienta para la evaluación de la factibilidad y los beneficios potenciales al capturar y utilizar el biogás generado. Para satisfacer este objetivo el Modelo usa una hoja de cálculo de Excel® para calcular la generación de biogás aplicando una ecuación de degradación de primer grado. El modelo provee estimaciones de la recuperación de biogás multiplicando la generación de biogás por los estimados de la eficiencia con la que el sistema de captura recuperara el biogás, esto es conocida como eficiencia de captura.

El Modelo usa la siguiente información para estimar la generación y recuperación del biogás en un relleno sanitario (ver glosario para mayor información):

- La cantidad de residuos depositados en el relleno sanitario anualmente.
- El año de apertura y clausura del sitio.
- El índice de generación de metano (k).
- La generación potencial de metano (L_0).

- El factor de corrección de metano (MCF).
- El factor de ajuste por incendios (F).
- La eficiencia de recuperación del sistema de captura.

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

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

Donde:

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

La ecuación anterior estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a través de un año. Proyecciones para años múltiples son desarrolladas variando la proyección del anual y luego iterando la ecuación. La generación de biogás total es igual a dos veces la generación de metano calculada.¹ La función de degradación exponencial asume que la generación de biogás esta a su máximo un período antes que la generación de metano. El modelo asume un período de seis meses entre la colocación de los residuos y la generación de biogás. Por cada unidad de residuos, después de seis meses el Modelo asume que la generación de biogás desciende exponencialmente conforme la fracción orgánica de los residuos es consumida. El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales).

El Modelo estima la generación y recuperación de biogás en metros cúbicos por hora (m³/hr) y en pies cúbicos por minuto (pies³/min). También estima el contenido de energía del biogás recuperado en millones de unidades térmicas británicas por hora (mmBtu/hr), La

¹ La composición del biogás asumida por el Modelo es de 50 por ciento Metano (CH₄) y 50 por ciento otros gases, que incluyen dióxido de carbono (CO₂) y trazas de otros compuestos.

eficiencia de captura, la capacidad máxima de la planta de energía en megavatios (MW), y las toneladas de reducción de emisiones de CO₂ equivalente (CERs).

El Modelo puede calcular los índices de disposición anual usando la información alimentada por el usuario o el usuario puede alimentar los índices año con año en la hoja "Disposición y Recup. de Biogás." El Modelo automáticamente asigna los valores de k y L₀ basándose en la información de clima y caracterización de residuos. Los valores de k varían dependiendo del clima y el grupo de residuos. Los valores de L₀ varían dependiendo del grupo de residuos. El clima está categorizado en cinco regiones basándose en la precipitación anual promedio y la temperatura (ver Figura 1). Cada estado está asignado a una de las cinco regiones. Los tipos de residuos están categorizados en cinco grupos distintos, incluyendo entre ellos 4 grupos orgánicos y uno inorgánico. Si existiesen datos específicos del sitio, el usuario podrá alimentar esta información en la hoja "Caracterización de Residuos". Si no existe información específica el Modelo asignará valores dependiendo del estado seleccionado. Estos valores están basados en datos de caracterización de residuos colectados de los estados en la región en cuestión.



Figura 1. Regiones Climáticas de México

Los índices de disposición anual, los valores de k y L_0 , los factores de corrección de metano y ajuste por incendio y estimaciones de la eficiencia de captura son usados para estimar la generación y recuperación de biogás para rellenos sanitarios en cada uno de los estados de México. Los resultados son presentados en forma de tabulación en la hoja "Resultados-Tabla" y gráfica en la hoja "Resultados-Gráfica".

La USEPA reconoce que es difícil modelar la generación y recuperación de biogás en forma exacta debido a las limitaciones en la información disponible para alimentar el modelo. Sin embargo, con la construcción y operación de nuevos rellenos sanitarios, y la disponibilidad de nueva información, el modelo presentado podrá ser mejorado. Además con la instalación de sistemas de captura en rellenos sanitarios de México mayor información de recuperación estará disponible para la calibración y desarrollo de valores de las variables mejorados.

Cualquier pregunta y/o comentario referente al Modelo Mexicano de Biogás deberán ser dirigidas a Victoria Ludwig del programa LMOP de USEPA vía correo electrónico a Ludwig.Victoria@epamail.epa.gov.

2.0 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

2.1 Generalidades en el Modelo Mexicano de Biogás Versión 1.0

La primer versión del Modelo Mexicano de Biogás (Versión 1.0) fue presentada en diciembre de 2003 y fue desarrollada por SCS Engineers para SEDESOL, IIE and CONAE bajo un acuerdo con el programa LMOP de USEPA y USAID. Este modelo aplicaba un solo valor de k y L_0 en la ecuación LandGEM y eran asignados en base a la precipitación promedio anual de la ubicación del relleno sanitario. Los valores de k fueron estimados basándose en modelos preparado para dos rellenos sanitarios de México y observaciones generales en rellenos sanitarios de EEUU considerando la variación de la precipitación. Los valores de L_0 fueron asignados en base a la caracterización de residuos promedio en México, derivada de información de 31 ciudades.

En el 2008, LMOP contrato a SCS Engineers para el desarrollo de una actualización y mejoramiento de esta versión del Modelo. Las siguientes limitaciones del modelo original fueron foco de esta revisión incluyeron:

- El modelo asumía una caracterización de residuos promedio para todo México y no tomaba en cuenta las variaciones específicas por estado, o permitía que el usuario usará datos específicos en caso de que estuvieran disponibles. Las variaciones de la caracterización de residuos tiene un impacto muy grande en la generación de biogás. Un ejemplo claro es la Ciudad de México que tiene un contenido orgánico significativamente menor.
- El uso de un solo valor de k en la ecuación LandGEM asume un solo índice de degradación para todos los tipos de residuos en el relleno sanitario y no toma en cuenta las variaciones del índice de degradación a través del tiempo. Esto resulta en errores significativos cuando el mayor porcentaje de residuos consiste de comida y otros residuos de degradación rápida. En México y otros países en vías de desarrollo con un contenido alto de residuos alimenticios, modelos de una sola k tienden a sobreestimar la generación de biogás en climas húmedos después de que el relleno sanitario cierra y subestimar la generación de biogás en climas secos mientras el relleno sanitario recibe residuos.
- Los valores de k fueron basados en una cantidad de información limitada de dos rellenos sanitarios (El Relleno Sanitario de Simeprodeso en Monterrey era el único sitio con datos de flujo).

- El Modelo usa una versión obsoleta de la ecuación de LandGEM.
- El Modelo no incluye estimaciones de reducción de emisiones certificadas (CERs).
- El Modelo requiere que el usuario alimente información detallada de los índices de disposición y evalúe la eficiencia de captura.

2.2 Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0

El Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 (marzo 2009) provee una herramienta de estimación automatizada para cuantificar la generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios en todos los estados de México. El modelo aplica ecuaciones separadas para calcular la generación de cada uno de los cuatro grupos de residuos orgánicos agrupados de acuerdo a su índice de degradación:

1. Residuos de degradación muy rápida – residuos alimenticios, otros orgánicos, 20% de los pañales.
2. Residuos degradación moderadamente rápida – residuos vegetales, poda de casas o parques municipales, papel higiénico.
3. Residuos degradación moderadamente lenta – papel, cartón, textiles.
4. Residuos degradación muy lenta – madera, caucho, piel, huesos, paja.

La generación de biogás total para todos los residuos es calculada como la suma de las cantidades de generación de biogás de cada una de las cuatro categorías de residuos. Cada una de las categorías tiene asignados un valor de k y L_0 que son usados en el cálculo. Los cálculos del Modelo también incluyen ajustes que toman en cuenta la descomposición aeróbica de los residuos conocido como el factor de corrección de metano (MCF), y un ajuste que toma en cuenta si el sitio ha sido impactado por incendios. La recuperación de biogás es estimada por el Modelo multiplicando la generación de biogás proyectada por la eficiencia de captura. Cada una de estas variables – k , L_0 , MCF, ajuste de impacto por incendios y la eficiencia de captura – son discutidos en detalle en las siguientes secciones.

2.2.1 Valores de k

El índice de generación de metano, k , determina el índice de generación de metano producido por la degradación de los desechos en el relleno sanitario. Las unidades de k son en año^{-1} . El valor de k describe el índice al cual los residuos dispuestos en el relleno sanitario se degradan y producen metano, y está relacionado con el período de vida de los residuos de acuerdo con la ecuación: $\text{período} = \ln(2)/k$. Conforme el valor de k incrementa, la generación de metano en un relleno sanitario también incrementa (siempre y cuando el

relleno sanitario siga recibiendo residuos) y luego disminuye con el tiempo (después que 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. Las condiciones de humedad dentro del relleno sanitario generalmente son difíciles de determinar por lo que son estimadas en base a la precipitación promedio anual. La disponibilidad de nutrientes está en función de las cantidades de residuos y la caracterización de los mismos. El pH dentro del relleno sanitario es desconocido y no es evaluado en el Modelo. La temperatura en el relleno sanitario es relativamente constante debido al calor generado por las bacterias anaeróbicas y tiende a ser independiente de la temperatura ambiente, excepto en rellenos sanitarios poco profundos en climas muy fríos. Por lo que los valores de k están basados en el tipo de residuo y clima.

Se han asignado valores de k para las cuatro categorías listadas anteriormente, estos valores reflejan los diferentes índices de degradación. Los valores de k asignados a cada una de las cuatro categorías también varían en base a la precipitación promedio anual en el clima de la región donde está ubicado el relleno sanitario. Cada estado está asignado a una de las 5 regiones climáticas mostradas en la Figura 1 basándose en la precipitación promedio anual.² Los valores que usa el modelo para cada categoría de residuos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores del Índice de Generación de Metano (k)

Categoría de Residuos	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4	Región 5
	Sureste	Oeste	Centro/Interior*	Noreste	Noroeste & Interior Norte
1	0.300	0.220	0.160	0.150	0.100
2	0.130	0.100	0.075	0.070	0.050
3	0.050	0.040	0.032	0.030	0.020
4	0.025	0.020	0.016	0.015	0.010

* Incluye Distrito Federal

² La precipitación anual de cada estado fue estimada usando información de www.worldclimate.com, www.weatherbase.com, o www.worldweather.org de las ciudades más grandes del estado. El promedio se pondero usando la población de cada una de las ciudades consideradas.

2.2.2 Caracterización de Residuos y Generación Potencial de Metano (L_0)

El valor de la generación potencial de metano (L_0) de los residuos describe la cantidad total de gas metano potencialmente producida por una tonelada de residuos cuando esta se degrada y depende casi exclusivamente de la caracterización de los residuos en el relleno sanitario. A un contenido mayor de celulosa le corresponde un valor mayor de L_0 . Las unidades de L_0 están en metros cúbicos por tonelada de residuos (m^3/Mg). Los valores teóricos de L_0 varían entre 6.2 y 270 m^3/Mg de residuos (EPA, 1991).

Los valores de L_0 usados por el Modelo están derivados de la caracterización de residuos de 40 ciudades (incluyendo 3 rellenos sanitarios en la Ciudad de México) que representan 18 estados y el Distrito Federal. El promedio de la caracterización de los residuos fue calculado para cada estado en cada región. Se utilizó la población para ponderar estos promedios. Para los estados donde no se contaba con información se les asignó la caracterización de residuos promedio de la región a la que pertenecen. Valores predeterminados para cada estado son usados por el modelo al menos que se indique que existe información específica del sitio en la hoja "Alimentación" y se alimenta la información en la hoja "Caracterización de Residuos"

El modelo usa valores predeterminados para cada estado o datos de caracterización de residuos del sitio para calcular los valores en cada una de las cuatro categorías. Los valores de L_0 utilizados por el Modelo se muestran en la Tabla 2. Se asume que los valores de L_0 para cada grupo se mantienen constantes para todos los climas, excepto por la Categoría 2 en la que tiene una variación con el clima debido a las diferencias en el tipo de vegetación local.

Tabla 2: Valores de la Generación Potencial de Metano (L_0)

Categoría de Residuos	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4	Región 5
	Sureste	Oeste	Centro/Interior*	Noreste	Noroeste & Interior Norte
1	69	69	69	69	69
2	115	126	138	138	149
3	214	214	214	214	214
4	202	a202	202	202	202

* Incluye Distrito Federal

2.2.3 Factor de Corrección de Metano

El factor de corrección de metano (MCF) es un ajuste de la estimación de la generación de biogás en el Modelo que toma en cuenta el grado de degradación anaeróbica de los residuos. El MCF varía dependiendo de la profundidad de los residuos y el tipo de relleno sanitario como lo definen las prácticas de manejo. En sitios con manejo, se asume que la degradación es anaeróbica en los residuos (MCF of 1). En sitios con condiciones menos apropiadas para degradación anaeróbica, el MCF será menor para reflejar las condiciones aeróbicas del sitio. La Tabla 3 resume los valores de MCF aplicados por el modelo basados en las respuestas proveídas en por el usuario en las preguntas #11 y #12 en la hoja "Alimentación" referentes a la profundidad de residuos y prácticas de manejo del sitio.

Tabla 3: Factor de Corrección de Metano (MCF)

Manejo del Sitio	Profundidad <5m	Profundidad >=5m
Sin Manejo	0.4	0.8
Con Manejo	0.8	1.0
Semi-aeróbico	0.4	0.5
Condición Desconocida	0.4	0.8

Profundidad de residuos mayores a 5 metros promueve la degradación anaeróbica, en sitios menos profundos la degradación de los residuos es principalmente aeróbica. Un sitio con manejo está definido como un sitio que cuenta con la colocación controlada de los residuos (los residuos son dirigidos a aéreas de disposición específica, tienen un control del pepenado e incendios) y una o más de las siguientes condiciones: material de cobertura, compactación mecánica, o conformación de residuos (IPCC, 2006). Un sitio semi-aeróbico tiene colocación controlada de los residuos y todas las siguientes condiciones que pudieran introducir aire en los residuos: material de cobertura permeable, sistema de drenaje de lixiviado, y sistema de venteo de biogás (IPCC, 2006).

2.2.4 Ajustes por Impacto de Incendios

Incendios en rellenos sanitarios consumen residuos usándolos como combustible y dejando cenizas, las cuales que no producen biogás. La generación de biogás puede ser significativamente impactada en rellenos sanitarios que han experimentado incendios. El usuario tendrá que responder en la pregunta 13a en la hoja "Alimentación" si el sitio ha sido impactado por incendios. Si la respuesta es "Si" El usuario tendrá que responder a una pregunta adicional estableciendo el área de residuos impactada por los incendios. El Modelo

descuenta de la generación de biogás el porcentaje del área impactada multiplicado por el ajuste por la severidad del impacto (1/3 para impacto bajo, 2/3 para impacto medio, y 1 para impacto severo).

2.2.5 Estimación de la Eficiencia de Captura y Recuperación de Biogás

La eficiencia de captura es una medida de la habilidad del sistema de captura para recuperar el biogás generado. Está en función del diseño del sistema (cuanta área del relleno sanitario está cubierta por el sistema de captura) y la operación y mantenimiento de sistema (que tan eficientemente es operado y mantenido). La eficiencia de captura es un porcentaje aplicado por el Modelo a la generación de biogás para estimar la cantidad de biogás que puede ser recuperado para combustión o uso benéfico. A pesar de que la recuperación de biogás puede ser medida, los índices de generación de un relleno sanitario no pueden ser medidos (por esto se necesita el modelo para estimar la generación); por lo tanto existe una incertidumbre considerable en la eficiencia de captura actual lograda en rellenos sanitarios.

En respuesta de la incertidumbre en la eficiencia de captura, la USEPA publicó que es reconocido que existen eficiencias de captura razonables para rellenos sanitarios en EEUU que cumplen con estándares de diseño y tienen sistemas de captura completos (USEPA, 1998). De acuerdo con la USEPA, las eficiencias de captura típicas varían entre 60% a 85%, con un promedio de 75%. Más recientemente, un reporte del Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC, 2006) estableció que una “recuperación >90% puede ser lograda en celdas con cobertura final y un sistema de captura eficiente.” Mientras los rellenos sanitarios en México pueden alcanzar eficiencias de captura máximas de más de 90% bajo las mejores condiciones, sitios sin manejo nunca podrían alcanzar eficiencias de captura de 50% aun con un muy buen sistema de captura instalado.

El Modelo calcula la eficiencia de captura automáticamente basándose en las respuestas proveídas por el usuario en la hoja de “Alimentación.” El método de cálculo se describe en la Sección 2.2.5.1. Alternativamente, el Usuario podrá alimentar manualmente las eficiencias de captura si así lo desea. Es recomendable que el usuario use el cálculo automático al menos que el sitio ya cuente con un sistema de captura en operación y existen datos de flujo. El proceso para ajustar manualmente la eficiencia de captura para que los índices de recuperación de biogás puedan coincidir se describe en la Sección 2.2.5.2

2.2.5.1 Cálculo de la Eficiencia de Captura

El Modelo calcula automáticamente la eficiencia de captura basado en los siguientes factores:

- Cobertura del sistema de captura – la eficiencia de captura está directamente relacionada con la extensión del sistema de pozos en la masa de los residuos.
- Profundidad de los residuos – rellenos sanitarios con profundidades someras requiere pozos que son menos eficientes y más propensos a la infiltración de aire.
- Tipo de cobertura y extensión – las eficiencias de captura serán más altas para rellenos sanitarios con material de cobertura menos permeables sobre áreas con residuos, cobertura poco permeables limitan las emisiones de biogás a la atmosfera, la infiltración de aire en el sistema de captura y la infiltración de lluvia en los residuos.
- Recubrimiento inferior – los rellenos sanitarios con recubrimiento inferior de arcilla o sintético tendrán baja incidencia de migración de biogás en los suelos aledaños, resultando en una eficiencia de captura mayor.
- Compactación de residuos – residuos sin compactar tendrán una infiltración mayor de aire y una calidad de biogás menor, y por lo tanto una eficiencia de captura menor.
- Tamaño de área de disposición activa – sitios sin manejo con áreas de disposición grandes tienden a tener eficiencias de captura menores que sitios con manejo donde la disposición es dirigida a un área específica.
- Manejo de lixiviados – Niveles de lixiviados altos pueden limitar dramáticamente las eficiencias de captura, particularmente en rellenos con alta precipitación, drenaje pobre y cobertura limitada.

Cada uno de estos factores serán discutidos abajo. Mientras se responda a las preguntas en la hoja de "Alimentación" el usuario deberá comprender las condiciones que afectan la eficiencia de captura pueden cambiar con el tiempo conforme las condiciones del relleno sanitario cambian. Por ejemplo, la profundidad de los residuos o el porcentaje de área con cobertura final. Se recomienda que el usuario conteste las preguntas reflejando las condiciones actuales si el sistema de captura ya está instalado. Si el sistema no ha sido instalado, el usuario deberá tratar de estimar la condiciones futuras para el año en que se estima el sistema estará en operación. De esta manera la eficiencia de captura calculada reflejara las condiciones actuales o del primer año de operación del sistema. Ajustes a años

futuras podrán ser estimados usando datos de recuperación actual usando el proceso descrito en la sub-sección 2.2.5.2.

Cobertura del Sistema de Captura

La cobertura del sistema de captura describe el porcentaje de los residuos que están bajo la influencia de los pozos de extracción existentes o planeados. La cobertura del sistema toma en cuenta el diseño del sistema y la eficiencia de las operaciones del campo de pozos. La mayoría de los rellenos sanitarios, particularmente aquellos que siguen en operación, tendrán una cobertura del sistema menor de 100 por ciento. Sitios con problemas de seguridad o áreas con residuos sin control de pepenadores no podrán instalar equipo en áreas inseguras y no podrán lograr buena cobertura de sistema de captura.

El usuario deberá estimar la cobertura del sistema de captura presente o futura en la pregunta #15 de la hoja de "Alimentación", la cual pregunta por el porcentaje del área con pozos de extracción. Las estimaciones de la cobertura del sistema en rellenos sanitarios con un sistema ya instalado deberán tomar en cuenta pozos que no estén en operación. La importancia de los pozos que no están operando deberá tomar en cuenta cuando se estime el descuento por los pozos que no estén en operación. Por ejemplo, un sitio con un pozo sin funcionar en la proximidad de otros pozos en funcionamiento deberán causar menos descuento que un pozo sin funcionar en un área del relleno sanitario donde no hay otros pozos en funcionamiento.

La evaluación de la cobertura del sistema de captura requiere familiaridad con el diseño del sistema. El espaciamiento y profundidad de los pozos son factores importantes. La siguiente lista describe varios escenarios que se deben considerar:

- Pozos con mayor profundidad pueden tener un radio de influencia mayor y por consecuencia acción en un volumen mayor de residuos a su alrededor que pozos menos profundos. Pozos profundos también permiten la aplicación de mayor succión sin que se presente infiltración de aire en el sistema a través del material de cobertura.
- Rellenos sanitarios con pozos profundos (más de 20 metros) pueden eficientemente capturar biogás si se colocan en una densidad menor a dos pozos por hectárea.
- Rellenos sanitarios con pozos menos profundos requieren densidades mayores a dos pozos por hectárea dependiendo de su profundidad.

A pesar de que los rellenos sanitarios con una densa red de pozos pueden capturar más biogás, rellenos sanitarios con menor número de pozos espaciados apropiadamente capturan más biogás por pozo (debido a la disponibilidad de biogás y la influencia que tiene el pozo en los residuos) que rellenos sanitarios con una densidad mayor de pozos.

Profundidad de los Residuos

Residuos con profundidades más grandes permiten que se instalen pozos con mayor profundidad. Como se señaló en la discusión anterior sobre la cobertura del sistema de captura, pozos más profundos pueden operar con más eficacia que los pozos menos profundos debido a que un mayor vacío se puede aplicar los pozos. Los pozos instalados en residuos con una profundidad menor a 10 m tenderán a tener una mayor infiltración de aire. Los usuarios del modelo deberán alimentar la profundidad media del relleno sanitario en la pregunta #11 de la hoja de "Alimentación". El modelo asume un descuento del 5% a las estimaciones de eficiencia del sistema de captura por cada metro de residuos que sean de una profundidad de menos de 10m.

Tipo y Área de la Cobertura

El tipo de cobertura y el área con cobertura pueden tener una influencia significativa en la eficiencia de captura que se pueda alcanzar. Sitios de disposición sin manejo que tengan poca o ninguna cobertura de tierra tendrán altas tasas de emisiones de biogás a la atmosfera y de infiltración de aire al sistema de captura, lo que resulta en menores tasas de captura de biogás. Zonas sin cobertura de tierra también tendrán altas tasas de infiltración de lluvia, causando que aumenten los niveles de lixiviado que a la vez causa estragos en el sistema de captura de biogás. La instalación de una cobertura de tierra disminuirá las emisiones de biogás a la atmosfera y la infiltración de aire y lluvia. Estos efectos dependerán de la permeabilidad y espesor de la cobertura, y del porcentaje de área del relleno sanitario sin cobertura. Usualmente, la cobertura final tendrá el mayor espesor y la menor permeabilidad posibles y será la más eficaz en términos de aumentar la eficiencia de captura. La mayoría de los rellenos sanitarios tienen por lo menos una cobertura de tierra intermedia instalada en área que no se han utilizado para disposición de residuos por un período prolongado. Esta cobertura intermedia provee un nivel de control moderado sobre la infiltración de aire, las emisiones de biogás y la infiltración de lluvia. Coberturas de tierra diarias es generalmente una capa de tierra somera que se instala al final del día en las zonas de disposición activa y proporciona una barrera más permeable al aire y al agua que las cubiertas finales o intermedias.

El usuario deberá estimar el porcentaje de área del relleno sanitario con cada tipo de cobertura de tierra en las preguntas #16, 17 y 18 de la hoja de "Alimentación". El Modelo calcula automáticamente el porcentaje de área del relleno sin cobertura de tierra como el área restante. El modelo calcula un ajuste ponderado de la eficiencia de captura media para tener en cuenta los porcentajes de cada tipo de cobertura de tierra mediante la asignación de eficiencia de captura de 90% al porcentaje de área del relleno con cubierta final, eficiencia de captura de 80% al porcentaje de área del relleno con cubierta intermedia, eficiencia de captura de 75% al porcentaje de área del relleno con cubierta de tierra diaria y eficiencia de captura de 50% al porcentaje de área de relleno sin ninguna cubierta.

Recubrimiento Inferior

Recubrimientos sintéticos o de arcilla actúan como una barrera de baja permeabilidad, que es eficaz en limitar la migración de biogás fuera del sitio a aéreas circundantes, en particular cuando hay un sistema de captura de biogás en funcionamiento. El usuario deberá estimar el porcentaje de área del relleno con un recubrimiento sintético o de arcilla en la pregunta #20 de la hoja de "Alimentación". El Modelo calcula un descuento a la eficiencia de captura igual a 5% multiplicado por el porcentaje de área sin recubrimiento sintético o de arcilla.

Compactación de los Residuos

La compactación de los residuos ayuda a promover la descomposición anaeróbica de los residuos y tiende a mejorar la eficiencia de captura ya que limita la infiltración de aire y mejora la calidad del gas. Los usuarios de modelo deberán contestar en la pregunta #21 de la hoja de "Alimentación" si la compactación de los residuos ocurre de forma regular. La eficiencia de captura se descuenta un 3% si no hay compactación habitual de los residuos.

Área de Disposición

En los rellenos sanitarios donde los camiones de entrega de residuos son dirigidos a descargar los residuos en un área específica proporcionaran un mejor manejo de los residuos dispuestos, incluyendo compactación más eficiente, cobertura de los residuos expuestos más frecuente y extensa, y profundidades mayores de los residuos. Todo esto contribuye a eficiencias de captura mayores. El usuario deberá contestar si los residuos son descargados en un área específica en la pregunta #22 de la hoja de "Alimentación". La

eficiencia de captura se descuenta un 5% si los residuos no se disponen en un área específica.

Lixiviados

Los lixiviados casi siempre limitan las operaciones eficientes del sistema de captura en los países en vía de desarrollo debido al alto contenido de humedad en los residuos y a la falta de un drenaje adecuado. Las zonas con fuertes lluvias son especialmente susceptibles a la acumulación de lixiviados en el relleno sanitario. Niveles altos de lixiviados en un relleno sanitario pueden limitar drásticamente la eficiencia de captura bloqueando las perforaciones de los pozos y previniendo que los pozos apliquen vacío para extraer el biogás de la masa circundante de residuos. Salvo que el clima sea extremadamente seco o el relleno sanitario haya sido diseñado para ofrecer un buen manejo de los líquidos a través de un drenaje adecuado en la superficie y sistemas costo-efectivos de captura y tratamiento de lixiviados, el relleno sanitario a menudo mostrara señales de acumulación de líquidos a través de brotes o afloramientos de lixiviados en la superficie o en los taludes. Esta evidencia de niveles altos de lixiviados en el relleno sanitario pueden ser características temporales que solo aparecen después de lluvias, lo que sugiere que el problema de lixiviados puede ser menos grave, o pueden persistir durante periodos más largos, lo que sugiere que los altos niveles de lixiviados son un problema constante.

Los impactos de los lixiviados en la eficiencia de captura son evaluados en el modelo basado en la evidencia de lixiviados en la superficie del relleno, ya sea que la evidencia aparezca después de lluvias y en el clima. El usuario deberá contestar si en la superficie existen afloramientos o brotes de lixiviado en la pregunta #23a de la hoja de "Alimentación". Si la respuesta es afirmativa, el usuario deberá contestar en la pregunta #23b si eso solo ocurre después de llover. Si hay evidencia de acumulación de lixiviados solo aparece después de llover, el Modelo aplica un descuento de 2% a 15% a la eficiencia de captura dependiendo del clima (climas lluviosos reciben un descuento más alto). Si la evidencia de acumulación de lixiviados persiste o continua después de llover, el modelo aplica un descuento de 10% a 40% a la eficiencia de captura dependiendo del clima.

Estimación de la Eficiencia de Captura

El modelo calcula la eficiencia de captura como el producto de todos los factores enumerados anteriormente. Si el factor de eficiencia de captura tiene un descuento, un valor de uno menos el descuento se utiliza en el cálculo. Cada paso en el cálculo de la

eficiencia de captura y el resultado estimado de la eficiencia de captura se muestran en las celdas J15 a J22 de la hoja de "Disposición y Recup. de Biogás". El valor de la eficiencia de captura calculada también se muestra en la columna D de la hoja de "Disposición y Recup. de Biogás" para cada año comenzando con el primer año de puesta en marcha el sistema de captura que fue indicado por el usuario en la respuesta de la pregunta #14 de la hoja de "Alimentación".

2.2.5.2 Ajustes por Eficiencia de Captura

Estimaciones precisas de la eficiencia de captura pueden ser difíciles de lograr, debido a todos los factores de influencia descritos anteriormente. La precisión de la estimación tiende a ser mayor cuando la eficiencia de captura es alta y menor cuando la eficiencia de captura es baja. Esto se debe a que es más fácil determinar que el diseño y las operaciones del sistema de captura se están optimizando, que es estimar la cantidad de descuento que debe ser aplicado al estimado de la eficiencia de captura cuando hay múltiples factores creando condiciones no óptimas para la extracción de biogás. El Modelo está destinado para ser utilizado por personas que no están familiarizados o entrenados en métodos de evaluación de la eficiencia de captura. Por esta razón, recomendamos que los cálculos de la eficiencia de captura del Modelo se dejen intactos para la mayoría de las aplicaciones. La única excepción es para la modelación de sitios con sistemas de captura de biogás instalados y con información de flujo actual disponible para realizar una comparación de los estimados de la recuperación del Modelo.

Si la información del flujo incluye tanto los flujos de biogás y el contenido de metano del biogás, e incluye un largo período de tiempo del funcionamiento del sistema (lo suficiente para representar la recuperación media por un año), se recomienda ajustar las estimaciones de la eficiencia de captura. Los datos actuales de recuperación de biogás deben ajustarse al 50% de metano equivalente (calculando los flujos de metano y multiplicando por 2) y, a continuación, calcular el promedio sobre una base anual. El estimado resultante de recuperación actual de biogás debe ser alimentado en la correspondiente fila de la Columna E de la hoja de "Disposición y Recup. de Biogás". Los estimados de eficiencia de captura en la Columna D de la hoja de "Disposición y Recup. de Biogás" pueden ajustarse de manera que las tasas de recuperación proyectada de biogás que se indican en la columna F se asemejen a las tasas actuales de recuperación de biogás.

3.0 INSTRUCCIONES DEL MODELO

El Modelo de Biogás está elaborado en una hoja de cálculo de Excel® que opera bajo el sistema operativo Windows XP® o Vista. Abra el archivo del Modelo ("Modelo Mexicano de Biogás v2.xls") escogiendo "Archivo" "Abrir...", y luego "abrir: cuando resalte la archivo correcto. El Modelo consta de cinco hojas que se pueden acceder haciendo clic en las pestañas en la parte inferior de la pantalla de Excel®. Las cinco hojas son las siguientes:

1. **Alimentación.** Esta hoja le preguntará al usuario una serie de 24 preguntas y algunas sub-preguntas. Dependiendo de las respuestas a estas preguntas el Modelo seleccionará los valores por defecto para k , L_0 , MCF, factor de ajuste por incendios y eficiencia de captura. El Modelo también desarrollará estimaciones de los índices de disposición anual.
2. **Disposición y Recuperación de Biogás.** Esta hoja proporcionará al usuario la oportunidad de alimentar los índices de disposición anual, índices de recuperación de biogás actuales, y la línea base de recuperación de biogás, si está disponible. Si la información actual de la recuperación de biogás está disponible, el usuario también podrá hacer ajustes a las estimaciones automatizadas de eficiencia de captura para que las proyecciones de recuperación coincidan con los valores actuales de recuperación.
3. **Caracterización de Residuos.** Esta hoja proporcionará al usuario la oportunidad de alimentar la información de caracterización de los residuos específica al sitio, si está disponible.
4. **Resultados - Tabla.** Esta hoja proporcionará los resultados del Modelo en forma tabular.
5. **Resultados - Gráfica.** Esta hoja proporcionará los resultados del Modelo en forma gráfica.

Todas las hojas están divididas en dos secciones:

- **Sección de Alimentación:** Esta sección cuenta con un fondo azul y es el lugar donde las preguntas deben ser contestadas o donde se debe proporcionar la información solicitada. Las celdas con texto en blanco proporcionan instrucciones o cálculos y no deben ser editadas. Las celdas con texto en amarillo requieren que el usuario alimente o modifique información. En algunos casos se proporcionan menús desplegables para limitar las entradas de información del usuario a respuestas "SI" o "NO" o a un lista específica de entradas de información posibles (por Ej. Pregunta No.

3, nombre del estado).

- **Sección de Instrucciones:** Esta sección cuenta con un fondo azul claro y proporciona instrucciones específicas sobre cómo responder las preguntas o alimentar la información.

3.1 Hoja de Alimentación

La hoja "Alimentación" cuenta con 27 filas de texto que requieren información del usuario en la Columna C para 24 elementos. Todas las 24 preguntas o frases que tienen el texto en amarillo en la Columna C necesitan ser contestadas con información específica del sitio (elementos 4, 19, y 24 se calculan automáticamente y no requieren entradas de información del usuario). Algunas preguntas tendrán menús desplegables en su celda de respuesta para guiar al usuario y limitar la gama de respuestas. Un menú desplegable aparecerá cuando el usuario seleccione dichas celdas con los menús desplegables; el usuario deberá seleccionar una respuesta de la lista de elementos del menú desplegable. La Figura 2 abajo muestra el diseño de la Sección de Alimentación que presenta todas las preguntas y entradas de información del usuario.

Instrucciones sobre cada elemento en la Sección de Alimentación se proporcionan en la fila correspondiente en la Sección de Instrucciones. La Figura 3 muestra el diseño de la Sección de Instrucciones.

3.2 Hoja de Disposición y Recuperación de Biogás

La hoja "Disposición y Recup. de Biogás" (Figura 4) no requiere entradas de información del usuario pero proporciona al usuario la capacidad de cambiar los estimados de disposición de residuos y de eficiencia de captura del sistema que fueron calculados automáticamente, y los valores supuestos de recuperación actual de biogás y la línea base de recuperación de biogás ($0 \text{ m}^3/\text{hr}$). Cada una de estas entradas de información se describe a continuación.

3.2.1 Estimación de la Disposición de Residuos

Se recomienda que el usuario alimente los estimados de disposición anual de residuos en la Columna B para los años para los cuales se disponga de información. Alimente los estimados de disposición de residuos en toneladas métricas (Mg) para cada año con información de disposición, deje el estimado calculado de disposición para los años sin

información de disposición, incluyendo años a futuros. Los estimados de disposición deben basarse en los registros disponibles de índices de disposición reales y ser coherentes con la información específica del sitio sobre las cantidades de residuos in-situ, capacidad total del sitio, y el año proyectado de clausura. Los estimados de disposición deberán excluir las tierras y otros elementos que no se tienen en cuenta en la información de la caracterización de residuos (Ver hoja "Caracterización de Residuos").



PROYECCIONES DE LA GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS		
PAGINA DE ALIMENTACION		
1	Nombre del Sitio:	<Colocar el Nombre del Sitio>
2	Ciudad:	<Colocar el Nombre de La Ciudad>
3	Estado:	Aguascalientes
4	Región:	Centro/ Interior 3
5	¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión?	No
6	Año de apertura del sitio:	1990
7	Disposición anual del año mas reciente:	100,000 Mg
8	Año de disposición (arriba):	2007
9	Año de clausura o año de clausura proyectado:	2010
10	Incremento anual estimado de la disposición:	2.0%
11	Profundidad promedio del relleno sanitario:	12 m
12	Prácticas de diseño y manejo del relleno sanitario:	2
13a	¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?	Si
13b	Si la respuesta de 13a es "Si", indique el área del impacto en % del total:	30%
13c	Si la respuesta de 13a es "Si", indique la severidad del impacto del incendio:	1
14	Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado):	2009
15	Porcentaje del área con residuos con sistema de captura:	90%
16	Porcentaje del área con residuos con cubierta final:	10%
17	Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia:	20%
18	Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria:	50%
19	Porcentaje del área con residuos sin cobertura:	20%
20	Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana:	100%
21	¿Se compactan los residuos regularmente?	Si
22	¿La disposición de residuos se hace en una área específica?	No
23a	Existen afloramientos/bortes de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?	No
23b	Si la respuesta de 23a es "Si", ¿esto ocurre solo después de llover?	No
24	Eficiencia de captura estimada:	63%

Figura 2. Sección de Alimentación de la Hoja de Alimentación

INSTRUCCIONES:

Editar los ítems en amarillo siguiendo las instrucciones proveídas enseguida de cada ítem. Ítems con letra blanca no pueden ser cambiados. Las instrucciones siguientes describen los requerimientos para la alimentación del Modelo.

1. Alimentar el nombre del relleno sanitario. Esta alimentará la hoja de cálculo "Resultados-Tabla".
2. Alimentar la ciudad donde está ubicado el relleno sanitario. Esta alimentará la hoja de cálculo "Resultados-Tabla".
3. Seleccionar el estado donde está ubicado el relleno sanitario. Has click en la flecha que aparece cuando seleccionas la celda.
4. El modelo automáticamente seleccionará la región y su clima basado en la ubicación del estado.
5. Seleccionar **No** si no existen datos, **Si** si existen datos. Si la respuesta es **Si**, alimentar los datos específicos en la hoja de cálculo "Caracterización de Residuos".
6. Alimentar el año cuando el relleno sanitario inicio recibiendo residuos.
7. Alimentar la disposición en el año más reciente. Si existe información de varios años, alimentar esta información en la hoja de cálculo "Disposición y Recuperación de Biogás".
8. Alimentar el año más reciente reflejando la información de arriba.
9. Alimentar el año de clausura actual o proyectado del relleno sanitario.
10. Alimentar el porcentaje de crecimiento de disposición anual.
11. Alimentar la profundidad de residuos promedio en metros.
12. Seleccionar el valor del menú: **1**=Sitio sin manejo; **2**=Sitio con manejo; **3**=Sitio semi-aeróbico; **4**=Condición desconocida. Ver el manual del usuario para las definiciones de cada categoría.
- 13a. Seleccionar **Si** o **No** del menú. Si se desconoce seleccionar **No**.
- 13b. Si la respuesta de 13a es **Si**, alimentar el % del área impactada.
- 13c. Si la respuesta de 13a es **Si**, seleccionar la severidad del impacto: **1**=bajo; **2**=medio; **3**=severo.
14. Si no existe un sistema instalado, alimentar el año en que se espera el sistema este funcionando.
15. Alimentar un valor de hasta 100% dependiendo de la cobertura del sistema de captura (rellenos sanitario activos tendrán una cobertura < 100%).
16. Alimentar un valor de hasta 100% dependiendo del área con cobertura final.
17. Alimentar un valor de hasta 100% dependiendo del área con cobertura intermedia pero no cobertura final.
18. Alimentar un valor de hasta 100% dependiendo del área con solo cobertura diaria.
19. Este valor es calculado automáticamente en base a las respuestas de las preguntas anteriores.
20. Alimentar un valor de hasta 100% dependiendo del área con recubrimiento inferior de arcilla o geomembraba.
21. Seleccionar **Si** o **No** del menú.
22. Seleccionar **Si** o **No** del menú.
- 23a. Seleccionar **Si** o **No** del menú.
- 23b. Si la respuesta de 23a es **Si**, indicar si los afloramientos/brotos ocurren inmediatamente después de las lluvias.
24. Este valor es estimado en base a las respuestas de las preguntas anteriores.

Figura 3. Sección de Instrucciones de la Hoja de Alimentación



DISPOSICION Y RECUPERACION DE BIOGAS						
Año	Disposición de Residuos Estimada (Toneladas Métricas)	Toneladas Métricas Acumuladas	Eficiencia del Sistema de Captura	Recuperación Actual de Biogás (m ³ /hr a 50% CH ₄)	Recuperación de Biogás Estimada (m ³ /hr a 50% CH ₄)	Línea Base de Recuperación de Biogás (m ³ /hr a 50% CH ₄)
1990	71,400	71,400	0%		0	0
1991	72,800	144,200	0%		0	0
1992	74,300	218,500	0%		0	0
1993	75,800	294,300	0%		0	0
1994	77,300	371,600	0%		0	0
1995	78,800	450,400	0%		0	0
1996	80,400	530,800	0%		0	0
1997	82,000	612,800	0%		0	0
1998	83,600	696,400	0%		0	0
1999	85,300	781,700	0%		0	0
2000	87,000	868,700	0%		0	0
2001	88,700	957,400	0%		0	0
2002	90,500	1,047,900	0%		0	0
2003	92,300	1,140,200	0%		0	0
2004	94,100	1,234,300	0%		0	0
2005	96,000	1,330,300	0%		0	0
2006	97,900	1,428,200	0%		0	0
2007	100,000	1,528,200	0%		0	0
2008	102,000	1,630,200	0%		0	0
2009	104,000	1,734,200	63%		664	0
2010	106,100	1,840,300	63%		687	0
2011	0	1,840,300	63%		711	0
2012	0	1,840,300	63%		642	0

Figura 4. Sección de Alimentación de la Hoja de Disposición y Recup. de Biogás

3.2.2 Recuperación de Biogás Actual

Si están disponibles, los datos actuales de recuperación de biogás del sistema de captura en funcionamiento deben convertirse a m³/hr, ajustarse al 50% de metano equivalente, y calcular el promedio utilizando el siguiente procedimiento

- Multiplicar cada valor medido de flujo de biogás por el porcentaje de metano en el momento que se midió el flujo, para calcular el flujo del metano.
- Convertir unidades a m³/hr si fuera necesario.
- Calcular el promedio de velocidad del flujo de metano utilizando toda la información para el año (enero a diciembre).
- Convertir a flujo de biogás al 50% de metano equivalente, multiplicando por 2.

El índice promedio calculado de recuperación de biogás debe ser igual al flujo anual promedio de biogás medido en la antorcha y/o en la planta de recuperación de energía (No es la suma de los flujos en cada pozo). Alimete los índices de recuperación de biogás

promedio actuales en metros cúbicos por hora en la Columna E en la fila correspondiente al año representado en la información del flujo. Si los datos de los porcentajes de metano no están disponibles, los datos de los flujos no son válidos y no deben ser alimentados. Los números colocados en estas celdas serán mostrados en la hoja de Resultados-Tabla, así que no alimente ceros para años sin datos de flujo (dejar en blanco).

3.2.3 Eficiencia de Captura

Como se describe en la sección 2.2.5.2, no se recomiendan modificaciones a los estimados de eficiencia de captura que fueron calculados automáticamente, al menos que datos actuales de la recuperación de biogás estén disponibles. El usuario puede hacer ajustes a los valores de la eficiencia de captura del sistema en la Columna D para cada año con datos de flujo válidos. Los efectos de ajustes de la eficiencia de captura serán visibles inmediatamente en la Columna F (los valores proyectados de recuperación de biogás no se pueden ajustar). Continúe ajustando la eficiencia de captura para cada año con información del flujo hasta que la recuperación proyectada se asemeje a la recuperación actual que se muestra en la Columna E. El usuario también querrá ajustar los estimados de eficiencia de captura para años a futuro para que coincida con la información del año más reciente.

3.2.4 Línea Base de Recuperación de Biogás

Los estimados de la línea base de recuperación de biogás se restarán de las proyecciones de recuperación de biogás para estimar la reducción de emisiones certificadas de emisiones (CERs) logradas por el proyecto de biogás. El valor predestinado para la línea base de recuperación de biogás es igual a cero para todos los años, lo cual será adecuado para la mayoría de los rellenos sanitarios en México que no están obligados a capturar y quemar el biogás en virtud de cualquier reglamento vigente. Los valores de línea base de recuperación de biogás pueden ser ajustados en la Columna G. Consulte las más recientes metodologías del MDL para el cálculo de la línea base de recuperación de biogás.

La sección "Instrucciones" (Figura 5) proporciona instrucciones sobre cómo ajustar los valores de disposición de residuos, eficiencia de captura, recuperación actual de biogás y línea base de recuperación de biogás. Los cálculos automáticos de los valores por defecto para la eficiencia de captura basados en las entradas de información del usuario también se muestran en esta sección.

INSTRUCCIONES:

Disposición de Residuos Estimada: Alimentar los índices de disposición anual en la Columna B solo en los años con información disponible. Los datos alimentados sustituirán los calculados en base a la hoja de cálculo de Alimentación.

Eficiencia del Sistema de Captura: La eficiencia de captura será calculada en base a las preguntas contestadas en la hoja de cálculo de Alimentación. El usuario podrá sustituir estos cálculos alimentando la eficiencia de captura deseada en la columna D.

Recuperación Actual de Biogás: Si existe un sistema de captura instalado, alimentar los flujos promedio anual a 50% metano. NO ALIMENTE CEROS.

Línea Base de Recuperación de Biogás: Alimente los flujos de biogás a 50% metano en la columna F. Ver la pagina web CDM del UNFCCC para metodologías de determinación de línea base.

	Cálculos de Eficiencia de Captura	
Profundidad de Residuos	100%	Descuento progresivo si la profundidad < 10 m (5% por cada metro)
Área de cobertura del sistema de captura	90%	Ajuste del factor de cobertura del sistema
Cobertura superior y su cobertura	65%	Cobertura final = 90%; Intermedia = 80%; Diaria = 75%; sin cobertura = 50%
Recubrimiento inferior y su cobertura	65%	El descuento es 5% x el % de área sin recubrimiento inferior
Compactación de los residuos	65%	El descuento es de 3% si no hay compactación
Área de disposición designada	63%	El descuento es 5% si no existe área de disposición designada
Lixiviado	63%	El descuento es hasta de 25% dependiendo del clima y la frecuencia de los afloramientos
Eficiencia de Captura Calculada	63%	

Figura 5. Sección de Instrucciones de la Hoja de Disposición y Recup. de Biogás

3.3 Caracterización de Residuos

La caracterización de los residuos es utilizada por el Modelo para calcular automáticamente los valores L_0 y el porcentaje de residuos asignados a cada uno de los cuatro grupos descritos en la sección 2.2. Los valores de caracterización de residuos por defecto para cada estado se muestran en la hoja "Caracterización de Residuos" (ver Figura 6). El Modelo utiliza los valores predestinados para cada estado para calcular L_0 a menos que el usuario seleccione "SI" en respuesta de la pregunta #5 de la hoja "Alimentación (¿Existen datos de caracterización de residuos específicos al relleno sanitario en cuestión?)", en cuyo caso, la caracterización de residuos específica al sitio se utiliza. El usuario debe alimentar la caracterización de residuos específica al sitio en la Columna B de la hoja "Caracterización de Residuos". Asegúrese de que los porcentajes sumen 100%.

INSTRUCCIONES: Si existen datos específicos de caracterización de residuos, se deberá seleccionar **SI** en la pregunta 5 de la hoja de cálculo de Alimentación y se deberá alimentar los porcentajes de cada fracción de residuos en la columna con letras amarillas abajo (celdas B7 a B20).



Methane to Markets

Modelo Mexicano de Biogás v.2

Fecha: Marzo 2009

Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de EEUU



TABLA DE CARACTERIZACION DE RESIDUOS EN LOS DIFERENTES ESTADOS DE MEXICO Y ESPECIFICOS AL SITIO

Categoría de Residuo	Datos Específicos al Sitio	Aguascalientes	USA	Aguascalientes	Baja California North	Baja California South	Campeche
Comida	38.4%	45.1%	13.4%	45.1%	35.8%	30.7%	30.6%
Papel y Cartón	12.0%	16.5%	23.8%	16.5%	13.1%	16.3%	12.8%
Poda (jardines)	8.0%	11.3%	4.8%	11.3%	15.5%	9.9%	18.2%
Madera	1.0%	0.3%	10.1%	0.3%	0.5%	1.1%	2.9%
Caucho, Piel, Huesos y Paja	1.0%	0.7%	2.8%	0.7%	0.7%	1.2%	3.3%
Textiles	4.0%	0.8%	4.4%	0.8%	4.1%	5.4%	2.0%
Papel Higiénico	3.0%	0.0%					
Otros Orgánicos	0.0%	0.0%	0.9%	0.0%	1.6%	1.9%	5.0%
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	2.0%	2.8%		2.8%	11.9%	6.4%	1.3%
Metales	3.0%	2.2%	6.3%	2.2%	3.2%		
Construcción y Demolición	10.0%	0.1%	12.8%	0.1%	0.0%		
Vidrio y Cerámica	5.0%	4.6%	5.4%	4.6%	3.5%	26.9%	23.8%
Plásticos	10.0%	13.1%	12.7%	13.1%	7.5%		
Otros Inorgánicos	2.6%	2.5%	2.7%	2.5%	2.7%		
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	38.8%	45.7%	14.3%	45.7%	39.7%	34.0%	35.9%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	11.0%	11.3%	4.8%	11.3%	15.5%	9.9%	18.2%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	16.0%	17.3%	28.2%	17.3%	17.2%	21.7%	14.9%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	2.0%	1.0%	12.9%	1.0%	1.2%	2.2%	6.2%
Total Orgánicos	67.8%	75.3%	60.2%	75.3%	73.5%	67.9%	75.1%
Total Inorgánicos	32.2%	24.7%	39.8%	24.7%	26.5%	32.1%	24.9%
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	40%	40%	45%	40%	35%	35%	50%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	12%	12%	16%	12%	12%	12%	12%
Residuos en Estados Unidos - % de orgánicos secos			44%				
Lo de degradación rápida calculado	69	69		69	69	69	69
Lo de degradación moderadamente rápida calculado	138	138		138	149	149	115
Lo de degradación moderadamente lenta calculado	214	214		214	214	214	214
Lo de degradación lenta calculado	202	202		202	202	202	202

Figura 6. Porción de la Hoja de Caracterización de Residuos

3.4 Resultados - Tabla

Los resultados del modelo se muestran en una tabla situada en la hoja "Resultados-Tabla" que esta lista para la impresión con un mínimo de edición (ver Figura 8 para un ejemplo del diseño de la tabla). El título de la tabla ha sido asignado por el usuario en las entradas de información de la hoja "Alimentación".

La tabla proporciona la siguiente información la cual fue copiada de la hoja de "Disposición y Recup. de Biogás" o calculada por el modelo:

- Año - empezando con el año de apertura del relleno sanitario y terminando con el año que el usuario seleccione.
- Disposición - índices anuales de disposición de residuos en Mg por año
- Disposición Acumulada - total de residuos acumulados en Mg.
- Generación de biogás para cada año de proyección en m³/hr, pies³/min y mmBtu/hr.
- Estimados de eficiencia de captura del sistema para cada año de proyección.
- Capacidad máxima de la planta de energía que podría ser sostenida por este flujo



en MW.

- Línea base de flujo de biogás en m³/hr
- Estimados de reducción de emisiones de metano en toneladas CH₄/año y en toneladas CO₂e/año (CERs).
- El contenido de metano que se asume para la proyección del modelo (50%)
- Los valores k utilizados en la modelación.
- Los valores L₀ utilizados en la modelación.

INSTRUCCIONES: El título de la tabla está enlazado con la hoja de alimentación. Los títulos de las columnas y el contenido de la Tabla de Resultados no pueden ser modificados (excepto por la capacidad de la planta de electricidad) y son derivados/calculados con base a los datos alimentados. La Tabla de Resultados podría necesitar ajustes. El Usuario deberá de ajustar los cortes de página y esconder o desocultar renglones en la vasa de la tabla a como sea necesario.

Modelo Mexicano de Biogás v.2
Fecha: Marzo 2009

Desarrollado por SCS Engineers, para la Agencia de Protección al Ambiente de EEUU

PROYECCIONES DE LA GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS DE RELLENOS SANITARIOS													
<Colocar el Nombre del Sitio>													
<Colocar el Nombre de La Ciudad>, Aguascalientes													
Año	Disposición (Mg/año)	Disposición Acumulada (Mg)	Generación de Biogás			Eficiencia del Sistema de Captura (%)	Recuperación de Biogás Estimada			Capacidad Máxima de la Planta de Electricidad* (MW)	Línea Base del Flujo de Biogás (m ³ /hr)	Reducción de Emisión Estimadas**	
			(m ³ /hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)		(m ³ /hr)	(pies ³ /min)	(mmBtu/hr)			(tonnes CH ₄ /yr)	(tonnes CO ₂ e/yr)
1990	71,400	71,400	0	0	0.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1991	72,800	144,200	97	57	1.7	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1992	74,300	218,500	185	109	3.3	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1993	75,800	294,300	265	156	4.7	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1994	77,300	371,600	338	199	6.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1995	78,800	450,400	406	239	7.3	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1996	80,400	530,800	468	276	8.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1997	82,000	612,800	527	310	9.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1998	83,600	696,400	581	342	10.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1999	85,300	781,700	633	372	11.3	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2000	87,000	868,700	682	401	12.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2001	88,700	957,400	728	429	13.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2002	90,500	1,047,900	773	455	13.8	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2003	92,300	1,140,200	816	480	14.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2004	94,100	1,234,300	858	505	15.3	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2005	96,000	1,330,300	899	529	16.1	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2006	97,900	1,428,200	938	552	16.8	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2007	100,000	1,528,200	977	575	17.5	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2008	102,000	1,630,200	1,016	598	18.1	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2009	104,000	1,734,200	1,054	620	18.8	63%	664	391	11.9	1.1	0	2,082	43,715
2010	106,100	1,840,300	1,091	642	19.5	63%	687	405	12.3	1.1	0	2,156	45,273
2011	0	1,840,300	1,128	664	20.2	63%	711	418	12.7	1.2	0	2,230	46,820
2012	0	1,840,300	1,018	599	18.2	63%	642	378	11.5	1.1	0	2,012	42,256
2013	0	1,840,300	922	543	16.5	63%	581	342	10.4	1.0	0	1,822	38,265
2014	0	1,840,300	838	493	15.0	63%	528	311	9.4	0.9	0	1,656	34,767
2015	0	1,840,300	764	450	13.7	63%	481	283	8.6	0.8	0	1,509	31,694
2016	0	1,840,300	699	411	12.5	63%	440	259	7.9	0.7	0	1,380	28,987
2017	0	1,840,300	641	377	11.5	63%	404	238	7.2	0.7	0	1,267	26,598
2018	0	1,840,300	590	347	10.5	63%	372	219	6.6	0.6	0	1,166	24,483

Figura 7. Ejemplo de la Hoja de Resultados - Tabla

La Tabla está configurada para mostrar hasta 100 años de estimados de generación y recuperación de biogás. Como se proporciona, la tabla muestra 53 años de información. Los últimos 47 años están en filas ocultas. Es muy probable que el usuario desee cambiar el número de años de información que se muestra, en función de la edad del sitio y la cantidad de años en el futuro que el usuario desea exponer información. Normalmente, las proyecciones hasta el año 2030 son adecuadas para la mayoría de los usos del modelo. Para ocultar filas adicionales, seleccione las celdas en las filas que se quiera ocultar y seleccione "Formato", "Fila", "Ocultar". Para mostrar de nuevo las celdas ocultas, señale las celdas encima y debajo de las celdas a ser expuestas y seleccione "Formato", "Fila",

“Mostrar”.

Para imprimir la tabla, seleccione “Archivo”, “Imprimir”, “Aceptar”. La tabla deberá imprimir en el formato correcto.

3.5 Resultados - Gráfica

Los resultados del modelo también se muestran en forma gráfica en la hoja “Resultados-Gráfica (ver Figura 8 para un ejemplo del diseño de la gráfica). Los datos mostrados en la gráfica incluyen los siguientes:

- Índices de generación de biogás para cada año de proyección en m^3/hr .
- Índices de recuperación de biogás para cada año de proyección en m^3/hr .
- Índices actuales (históricos) de recuperación de biogás en m^3/hr .

El título del gráfico dice “Proyecciones de Generación y Recuperación de Biogás” y muestra el nombre y el estado del relleno sanitario. El usuario puede hacer cambios, haga clic en el título del gráfico y escriba el título deseado. La línea de tiempo que se muestra en el eje “x” necesitara ser editada si el usuario desea que la proyección no termine en el año 2030 o desea cambiar el año de inicio. Para editar el eje “x” para visualizar un periodo de tiempo alternativo, haga clic en el eje “x” y seleccione “Formato” “Eje x”. Luego seleccione la pestaña “Escala” e ingrese el año de apertura y de clausura para la proyección. Además, debido a que el gráfico esta vinculado a la tabla, este mostrará los datos para todos los años de proyección que se muestren en la tabla (dados los limites establecidos para el eje “x”). No se mostrará ninguna de las filas ocultas. Si la tabla muestra años mas allá del rango establecido para el eje “x”, la línea de la gráfica aparecerá que sale del borde del gráfico. Para corregir esto, el usuario necesitará o bien ocultar las filas de más o editar el rango del eje “x” para mostrar los años adicionales.

Para imprimir el gráfico, haga clic en cualquier parte del gráfico y seleccione “Archivo” “Imprimir” “Aceptar”. Si el usuario no hace clic en la gráfica antes de imprimir, las instrucciones también aparecerán en la impresión.

INSTRUCCIONES:

El eje de las "x" necesita ser ajustado de acuerdo al inicio y terminación de los años del proyecto en cuestión. Las líneas no se extenderán completamente hasta la fecha de terminación si los renglones en la hoja de cálculo "Resultado-Tabla" están escondidos. Esconder los renglones de los años que no sean necesarios o des esconder los renglones para prevenir esto. Los datos de Recuperación de Biogás Actual deberán ser alimentados en la hoja de cálculo "Disposición y Recuperación de Biogás" si es que existe información. Si no, favor de eliminar de la legenda seleccionándola y presionando la tecla "delete".

**Proyecciones de Generación y Recuperación de Biogás
Relleno Sanitario la Montaña, Aguascalientes,
Aguascalientes**

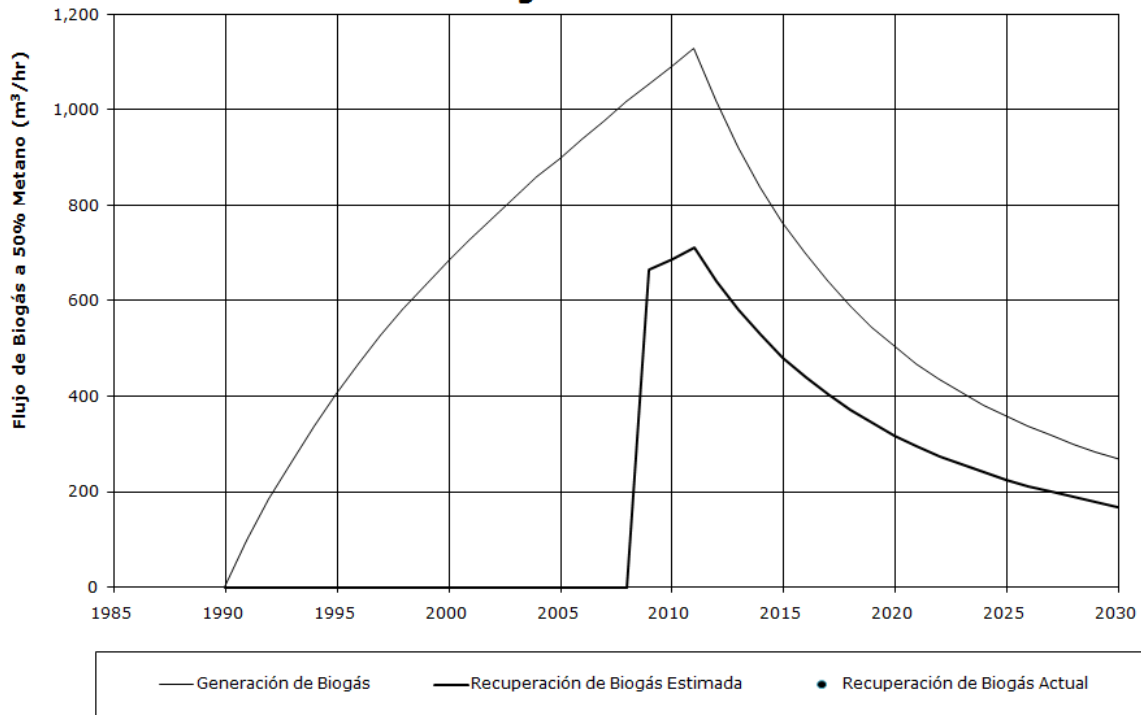


Figura 8. Ejemplo de Hoja de Resultados - Gráfica

4.0 REFERENCIAS

EPA, 1991. *Regulatory Package for New Source Performance Standards and III(d) Guidelines for Municipal Solid Waste Air Emissions*. Public Docket No. A-88-09 (proposed May 1991). Research Triangle Park, NC. U.S. Environmental Protection Agency.

EPA, 1998. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Volume 1: Stationary Point and Area Sources*, 5th ed., Chapter 2.4. Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC. U.S. Environmental Protection Agency.

EPA, 2005. *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide*. EPA-600/R-05/047 (May 2005), Research Triangle Park, NC. U.S. Environmental Protection Agency.

IPCC, 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Volume 5 (Waste), Chapter 3 (Solid Waste Disposal), Table 3.1.