

Noviembre del 2003

Manual de Usuario Modelo Mexicano de Biogás

Versión 1.0

Preparado para

SEDESOL
IIE
CONAE

Preparado en nombre de:

Brian Guzzone
Programa Landfill Methane Outreach
Agencia para la Protección del Ambiente (U.S. EPA)
Washington, D.C.

Duane Muller
Oficina de Desarrollo Económico, Agricultura y
Equipo de Cambio Climático
Agencia para el Desarrollo Internacional
de los Estados Unidos (USAID)
Washington, D.C.

Preparado por:

G. Alex Stege
SCS Engineers
Phoenix, AZ 85008
EPA Contract 68-W-00-110
Task Order 11

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

AGRADECIMIENTOS

Este manual para el usuario fue preparado con la ayuda de muchas personas entre ellas Brian Guzzone de la Agencia para la Protección del Ambiente (U. S. EPA), y Duane Muller de Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (USAID). También personas de México proveyeron valiosos comentarios entre ellos Luis Eduardo de Avila y Gustavo Guzmán de Estudios y Técnicas Especializadas en Ingeniería S. A. de C. V. (ETEISA), Rosiles Castro Gustavo de la Secretaria de Desarrollo Social (SEDESOL), José Luis Arvizu del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), e Ing. Francisco Márquez Mendoza de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE). El personal de SCS Engineers proveyó su experiencia técnica.

LIMITACIONES DE RESPONSABILIDAD

Este manual para el usuario fue preparado específicamente para México en nombre del Programa Landfill Methane Outreach de la U. S. EPA y la USAID. 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. SCS no garantiza la cantidad de biogás disponible y ninguna otra garantía expresada o implícita. Ningún individuo es beneficiario único del producto, su contenido o la información incluida en él. El uso de este reporte será a su propio riesgo. SCS no asume ninguna responsabilidad por la exactitud de la información obtenida, recolectada o proveída por otras personas.

RESUMEN

Este documento es el manual para el usuario del Modelo Mexicano de Biogás Versión 1.0 (modelo), utilizado para la estimación de biogás producido 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 U. S. EPA. El Modelo Mexicano de Biogás 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 Mexicano de Biogás 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, precipitación promedio anual y eficiencia del sistema de recolección. El modelo provee automáticamente valores para el índice de generación de metano (k) y la generación potencial de metano (L_0). Estos valores fueron desarrollados usando datos específicos de rellenos sanitarios de México y la relación de entre los valores de k y L_0 , y la precipitación promedio anual en algunos rellenos sanitarios de Estados Unidos. Los valores de k y L_0 varían dependiendo de la precipitación promedio anual y pueden utilizarse para producir proyecciones de generación de biogás para rellenos sanitarios municipales localizados en las diferentes regiones de México.

INDICE

Sección	Página
Agradecimientos	
Prefacio	
Resumen	
Lista de Figuras	
Lista de Tablas	
Glosario	
1.0 Introducción	1-1
1.1 Generación de Biogás	1-2
1.2 Recuperación de Biogás	1-4
1.3 El Modelo	1-5
2.0 Estimación de Generación y Recuperación de Biogás	2-1
2.1 Alimentación del Modelo	2-1
2.1.1 Estimación de la eficiencia de Sistema de Recuperación	2-5
2.2 Resultados del Modelo - Tabla	2-8
2.4 Resultados del Modelo - Gráfica	2-11
3.0 Referencias	3-1

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Alimentación del Modelo	2-1
2	Alimentación del Modelo (Continuación)	2-3
3	Ejemplo: Hoja de Resultados - Tabla	2-8
4	Ejemplo: Hoja de Resultados - Gráfica	2-10

GLOSARIO

Término	Definición
Eficiencia del Sistema de Recolección	El porcentaje de la generación del biogás que se estima que puede ser recuperado por el sistema de recolección.
Cobertura del Sistema de Recolección	El porcentaje estimado de la masa de residuos en el relleno sanitario que esta bajo la influencia de los pozos de extracción de biogás. La cobertura del sistema describe la fracción de gas recuperable y puede alcanzar el 100% si se cuenta con un sistema de recolección excelente (al contrario de la eficiencia del sistema de recolección que siempre esta por debajo del 100%).
Capacidad del Relleno Sanitario	La cantidad total de residuos que pueden ser depositados en el relleno sanitario.
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.
Índice de Generación de Metano (k)	k es la constante que determina el índice de generación de biogás estimado. El modelo de degradación de primer orden asume que los valores de k antes y después de la generación máxima de biogás son iguales. El valor de k esta en función del contenido de humedad y la disponibilidad de nutrientes, pH, y temperatura.
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.
Año de Clausura	El año en el que el relleno sanitario espera terminar las actividades de disposición.

1.0 INTRODUCCION

El Modelo Mexicano de Biogás (modelo) provee una herramienta automática para la estimación de la generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios municipales en México. Este manual provee una introducción al modelo e instrucciones paso-a-paso para el uso del modelo. El modelo fue desarrollado por SCS Engineers bajo un contrato con el Programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la U. S. EPA.

El biogás es generado por la descomposición de residuos en un relleno sanitario, y puede ser recuperado bajo la operación de un sistema de recuperación de biogás construido en el mismo relleno sanitario. La siguiente información es necesaria para estimar la generación y recuperación del biogás en un relleno sanitario. (ver Glosario para mayor información):

- Capacidad de diseño del relleno sanitario;
- La cantidad de residuos depositados en el relleno sanitario, 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.

El método utiliza una ecuación de degradación de primer orden que asume que la generación de biogás llega a su máximo después de un periodo de tiempo antes de la generación de metano. El

modelo asume que el período es de un año desde la colocación de los residuos y el comienzo de la generación de biogás. El modelo asume que por cada unidad de residuos, después de un año la generación disminuye exponencialmente mientras la fracción orgánica de los residuos es consumida.

Para sitios donde se conocen los índices de disposición año con año, el modelo estima la generación de biogás en un año dado usando la siguiente ecuación publicada en el Código 40 de Leyes Federales de los Estados Unidos, Parte 60 Sección WWW (40 CFR 60. Subpart WWW):

$$Q_M = \sum_{i=1}^n 2 k L_o M_i (e^{-kt_i})$$

Donde: $\sum_{i=1}^n$ = 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/Mg);

M_i = Masa de residuos sólidos dispuestos en el año i (Mg);

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 través de un año. Proyecciones para años múltiples son desarrolladas variando la proyección del anual y luego iterando la ecuación. El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales).

Con la excepción de los valores de k y L_o , el modelo mexicano de biogás requiere datos específicos del relleno en cuestión para producir las proyecciones de generación. El modelo

proporciona los valores de k y L_0 . Los valores son calculados basándose en la información recolectada de rellenos sanitarios representativos en México y la relación entre los valores de k y L_0 observados en rellenos sanitarios de los Estados Unidos. Los valores de k y L_0 varían dependiendo de la precipitación anual y podrán ser usados para producir proyecciones de generación de biogás en rellenos sanitarios localizados en las diferentes regiones de México.

La EPA 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, la disponibilidad de nueva información hará posible la calibración del modelo y el desarrollo de unos valores de k y L_0 mejores.

Cualquier pregunta y/o comentario referente al Modelo Mexicano de Biogás deberán ser dirigidas a Brian Guzzone del Programa LMOP de la U. S. EPA vía telefónica al (202) 564-2666, o vía correo electrónico a Guzzone.Brian@epamail.epa.gov.

1.1 Generación de Biogás

El Modelo Mexicano de Biogás estima generación de biogás producida por la degradación de desechos en rellenos sanitarios. La descomposición anaeróbica de los desechos en los rellenos sanitarios causa generación de biogás. El modelo asume que la composición del biogás es aproximadamente 50 por ciento metano (CH_4) y 50 por ciento otros gases entre ellos: dióxido de carbono (CO_2) y trazos de otros componentes.

Este modelo utiliza una ecuación de degradación de primer grado y estima volumen de generación de biogás en metros cúbicos por minuto (m^3/min) y en metros cúbicos por hora (m^3/hr). También estima el contenido de energía en el biogás generado en billones de joules por año (G J/año). La generación de biogás es estimada multiplicando la generación de metano por dos (Se asume que el biogás esta compuesto de 50% metano y 50% dióxido de carbono). La generación de metano es estimada usando dos parámetros: (1) L_0 o Generación Potencial de Metano y (2) k o Índice de Generación de Metano. Se asume que el índice de generación de metano esta a su máximo al momento clausura o al momento de colocar los residuos finales en el relleno sanitario. A pesar de que el modelo permite la alimentación de los valores de L_0 y k derivados con información propia del relleno sanitario (Los valores de L_0 y k pueden ser desarrollados en rellenos sanitarios con sistemas de recuperación de biogás, calibrando el modelo con los datos de recuperación de biogás actuales), es recomendado que se utilicen los valores que el modelo calcula automáticamente.

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 es en $año^{-1}$, esto significa que el valor de k describe la generación de biogás producida por la degradación de los residuos dispuestos en un relleno sanitario en un año. 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 (después que el relleno sanitario es clausurado) a través del tiempo. El valor de k esta 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. Los valores de k obtenidos de datos de

rellenos sanitarios de los Estados Unidos varían entre 0.003 a 0.21 por año (EPA, 1991a). Estos valores fueron determinados con modelos teóricos haciendo pruebas de campo. Al menos que se cuente con valores específicos de k del relleno sanitario en cuestión, el modelo calculará automáticamente este valor. Los valores siguientes son valores de k usados por el modelo, dependiendo de la precipitación promedio anual en la región del relleno sanitario:

TABLE 1: INDICE DE GENERACION DE METANO (k)

PRECIPITACION PROMEDIO ANUAL (mm/año)	k (por año)
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) solo depende en el 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 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 (ningún límite de tiempo está especificado). Los valores teóricos L_0 varían entre 6.2 y 270 m^3/Mg de residuos (EPA, 1991b). Al menos que se cuente con valores específicos de L_0 para el relleno sanitario en cuestión, los valores de L_0 serán calculados automáticamente por el modelo. Los siguientes valores de L_0

serán usados por el modelo, dependiendo de la precipitación promedio anual de la región donde se encuentra localizado el relleno sanitario:

TABLA 2: GENERACION POTENCIAL DE METANO (L₀)

PRECIPITACION PROMEDIO ANNUAL (mm/año)	L₀ (m³/ton)
0 – 249	60
250 – 499	80
≥ 500	84

1.2 Recuperación de Biogás

El biogás generado en rellenos sanitarios puede ser capturado utilizando un sistema de recolección de biogás que usualmente quema el gas por medio de quemadores. Alternativamente el gas recuperado puede usarse de diferentes maneras. Por ejemplo: Producción de energía eléctrica a través del uso de generadores de combustión interna, turbinas, o microturbinas o puede utilizarse como combustible en calentadores de agua u otras instalaciones.

Además de los beneficios energéticos en el uso del biogás, la recolección y control del biogás generado ayuda a reducir emisiones atmosféricas contaminantes. La U. S. EPA ha determinado que las emisiones de biogás provenientes de los rellenos sanitarios causan o contribuyen significativamente a la anticipada contaminación atmosférica que puede causar problemas de salud y bienestar. Algunas de estas emisiones son consideradas carcinogénicas o con la posibilidad de que produzcan cáncer y otros efectos adversos a la salud. Algunas de las preocupaciones en el bienestar público son el mal olor y la posible migración del metano, en el relleno sanitario y sus alrededores, esto podría contribuir a explosiones o fuegos. También, el

metano emitido por los rellenos sanitarios es considerado un gas invernadero que contribuye al problema del cambio climático global.

El principal propósito del Modelo Mexicano de Biogás es proveer a propietarios o operadores de rellenos sanitarios con una herramienta para evaluar la factibilidad y beneficios de recuperar y usar el biogás generado. Para lograr este propósito, este modelo provee proyecciones de generación y recuperación de biogás. Las proyecciones de recuperación de biogás son obtenidas multiplicando las proyecciones de generación por la eficiencia del sistema de recolección.

1.3 El Modelo

El Modelo Mexicano de Biogás puede ser operado en los siguientes sistemas operativos: Windows 98[®], Windows 2000[®], o Windows XP[®]. El programa es una hoja de cálculo en Microsoft Excel[®], la cual permite al usuario considerable control en los cálculos y la apariencia de los resultados. El programa Excel[®] deberá estar abierto antes de poder utilizar el modelo. Una vez que Excel este listo, abrir el archivo llamado “Modelo Mexicano de Biogas V1.xls” siguiendo el siguiente procedimiento:

Seleccionar “File o Archivo” del menú principal; y luego “open o abrir,” y finalmente “open o abrir” cuando el archivo correcto ha sido seleccionado. El modelo tiene cuatro hojas que pueden ser vistas seleccionando el tabulador en la parte inferior correspondiente a la página que se quiere ver. Las cuatro páginas son las siguientes:

- “Hoja de Alimentación” es la hoja de alimentación;
- “Resultados-Tabla” es la hoja de resultados en forma tabular;

- “Resultados-Gráfica” es la hoja de resultados en forma gráfica, y
- “Hoja de Cálculo (NO CAMBIOS)” es la hoja que el modelo utiliza para hacer los cálculos.

Cuando se utilice el modelo, la mayor parte de la alimentación y edición tomará lugar en la Hoja de Alimentación. Algunas ediciones serán necesarias en las hojas de resultados. La Hoja de Cálculo no deberá sufrir ningún tipo de cambios, y esta protegida con una clave para prevenirlos.

2.0 ESTIMACION DE GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS

2.1 Alimentación del Modelo

La alimentación del modelo se efectuará en la Hoja de Alimentación. Las celdas en texto rojo requieren ser alimentadas con valores específicos. Las celdas en amarillo no deberán ser modificadas. Los siguientes valores deberán ser alimentados para obtener resultados aceptables:

Paso 1: Nombre y lugar del relleno sanitario (Celda A4 – para más detalle, ver figura 1).

Lo que se alimente en esta celda aparecerá automáticamente en el encabezado de la hoja de resultados en forma tabular.

Paso 2: El año de apertura (Celda B5 – para más detalle ver Figura 1). Lo que se alimente en esta celda será usado para establecer los años de disposición en las hojas de resultados.

Paso 3: Precipitación promedio mnual en mm/año en la región donde se ubica el relleno sanitario (Celda B7 – para más detalle ver Figura 1). Este valor puede ser obtenido investigando datos de precipitación del pueblo o ciudad más cercana al relleno sanitario o en el siguiente sitio web: www.worldclimate.com. Este valor será usado para seleccionar automáticamente los valores de k y Lo.

FIGURE 1. HOJA DE ALIMENTACION

	A	B	C
1	MODELO DE BIOGAS MEXICO		
2	ALIMENTACION DE PARAMETROS:		
3	GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS		
4	NOMBRE, DIRECCION Y CUIDAD DEL RELLENO SANITARIO		
5	Año de Apertura	1991	
6			
7	Precipitación Promedio Anual	500	mm/año
8	Contenido de Metano en el Biogás:	50%	
9	Índice de Generación de Metano (k)	0.065	l/año
10	Generación Potencial de Metano (L ₀):	84	m ³ /ton
11	L ₀ Equivalente en Unidades Inglesas:	2690	ft ³ /ton

Paso 4: Toneladas dispuestas por año (Celda B16 – B115 - para más detalle ver Figura 1).

- Si el historial de disposición es desconocido, se deberá calcular el índice de disposición anual, dividiendo la capacidad de diseño (en toneladas) por el número de años de disposición.
- Alimentar el valor en la Celda B16.
- El valor que se alimente en la Celda B16 será automáticamente copiado a las celdas inferiores hasta la Celda B76, la cual tiene el valor de cero “0”.
- Alimentar “0” en las celdas que corresponden a los años después del año de clausura. Si el historial de disposición es mayor a los 60 años, La celda B76 tendrá que ser modificada.

Paso 5: Estimación de la eficiencia del sistema recolección por cada año después de que el sistema ha sido o planea ser instalado (Celda D16 – D115; ver Figura 2).

- La Hoja de alimentación presenta 0% de eficiencia del sistema de recolección por

los primeros 10 años de operación del relleno sanitario y 60% para los años restantes.

- La eficiencia del sistema de recolección en los años pasados deberá mostrar el estado del sistema de recolección en esos años.
- La eficiencia del sistema de recolección en los años futuros deberá mostrar las estimaciones del sistema de recolección por construir en el futuro.
- La sección 2.1.1 provee información adicional para estimar la eficiencia del sistema.

Paso 6: Recuperación actual en metros cúbicos por hora (para rellenos sanitarios con sistemas de recolección activos). Alimentar en Celda E16 – E115 (ver Figura 2, para mas detalle) El flujo promedio anual total en la estación de quemado y/o la planta de energía (Este dato no es la suma de los flujos individuales de cada pozo). Ajustar todos los flujos a 50% de metano, multiplicando el flujo medido por el contenido de metano medido en el biogás y luego dividiendo el resultado por 50%. Los números alimentados en estas celdas serán presentados en la hoja de resultados en forma gráfica. Se dejara la celda en blanco para los años en que el flujo fue cero “0”.

Ecuación para ajustar el contenido de metano a 50%:

$$\text{Flujo Medido} \times \frac{\text{Contenido de CH}_4 \text{ Medido}(\%)}{\text{Metano 50\%}} = \text{Flujo a 50\% de metano}$$

FIGURA 2. ALIMENTACIÓN DEL MODELO (Continuación)

	A	B	C	D	E
15	Año	Toneladas Métricas Depositadas	Toneladas Métricas Acumuladas	Eficiencia del Sistema de Recolección	Recuperación Actual
16	1991	50,000	50,000	0%	
17	1992	50,000	100,000	0%	
18	1993	50,000	150,000	0%	
19	1994	50,000	200,000	0%	
20	1995	50,000	250,000	0%	
21	1996	50,000	300,000	0%	
22	1997	50,000	350,000	0%	
23	1998	50,000	400,000	0%	
24	1999	50,000	450,000	0%	
25	2000	50,000	500,000	0%	
26	2001	50,000	550,000	60%	280
27	2002	50,000	600,000	60%	300
28	2003	50,000	650,000	60%	320
29	2004	50,000	700,000	60%	
30	2005	50,000	750,000	60%	
31	2006	50,000	800,000	60%	
32	2007	50,000	850,000	60%	
33	2008	50,000	900,000	60%	
34	2009	50,000	950,000	60%	
35	2010	50,000	1,000,000	60%	
36	2011	50,000	1,050,000	60%	
37	2012	50,000	1,100,000	60%	
38	2013	50,000	1,150,000	60%	

2.1.1 Estimación de la Eficiencia del Sistema de Recolección.

La eficiencia del sistema de recolección es medida de la habilidad que tiene el sistema para capturar el gas generado por el relleno sanitario. 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 o utilizado para uso beneficioso. A pesar de que la captura de biogás en los rellenos sanitarios puede ser medida, la generación de biogás actual en el relleno no puede ser medida (esta es la razón por la que este modelo para estimar generación existe); debido a esto existe una incertidumbre considerable en cual puede ser la eficiencia de recolección que un sistema puede alcanzar.

En respuesta a la incertidumbre concerniente a la eficiencia del sistema de recolección, la U. S. EPA (EPA, 1998) ha publicado lo que cree son eficiencias razonables para sistemas de recolección instalados en rellenos de los Estados Unidos y que cumplen con los estándares americanos de diseño. De acuerdo con la U. S. EPA, la eficiencia de recolección en estos rellenos típicamente varían entre 60% y 85%, con un promedio de 75%. La Tabla 3 – Eficiencia de Recolección en Rellenos Sanitarios muestra un ejemplo demostrando como determinar la eficiencia de recolección usando las características del relleno sanitario y deduciendo porcentajes en rellenos sanitarios que no cuenten con estas características. Por ejemplo, Si un relleno sanitario cuenta con todas las características listada, la eficiencia estimada sería 85%.

TABLA 3: EFICIENCIAS DE RECOLECCION EN RELLENOS SANITARIOS

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.	✓			
2	Cubierta diaria aplicada al los residuos dispuestos. Rellenos sanitarios clausurados deberán tener una cubierta final construida en los primeros años de clausura.	✓	✓		
3	La migración del biogás fuera del relleno sanitario es insignificante. (Los rellenos sanitarios de los Estados Unidos requieren el monitoreo de migración del biogás)	✓	✓	✓	
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.	✓	✓	✓	✓
5	Un sistema de recolección de biogás operando eficientemente con todos los pozos de extracción operables y en buen funcionamiento (ejemplo: relativamente libre de líquidos que afecten la extracción del biogás).	✓	✓	✓	✓

Notar que el rango de las eficiencias de recolección que la EPA considera alcanzables implican que siempre una porción (mínimo 15%) del biogás generado que se escapara de ser recolectado, independientemente del lo bien diseñado que este el sistema. En seguida se presentan los pasos recomendados para ajustar la eficiencia de recolección:

- La evaluación comienza asumiendo 85% como eficiencia de recolección si el relleno sanitario cumple con las cinco (5) características listadas en la Tabla No.3 y descontando un porcentaje si el relleno no cumple con alguna de las características.

- Se sugiere 10% o menos si el relleno no cumple con la característica No. 1, 10 % o menos si no cumple con la característica No. 2, y 5% o menos por no cumplir con la característica No. 3 (por ejemplo: se descontará 25% si el relleno sanitario no cumple ninguna de las primeras tres características, ni aunque sea en parte).
- Para tomar en cuenta la No. 4, el descuento estimado deberá multiplicarse por la cobertura del sistema en la masa de residuos (ver la definición de cobertura del sistema de recolección en el glosario). Algunas sugerencias a considerar para evaluar la cobertura del sistema de recolección son presentadas mas adelante.
- El descuento final (Característica No. 5) involucra la evaluación de la operación del sistema de recolección tomando en cuenta el número de pozos en operación. Para determinar si un pozo es o no operable tendrá que ser basada en los datos de monitoreo de los pozos, incluyendo la presión en la cabeza del pozo (la presión deberá ser negativa), los contenidos de metano y oxígeno (contenido de metano por debajo de 40% y contenido de oxígeno mayor de 5% son indicación de que el aire se esta infiltrando en el pozo). Después de tomar en cuenta el funcionamiento de los pozos (ver abajo), se multiplica el porcentaje de pozos en operación por el valor calculado en los pasos anteriores para obtener la eficiencia de recolección..

La importancia de un pozo que no este funcionando bien deberá tomarse en cuenta para estimar el porcentaje de pozos en operación. Por ejemplo: un relleno sanitario con un pozo con problemas en la vecindad de otros pozos que funcionan bien causará un descuento menor que un pozo con problemas que no tenga pozos a su alrededor que ayuden a compensar la falta de este pozo.

La evaluación de la cobertura del sistema de recolección requiere un muy buen grado de familiaridad con el diseño del sistema. El espaciamiento y profundidad son factores muy importantes. A continuación se describen varios escenarios que deben ser considerados:

- Pozos profundos pueden extraer mas biogás de volúmenes grandes de residuos comparado con pozos menos profundos, esto es debido a que se les puede aplicar mas succión sin que el aire de la superficie se infiltre al sistema.
- Rellenos sanitarios con pozos verticales profundos (mas de 20 metros) pueden recolectar biogás de áreas con una densidad de pozos igual o menor a dos pozos por hectárea.
- Rellenos Sanitarios con pozos menos profundos requerirán mayor densidad de pozos, probablemente mayor a 2 pozos por hectárea para lograr una buena cobertura.
- A pesar de que rellenos sanitarios con una red de pozos densa pueden coleccionar mas biogás que rellenos sanitarios con redes de pozos mas espaciados, los rellenos sanitarios con redes de pozos mas espaciados típicamente coleccionan mas biogás por pozo (debido a la influencia que estos ejercen al volumen de residuos).

2.2 Resultados del Modelo – Tabla

Los resultados del modelo en forma tabular aparecen en la Hoja de Cálculo llamada “Resultados - Tabla” que con pocos cambios estará lista para impresión (ver Figura 3 en la siguiente página). El título de la tabla se ajusta al momento que el usuario alimenta la Hoja de Alimentación. La tabla provee la siguiente información:

- Los años de proyección empiezan con el año de apertura del relleno y terminan con el año que el usuario escoja.
- Indices de disposición anuales.
- Toneladas acumuladas de residuos dispuestas por cada año de proyección.
- Generación de biogás por cada año de proyección en metros cúbicos por minuto, metros cúbicos por hora y billones de joules (GJ) por año.
- Eficiencia del sistema de recolección por año de proyección.
- Recuperación de biogás por cada año de proyección en metros cúbicos por minuto, metros cúbicos por hora y billones de joules (GJ) por año.
- El contenido de metano utilizado en el modelo (in la mayoría de los casos será 50%).
- El valor de k utilizado por el modelo.
- El Valor de L_0 utilizado por el modelo.

La tabla esta programada para presentar hasta 100 años de generación y recuperación de biogás. La tabla muestra 60 años de información, los 40 años restantes esta ocultos. Dependiendo de la edad del relleno sanitario y de los años que le quedan de vida útil, el usuario querrá cambiar el número de año del información mostrada. Usualmente, las proyecciones hechas hasta el año 2030 serán adecuadas para la mayoría de los casos. Para ocultar renglones no necesarios. El usuario deberá seleccionar los renglones por ocultar, seleccionar del menú principal “Formato o Format,” luego “Renglón-Row,” y finalmente “Ocultar o Hide”. Para mostrar los reglones ocultos el usuario deberá seleccionar los renglones inmediatos arriba y debajo de los renglones ocultos, seleccionar del menú principal “Formato o Format,” luego “Renglón-Row,” y finalmente “Mostrar o Unhide”.

Para imprimir la tabla seleccionar del menú principal “Archivo-File” y luego “Imprimir o Print”

La tabla deberá imprimir correctamente.

FIGURE 3. EJEMPLO DE LA HOJA DE RESULTADOS - TABLA

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	PROYECCIONES DE GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS									
2	NOMBRE DEL RELLENO SANITARIO - CIUDAD, ESTADO									
3										
4										
5		Indice de	Residuos				Eficiencia		Recuperacion de Biogás del	
6		Disposición	Acumulados	Generación de Biogás			Sistema de	Sistema Existente y Sistema Planeado		
7	Año	(ton/año)	(ton)	(m3/min)	(m3/hr)	(mmBtu/año)	(%)	(m3/min)	(m3/hr)	(mmBtu/año)
8	1991	50,000	50,000	0.0	0	0	0%	0.0	0	0
9	1992	50,000	100,000	1.0	62	9,753	0%	0.0	0	0
10	1993	50,000	150,000	2.0	121	18,891	0%	0.0	0	0
11	1994	50,000	200,000	2.9	175	27,455	0%	0.0	0	0
12	1995	50,000	250,000	3.8	227	35,480	0%	0.0	0	0
13	1996	50,000	300,000	4.6	275	43,000	0%	0.0	0	0
14	1997	50,000	350,000	5.3	320	50,046	0%	0.0	0	0
15	1998	50,000	400,000	6.0	362	56,649	0%	0.0	0	0
16	1999	50,000	450,000	6.7	401	62,837	0%	0.0	0	0
17	2000	50,000	500,000	7.3	438	68,635	0%	0.0	0	0
18	2001	50,000	550,000	7.9	473	74,068	60%	4.7	284	44,441
19	2002	50,000	600,000	8.4	506	79,159	60%	5.1	303	47,496
20	2003	50,000	650,000	8.9	536	83,930	60%	5.4	322	50,358
21	2004	50,000	700,000	9.4	565	88,401	60%	5.6	339	53,041
22	2005	50,000	750,000	9.9	592	92,590	60%	5.9	355	55,554
23	2006	50,000	800,000	10.3	617	96,516	60%	6.2	370	57,910
24	2007	50,000	850,000	10.7	640	100,195	60%	6.4	384	60,117
25	2008	50,000	900,000	11.0	662	103,642	60%	6.6	397	62,185
26	2009	50,000	950,000	11.4	683	106,872	60%	6.8	410	64,123
27	2010	50,000	1,000,000	11.7	702	109,899	60%	7.0	421	65,939
28	2011	50,000	1,050,000	12.0	720	112,735	60%	7.2	432	67,641
29	2012	50,000	1,100,000	12.3	737	115,393	60%	7.4	442	69,236
30	2013	50,000	1,150,000	12.6	753	117,884	60%	7.5	452	70,730
31	2014	50,000	1,200,000	12.8	768	120,218	60%	7.7	461	72,131
32	2015	50,000	1,250,000	13.0	782	122,405	60%	7.8	469	73,443
33	2016	50,000	1,300,000	13.3	795	124,454	60%	8.0	477	74,672
34	2017	50,000	1,350,000	13.5	807	126,374	60%	8.1	484	75,825
35	2018	50,000	1,400,000	13.6	819	128,174	60%	8.2	491	76,904
36	2019	50,000	1,450,000	13.8	830	129,860	60%	8.3	498	77,916
37	2020	50,000	1,500,000	14.0	840	131,440	60%	8.4	504	78,864
38	2021	50,000	1,550,000	14.2	849	132,921	60%	8.5	509	79,753
39	2022	50,000	1,600,000	14.3	858	134,309	60%	8.6	515	80,585
40	2023	50,000	1,650,000	14.4	866	135,609	60%	8.7	520	81,365
41	2024	50,000	1,700,000	14.6	874	136,827	60%	8.7	524	82,096
42	2025	50,000	1,750,000	14.7	881	137,969	60%	8.8	529	82,781
43	2026	50,000	1,800,000	14.8	888	139,039	60%	8.9	533	83,423
44	2027	50,000	1,850,000	14.9	895	140,041	60%	8.9	537	84,025
45	2028	50,000	1,900,000	15.0	901	140,981	60%	9.0	540	84,588
46	2029	50,000	1,950,000	15.1	906	141,861	60%	9.1	544	85,117
47	2030	50,000	2,000,000	15.2	912	142,686	60%	9.1	547	85,612
48	2031	50,000	2,050,000	15.3	916	143,459	60%	9.2	550	86,075
49	2032	50,000	2,100,000	15.4	921	144,183	60%	9.2	553	86,510
50	2033	50,000	2,150,000	15.4	925	144,862	60%	9.3	555	86,917
51	2034	50,000	2,200,000	15.5	929	145,498	60%	9.3	558	87,299
52	2035	50,000	2,250,000	15.6	933	146,094	60%	9.3	560	87,657
53	2036	50,000	2,300,000	15.6	937	146,653	60%	9.4	562	87,992
54	2037	50,000	2,350,000	15.7	940	147,176	60%	9.4	564	88,306
55	2038	50,000	2,400,000	15.7	943	147,667	60%	9.4	566	88,600
56	2039	50,000	2,450,000	15.8	946	148,126	60%	9.5	568	88,876
57	2040	50,000	2,500,000	15.8	949	148,557	60%	9.5	569	89,134
58	2041	50,000	2,550,000	15.9	952	148,960	60%	9.5	571	89,376
59	2042	50,000	2,600,000	15.9	954	149,338	60%	9.5	572	89,603
60	2043	50,000	2,650,000	15.9	956	149,693	60%	9.6	574	89,816
61	2044	50,000	2,700,000	16.0	958	150,025	60%	9.6	575	90,015
62	2045	50,000	2,750,000	16.0	960	150,336	60%	9.6	576	90,202
63	2046	50,000	2,800,000	16.0	962	150,628	60%	9.6	577	90,377
64	2047	50,000	2,850,000	16.1	964	150,901	60%	9.6	578	90,540
65	2048	50,000	2,900,000	16.1	966	151,157	60%	9.7	579	90,694
66	2049	50,000	2,950,000	16.1	967	151,397	60%	9.7	580	90,838
67	2050	50,000	3,000,000	16.1	969	151,622	60%	9.7	581	90,973
108	NOTAS:									
109	Contenido de Metano Ajustado a:				50%					
110	Indice de Generación de Metano (k):				0.065 /año					
111	Generación Potencial de Metano (L ₀):				84 metros cúbicos/ton					

2.3 Hoja de Resultados – Gráfica

El Modelo provee resultados en forma gráfica en la Hoja de Resultados – Gráfica (ver Figura 4 en la siguiente página). Los datos mostrados en la gráfica son los siguientes:

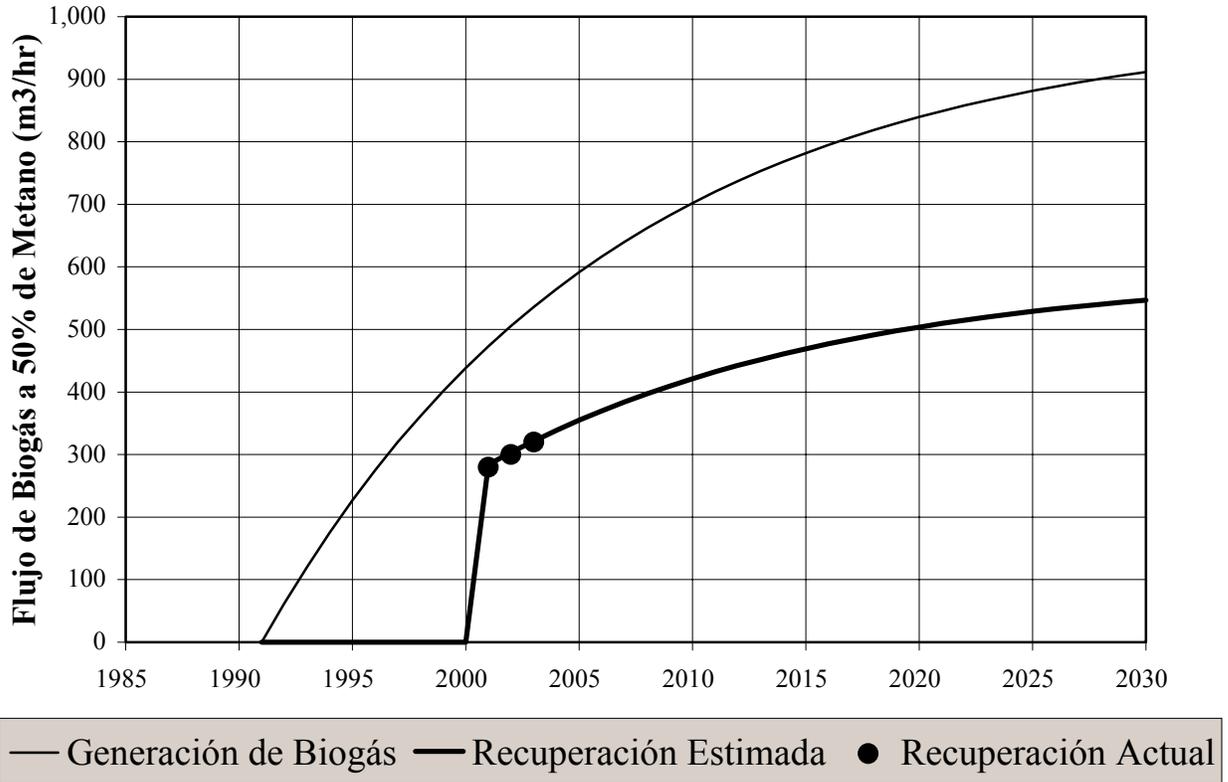
- Generación de biogás para cada año de proyección en metros cúbicos por minuto.
- Recuperación de biogás por cada año de proyección en metros cúbicos por minuto.
- Datos actuales de recuperación (historial) en metros cúbicos por minuto.

El título de la gráfica necesitará ser editado tal y como se expresa en la nota que se encuentra debajo de la gráfica. Si el usuario no quiere mostrar la proyección hasta el 2030, el eje “x” necesitara edición. Para editarlo, el usuario deberá seleccionar el eje “x” en la gráfica y luego seleccionar “Formatear o Format” y luego “eje-x o x-axis”. Una vez la ventana de Formato este abierta. Seleccionar el tabulador de “Escala o Scale” para modificar los limites del eje x. También, debido a que la gráfica esta enlazada a la tabla, la gráfica mostrará los años de proyección que la tabla muestre (dados los limites del eje x). No mostrará ninguno de los renglones ocultos. Si la tabla muestra años fuera del rango del eje x , la línea de la gráfica se extenderá fuera de los limites de la gráfica. Para corregir esto, el usuario deberá ocultar los renglones extras o editar el rango del eje x para mostrar los años adicionales.

Para imprimir la gráfica, seleccionar la gráfica y luego seleccionar del menú principal

“Archivo o File”, luego Imprimir o Print”. Si el usuario no selecciona la gráfica antes de imprimir, la nota debajo de la gráfica también aparecerá en la impresión.

FIGURE 4. EJEMPLO DE LA HOJA DE RESULTADOS - GRAFICA



3.0 REFERENCIAS

EPA, 1991a. *Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills. Background Information for Proposed Standards and Guidelines*, EPA-450/3-90-011a (NTIS PB91-197061), Research Triangle Park, NC. U.S. Environmental Protection Agency.

EPA, 1991b. *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.