



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

31
ZED

FACULTAD DE INGENIERIA

APLICACION DEL METODO DE DIFERENCIAS
FINITAS PARA LA MODELACION DE FLUJO
DE BIOGAS EN RELLENOS SANITARIOS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
CESAR MAURICIO CALVO LUGO



MEXICO, D. F.

1993

FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-262/93

Señor
CESAR MAURICIO CALVO LUGO
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **DR. ALBERTO ALCARAZ PAZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"APLICACION DEL METODO DE DIFERENCIAS FINITAS PARA LA MODELACION DE FLUJO DE BIOGAS EN RELLENOS SANITARIOS"

- I. INTRODUCCION
- II. DESECHOS SOLIDOS Y RELLENOS SANITARIOS
- III. BIOGAS EN RELLENOS SANITARIOS
- IV. METODO DE DIFERENCIAS FINITAS APLICADO A LA ECUACION CARACTERISTICA DE FLUJO DE BIOGAS
- V. EJEMPLO DE APLICACION
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 24 de marzo de 1995.
EL DIRECTOR.


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

M. JMCS/RCR*nl

Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado a Irma Lugo Román para quien estoy seguro representará, en lo que corresponde a uno de sus hijos, la culminación de su esfuerzo como madre.

Y a mis hermanos Irma y Germán.

Agradecimientos

Al Dr. Alberto Alcaraz Paz agradezco infinitamente su invaluable ayuda, sus sugerencias y su paciencia durante la elaboración de la tesis

A mi amigo Ricardo Sandoval por haber escuchado siempre con atención las ideas sobre el tema y las locas ideas sobre la vida.

A todos aquellos que a través de sus comentarios y libros me dieron acceso a sus conocimientos e información relacionada con el tema; en alguna forma son parte de este trabajo.

Índice general.

<i>Dedicatoria</i>	i
<i>Agradecimientos</i>	ii
<i>Índice general</i>	iii
Introducción.	vi
I. Desechos sólidos y rellenos sanitarios.	1
A. Características generales de los desechos sólidos.	2
1. Clasificación.	2
2. Composición física.	3
3. Características físicas.	4
4. Composición química.	6
B. Tratamiento y disposición.	9
C. Métodos de disposición.	10
1. Rellenos sanitarios.	10
2. Incineración.	11
3. Generación de composta o composteo.	12

D. Rellenos sanitarios.	13
1. Ciclo de vida de un relleno.	14
E. Marco jurídico.	17
II. Biogas en rellenos sanitarios.	21
A. Biogas.	22
1. Definición.	22
2. Principales componentes.	22
3. Obtención y aplicación.	26
B. Flujo de biogas.	30
1. Generación de biogas.	30
2. Factores que afectan la formación de metano.	33
3. Flujo de biogas.	37
4. Ecuación diferencial que establece el flujo de biogas.	40
III. Método de diferencias finitas aplicado a la ecuación característica de flujo de biogas.	44
A. Solución de la ecuación característica del problema.	44
1. Modelo de diferencias finitas.	44
2. Consideraciones básicas.	46
B. Programa de computadora.	51
1. Diagrama de flujo.	51
2. Listado del programa.	55
3. Variables utilizadas en el programa.	66

IV. Ejemplo de aplicación.	68
A. Ejemplo No. 1.	68
1. Condiciones iniciales.	68
2. Resultados.	73
B. Ejemplo No. 2.	79
1. Condiciones iniciales.	79
2. Resultados.	88
V. Conclusiones.	93
Referencias.	96

Introducción.

En la actualidad la gran cantidad de basuras generadas, en los centros poblacionales, constituye un grave problema en cuanto a su disposición; cada día es más difícil contar con los espacios disponibles que, al ser utilizados como sitios de disposición de residuos sólidos, aseguren el menor impacto ambiental.

El problema de contaminación por residuos sólidos no ha recibido la debida atención, si bien, países como Estados Unidos, Francia, Alemania, etc., han desarrollado técnicas diversas para el tratamiento de los desechos sólidos, países como el nuestro no presentan una evolución relevante en cuanto a la disposición final de las basuras.

Como tratamiento de residuos sólidos, el relleno sanitario constituye el método más empleado; en la práctica, la necesidad de mejorar el tratamiento y la disposición de basuras ha provocado la inquietud por conocer el comportamiento de los desechos confinados.

En esta forma, la idea básica de mi trabajo de tesis es la utilización de una herramienta matemática y computacional que permita conocer y modelar con mayor detalle el comportamiento de los gases generados en un relleno sanitario.

La aplicación del Método de Diferencias Finitas permite incluir un número considerable de variables; la simulación del flujo de biogas en un relleno sanitario permite relacionar las características físicas, químicas y biológicas del sitio en estudio con mayor rapidez y exactitud.

Como en toda propuesta, es necesario definir el marco teórico sobre el cual se elabora dicha propuesta. La primera parte de la tesis está constituida por los Capítulos I y II: en el primero, siguiendo un proceso deductivo, presento los conceptos y las definiciones relativos al tema de desechos sólidos y de rellenos sanitarios; en el segundo, indico las características del biogas de rellenos sanitarios (definiciones, composición, condiciones de generación, etc.) y defino las

variables que sirven de apoyo para establecer la ecuación diferencial del flujo de gases en un rollo sanitario.

La segunda parte está integrada por: el Capítulo III, en el cual presento el desarrollo de la solución de la ecuación característica del problema e incluyo el programa de computadora empleado; y por el Capítulo IV, en el que incluyo dos ejemplos de aplicación.

Finalmente, menciono las conclusiones obtenidas y propongo el camino que considero conveniente seguir en el futuro.

I. Desechos sólidos y rellenos sanitarios.

En la historia del hombre, el tratamiento y la disposición de los desechos sólidos ha quedado supeditado a factores políticos, administrativos, económicos, etc.; hoy en día, debemos considerar un factor adicional: el ambiental. Como medio para preservar la especie humana, la nueva conciencia ecológica marca como objetivos primordiales la conservación del medio ambiente y el mejor aprovechamiento de los recursos naturales.

El desarrollo tecnológico actual en el área de ingeniería ambiental, y en particular, en el tratamiento de los desechos sólidos ha progresado en forma lenta. Los cambios y los avances logrados no son otra cosa que los requerimientos mínimos, y a veces ni siquiera eso, necesarios para alejar de nosotros aquello que nos resulta molesto. Esto es, sólo se ha actuado conforme se ha acrecentado el problema.

El tratamiento de los desechos sólidos, ya sean domiciliarios, industriales, rurales, peligrosos, etc., debe cumplir con ser una solución integral que contemple el mayor número de aspectos, es decir, debe ser una solución que fundamente el estudio de los métodos de tratamiento disponibles considerando las repercusiones que éstos tienen en aspectos sociales, económicos, de salud pública y de protección al ambiente entre otros.

En la actualidad el tratamiento de los desechos sólidos ha evolucionado y se han diversificado las opciones de tratamiento. De cualquier forma el método de relleno sanitario sigue siendo una solución viable en algunos casos y una solución obligada la mayoría de las veces.

A continuación se detallan aspectos generales de los desechos sólidos que pueden encontrarse en un relleno sanitario.

A. Características generales.

1. Clasificación.

Los residuos sólidos se pueden clasificar de diferentes maneras:

- a) De acuerdo con el grado de peligrosidad:
 - Desechos sólidos peligrosos
 - Desechos sólidos no peligrosos

- b) De acuerdo con su origen (lugar de generación):
 - Industriales
 - Domiciliarios
 - Comerciales
 - De servicios

- c) De acuerdo a sus características químicas:
 - Orgánicos
 - Inorgánicos

- d) De acuerdo a sus características físicas:
 - Plásticos
 - Metales
 - Madera
 - Vidrio
 - Cartón
 - Papel
 - Etc.

Todas las clasificaciones mencionadas son convenientes en la realización de cualquier proyecto ya que permiten lograr una mayor visión de la composición de la basura generada en una zona determinada.

2. Composición física.

Los componentes que comúnmente forman parte de los desechos sólidos cuya disposición final sea un relleno sanitario, son los siguientes:

- Desechos de alimentos
- Residuos de jardinería
- Metales ferrosos
- Metales no ferrosos
- Plásticos
- Piel
- Hule
- Madera
- Vidrio
- Cascajo
- Tela
- Cartón
- Papel
- Tierra
- Latas

Los datos sobre la composición física de los desechos sólidos son importantes en la selección y en la operación de equipo y de instalaciones, en la valoración de la factibilidad de reuso y recuperación de energía, y en el análisis y diseño de instalaciones para disposición.

El porcentaje de cada uno de los componentes de los desechos sólidos varía de acuerdo a la localidad, a la estación del año, a las condiciones económicas de la población generadora y a muchos otros factores.

Composición física de desechos sólidos	
Componentes	Porcentaje del peso
Desechos de alimentos	6 - 26
Papel	25 - 45
Cartón	3 - 15
Plásticos	2 - 6
Textiles	0 - 4
Hule	0 - 2
Piel	0 - 2
Residuos de jardinería	0 - 20
Madera	1 - 4
Vidrio	4 - 16
Latas	2 - 8
Metales no ferrosos	0 - 1
Metales ferrosos	1 - 4
Cenizas, polvo, etc.	0 - 10

Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H. y Eliassen R. (13)

3. Características físicas.

Contenido de humedad (ω).

En residuos sólidos municipales el contenido de humedad varía entre 15% y 40% dependiendo de la composición de los desechos, la estación del año y las condiciones climáticas del lugar.

El contenido de humedad de los desechos sólidos se expresa como un porcentaje, el cual puede estar referido tanto al peso húmedo como al peso seco de los desechos.

$$\text{Contenido de Humedad} = \frac{(Wh - Ws)}{Ws} \times 100$$

en donde:

Wh = Peso húmedo de los desechos.

Ws = Peso seco de los desechos.

Contenido de humedad de desechos sólidos	
Componentes	Humedad (%)
Desechos de alimentos	50 - 80
Papel	4 - 10
Cartón	4 - 8
Plásticos	1 - 4
Textiles	6 - 15
Hule	1 - 4
Piel	8 - 12
Residuos de jardinería	30 - 80
Madera	15 - 40
Vidrio	1 - 4
Latas	2 - 4
Metales no ferrosos	2 - 4
Metales ferrosos	2 - 6
Cenizas, polvo, etc.	6 - 12

Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H. y Eliassen R. (13)

Densidad (γ).

Una característica importante de los desechos sólidos municipales es la densidad.

La densidad de los desechos antes de su colocación en el sitio de relleno dependerá de factores como son: la ubicación geográfica, la estación del año y el tiempo de almacenaje, así como también, el equipo (vehículos de compactación) utilizado en la recolección de los desechos municipales.

La densidad in situ depende del espesor de las capas de relleno y de la profundidad a la que se encuentren. En general el valor de la densidad varía entre 150 y 350 Kg/m³ en residuos sin compactar, de 350 a 550 Kg/m³ en residuos con un grado de compactación bajo y de 800 a 1000 Kg/m³ en residuos con un grado de compactación alto.

Otras características relacionadas con la densidad son:

- a) Relación de vacíos (e). Cuyo valor varía de 1 en desechos bien compactados a 15 en desechos no compactados.
- b) Contenido de humedad (ω). En el caso de desechos bien compactados tiene un valor cercano al 40% y en desechos sin compactar entre 10 y 15%.

Densidad de desechos sólidos sin compactar	
Componentes	Densidad (kg/m ³)
Desechos de alimentos	128.15 - 480.57
Papel	32.04 - 128.15
Cartón	32.04 - 81.10
Plásticos	32.04 - 128.15
Textiles	32.04 - 96.11
Hule	96.11 - 192.23
Piel	96.11 - 256.30
Residuos de jardinería	64.08 - 224.27
Madera	128.15 - 320.38
Vidrio	160.19 - 480.57

Continúa

Continuación

Componentes	Densidad (kg/m³)
Latas	48.06 - 160.19
Metales no ferrosos	64.08 - 240.29
Metales ferrosos	128.15 - 1121.33
Cenizas, polvo, etc.	320.38 - 961.14

Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H. y Eliassen R. (13)

4. Composición química.

El estudio de la composición química de los residuos es importante en la evaluación de alternativas de procesamiento y en opciones de recuperación. Si se considera que los desechos son una combinación de material semi-húmedo y materiales no combustible, y que éstos pueden ser usados como combustible, las características más importantes que es necesario conocer son:

a) Composición aproximada.

- Humedad (perdida a 105°C en una hora).
- Materia volátil (pérdida adicional sobre ignición a 950°C).
- Ceniza (residuo después de quemar).
- Determinación de carbono (remanente).

Componentes de desechos sólidos (análisis aproximado)	
Componente	Rango (%)
Humedad	15 - 40
Materia volátil	40 - 60
Carbón	5 - 12
Vidrio, metal, cenizas	15 - 30

Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H. Eliassen R. (13)

b) Punto de fusión de la ceniza.

c) Análisis final, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y ceniza.

Análisis final de los desechos sólidos (% de peso seco)						
Componentes	Carbón	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
Desechos de alimentos	48.0	6.4	37.6	2.6	4.0	5.0
Papel	43.5	6.0	44.0	3.0	2.0	6.0
Cartón	44.0	5.9	44.6	3.0	2.0	5.0
Plásticos	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
Textiles	55.0	6.6	31.2	4.6	1.5	2.5
Hule	78.0	10.0	-	20.0	-	10.0
Piel	60.0	8.0	11.6	10.0	4.0	10.0
Residuos de jardinería	47.8	6.0	38.0	30.4	3.0	4.5
Madera	49.5	6.0	42.7	2.0	1.0	1.5
Cenizas, polvo, etc.	26.3	3.0	20.0	5.0	2.0	68.0

Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H. y Eliassen R. (13)

d) Valor calorífico.

El valor calorífico aproximado (en Btu/lb) puede determinarse mediante la fórmula de Dulong Modificada:

$$\text{Btu/lb} = 145.5C + 620\left(H - \frac{1}{8}O\right) + 41S$$

donde: C = porcentaje de carbón
H = porcentaje de hidrógeno
O = porcentaje de oxígeno
S = porcentaje de azufre

Contenido de energía de los desechos sólidos		
Componentes	Residuo inerte (%)*	Energía (Btu/lb)
Desechos de alimentos	2 - 8	1,500 - 3,000
Papel	4 - 8	5,000 - 8,000
Cartón	3 - 6	6,000 - 7,500
Plásticos	6 - 20	12,000 - 16,000
Textiles	2 - 4	6,500 - 8,000
Hule	8 - 20	9,000 - 12,000
Piel	8 - 20	6,500 - 8,500
Residuos de jardinería	2 - 6	1,000 - 8,000
Madera	0.6 - 2	7,500 - 8,500
Vidrio	96 - 99	50 - 100
Latas	96 - 99	-
Metales no ferrosos	90 - 99	100 - 500
Metales ferrosos	94 - 99	1,000 - 5,000
Cenizas, polvo, etc.	60 - 80	1,000 - 5,000
Desechos municipales		4,000 - 5,000

Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H. y Eliassen R. (13)

* Después de una combustión completa.

B. Tratamiento y disposición.

El entierro sanitario es el procedimiento consistente en sepultar la basura, es decir, después de colocar la basura, sin orden alguno y sin tiempo determinado (un ejemplo puede ser el llenar cualquier depresión natural del terreno), se cubre ésta con una gruesa capa de tierra compactada.

El tratamiento y la disposición de los desechos, y en general, el manejo de los desechos sólidos es una labor técnica, que mantiene gran interdependencia con la ecología, los recursos naturales, la energía, la economía, la política, la legislación y la administración; estos rubros le dan un carácter multidisciplinario, por lo que son necesarias la colaboración y la coordinación intersectorial de técnicos y especialistas en esos campos.

Actualmente existen diversos métodos de disposición de residuos sólidos, de los cuales sólo algunos de ellos pueden adaptarse a las necesidades y características de los centros de población; en cada caso particular es necesario llevar a cabo estudios, entre otros, de generación de residuos sólidos, superficies de terreno disponibles, condiciones climatológicas de la región y condiciones económicas.

C. Métodos de disposición.

Las técnicas de tratamiento más difundidas en el mundo son:

1. Relleno sanitario.
2. Incineración.
3. Composteo.

1. Relleno sanitario.

Es un método empleado para la disposición final de la basura, el cual consiste en colocar, esparcir y compactar los residuos sobre el suelo, en un área previamente determinada llamada celda. Uno de los requisitos principales es que, al finalizar la jornada de trabajo, los residuos depositados diariamente queden cubiertos por una capa de tierra; las dimensiones de las celdas se definen de acuerdo con la cantidad de desechos recolectados por día.

Existen tres métodos definidos de relleno sanitario, su diferencia radica en el proceso constructivo que se sigue en la disposición de los desechos sólidos:

- a) Método de zanja,
- b) Método de área o de zona y
- c) Método de rampa.

A continuación se describen en forma breve cada uno de ellos:

- a) **Método de zanja.** Consiste en hacer una excavación de gran longitud y ancho mínimo colocando el material producto de la excavación a un lado de la zanja; los desechos son colocados en la zanja con una cierta inclinación (3 horizontal y 1 vertical) los cuales son compactados en el lugar. Al término de cada día de operación, los residuos ya compactados son cubiertos con el material de excavación. Este método es usado en zonas en donde es posible realizar excavaciones profundas y el material producto de excavación puede ser empleado como material de cubierta.

- b) **Método de área.** Consiste en descargar y esparcir los desechos sólidos en áreas prácticamente inalteradas en las cuales sólo se haya retirado la capa orgánica. Los desechos son colocados y compactados durante el día en franjas con longitud y espesor definidos de acuerdo con las necesidades de disposición diaria. Al igual que en el método anterior, los residuos ya compactados se deben cubrir con material que en este caso deberá ser transportado desde un banco de préstamo.

- c) **Método de rampa.** La combinación de los dos métodos anteriores dan como resultado el método de rampa; el método consiste en realizar, en el lugar de disposición, excavaciones de las cuales se obtenga el material de cubierta necesario para cubrir los residuos depositados y compactados durante una jornada de trabajo.

La aplicación y la operación de cualquiera de estas tres técnicas de disposición dependerá, entre otros factores de: la topografía, la dirección y velocidad de los vientos y, la cantidad y las características de la basura.

La Sociedad Americana de Ingeniería Civil define como relleno sanitario:

"Relleno sanitario es una técnica para la disposición de la basura en el suelo sin causar perjuicios al medio ambiente y sin causar molestias o peligro a la salud y la seguridad pública; este método utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en la menor área posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable y cubriendo la basura así depositada con una capa de tierra con la frecuencia necesaria o por lo menos al final de cada jornada."

2. Incineración.

La incineración se define como un proceso de reducción en peso y volumen de los residuos sólidos, mediante la combustión controlada en presencia de oxígeno. Las reducciones que se logran con este proceso varían del 75% al 90% en peso, dependiendo de la composición de los residuos. El residuo es comúnmente depositado en un relleno cercano después de recuperar cualquier material útil. El bióxido de carbono y demás gases generados en el proceso de combustión son liberados a la atmósfera.

El concepto teórico de la incineración, establece una reacción química entre el combustible y el comburente, en donde la basura funcionando como combustible, libera energía térmica (calor de combustión) a medida que es quemada.

Los principales productos del proceso de incineración son partículas en suspensión y gases como dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) proveniente del aire en exceso, que no es posible quemar completamente, así como de gases inherentes debidos a la propia basura y al aire utilizado como fuente de oxígeno. También se genera agua, cenizas y escorias conteniendo metales, vidrios, piedras y materiales inertes.

Cuando la combustión es incompleta se puede presentar una cantidad importante de monóxido de carbono. Si la combustión se realiza a temperaturas elevadas puede haber disociación del nitrógeno, originándose los óxidos de nitrógeno (NO_x), aunque cabe aclarar que estos compuestos, pueden generarse más por cambios en la temperatura del proceso y por el nitrógeno presente en el aire, que por el contenido de este elemento en los residuos sólidos.

Es importante mencionar que la basura contiene azufre y que los compuestos azufrados (SO_x) debidos a la combustión de la basura, normalmente se precipitan junto con las escorias y las cenizas.

Por otro lado, dentro de las emisiones a la atmósfera, también puede haber presencia de ácido clorhídrico (HCl), así como de metales pesados, furanos y dioxinas; siempre y cuando los residuos incluyan en su composición, materiales formadores de tales compuestos.

3. Generación de composta o composteo.

Se entiende por composteo la descomposición biológica y estabilización de sustratos orgánicos bajo condiciones que permiten el desarrollo de temperaturas termofílicas como resultado del calor producido biológicamente, con un producto final suficientemente estable para el depósito y aplicación en la tierra sin efectos ambientales adversos.

En el tratamiento de desechos sólidos el proceso de composteo tiene los siguientes objetivos:

- a) Reducción de masa y volumen.
- b) Eliminación de lugares en donde se reproduzcan insectos y plagas.
- c) Utilización de recursos desaprovechados.

D. Rellenos sanitarios.

De las definiciones expuestas se desprende, en consecuencia, que tanto el método de incineración como el de generación de composta requieren al final del proceso un lugar de disposición para los residuos que no serán aprovechados. Esto hace que el relleno sanitario resulte ser el de mayor aplicación.

La aplicación de una o varias técnicas de tratamiento, en forma individual o combinada, permiten alcanzar los objetivos económicos, técnicos y sociales buscados por el tratamiento de los desechos sólidos.

Un relleno sanitario requiere de terrenos con extensión suficiente para realizar la actividad y de bancos con el material de cubierta adecuado. Es necesario realizar inversiones para evitar la degradación del ambiente en torno al sitio, una obra de este tipo conlleva problemas sociales como la oposición por parte de la población a la instalación de un sitio cercano a algún centro urbano o problemas, por la recuperación de subproductos, con los pepenadores.

En el proyecto de un relleno sanitario es necesario tomar en cuenta además de los costos de adquisición de terrenos, del diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento, como sucede en toda obra, las inversiones necesarias para la conservación y renovación de equipos y materiales.

El relleno sanitario es generalmente el método más económico ya que no requiere de alta tecnología y su construcción tiene un costo moderado; por otra parte, presenta la posibilidad de recuperación de áreas verdes que pueden ser aprovechadas como zonas agrícolas y recreativas. Es el método recomendable para pequeñas y medianas poblaciones que cuentan con terrenos disponibles, cercanos a la fuente de generación, para ser utilizados como sitios de disposición.

1. Ciclo de vida de un relleno.

El ciclo de vida de un relleno sanitario está integrado por diferentes fases, éstas son:

- a) **Fase de planeación.** Generalmente involucra el estudio geológico e hidrogeológico del sitio como una base para el diseño actual.

Como ya se mencionó, un relleno sanitario es un sitio en el cual los desechos se colocan siguiendo un procedimiento definido con anterioridad. El criterio para diseñar un relleno sanitario se basa en los siguientes factores:

- Tipo de terreno.
 - Geohidrología.
 - Mecánica de suelos.
 - Topografía.
 - Material de cubierta.
 - Objetivos específicos que se desean alcanzar.
 - Características físico-químicas.
 - Datos de generación de desechos.
 - Ubicación del terreno (cercanía a la fuente de generación).
 - Costo de la obra (diseño, planeación, construcción, operación y mantenimiento).
 - Impacto ambiental.
- b) **Fase de construcción.** Incluye trabajos de campo, construcción de caminos y, diseño, construcción y preparación del área de relleno.

De igual forma un lugar de disposición que se conciba como relleno sanitario deberá ser planeado, diseñado y construido tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- Disponer en el sitio adecuado los desechos generados por la población.
- Controlar la transmisión de enfermedades.
- Controlar los gases generados.
- Controlar los líquidos generados.
- Disminuir la reproducción de roedores y de vectores.
- Evitar la contaminación de mantos freáticos.

- Evitar los incendios en el lugar de disposición.
- Reducir los riesgos de contaminación ambiental.
- Controlar los residuos sólidos considerados como peligrosos.
- Controlar las actividades de pepena.
- Disminución del costo de tratamiento y de disposición de los residuos sólidos.
- Recuperación de áreas verdes, al término de la vida útil del sitio de disposición, ya sea como áreas agrícolas, recreativas o deportivas.
- Captación de biogas para su aprovechamiento en procesos industriales y como fuente de energía.
- Realización de estudios sobre aprovechamiento y recuperación de subproductos.
- Realización de estudios de impacto ambiental en el suelo, en el agua y en el aire.

c) **Fase de operación.** Tiene su inicio desde el momento en que se realiza la colocación de la primera carga de desechos hasta la última carga después de transcurridos varios años.

Se caracteriza por la intensidad de tránsito, los movimientos en el frente de trabajo, la operación de instalaciones ambientales y la terminación de secciones finales.

El relleno sanitario es la combinación de una operación permanente con eventuales procesos constructivos, los cuales se acentúan cuando se abren nuevos frentes de tiro, se concluyen etapas de trabajo o se rehabilitan zonas clausuradas una vez estabilizadas.

Es claro que un relleno sanitario puede generar impactos ambientales en sus diferentes etapas constructivas, así como durante su operación. Los impactos de mayor riesgo son tanto los lixiviados como el biogas los cuales se originan al partir de los procesos de estabilización y transformación que sufren los residuos sólidos dentro del relleno sanitario.

La buena o mala operación dependerá de las medidas de control que se apliquen tendientes a disminuir el impacto producido por los contaminantes generados en el relleno.

d) **Fase final.** Esta fase comprende desde la terminación de las secciones finales hasta el día en que las instalaciones ambientales no requieren ser operadas, debido a que las emisiones han disminuido a un nivel que no necesita tratamiento y que pueden ser eliminadas por el medio ambiente.

- e) **Fase final (Cierre).** En esta fase las emisiones (gases y lixiviados) se encuentran en niveles aceptables, lo cual significa que las emisiones son de la misma magnitud que las que se encuentran en los alrededores del relleno.

La composición del área rellena puede diferir de la composición del ambiente circundante pero no representa un impacto. Se considera que el relleno se ha integrado al medio ambiente circundante y no requiere atención especial. Una vez que se ha alcanzado esta fase, el área de relleno puede tener varios fines como son centros y parques recreativos.

Muchos y muy variados son los aspectos que enmarcan la construcción de un relleno sanitario; visto como tema de contaminación, la mayoría de éstos tienen como finalidad la prevención y el control de elementos que nos resultan dañinos; una vez que se ha logrado anticipar, por lo menos en teoría, el problema de la disposición de desechos es posible ampliar nuestro enfoque para obtener un beneficio adicional. El aprovechamiento de biogas en procesos industriales y como fuente de generación de energía encierran en sí una diversidad de opciones de desarrollo. Afortunadamente, el estudio, el análisis y la captación de biogas está al alcance de nuestras manos y ahora, sólo hace falta explotar esta posibilidad.

E. Marco jurídico.

En México, la legislación de carácter federal en materia de desechos sólidos cuenta con los siguientes documentos jurídicos y técnicos:

- 1) **Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. (28 de enero de 1988).**
- 2) **Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos. (25 de noviembre de 1988).**
- 3) **Siete Normas Oficiales Mexicanas en materia de protección ambiental:**

NOM-CRP-001-ECOL/1993. Características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. (22 de octubre de 1993).

NOM-CRP-002-ECOL/1993. Procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. (22 de octubre de 1993).

NOM-CRP-003-ECOL/1993. Procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más de los residuos considerados como peligrosos por la norma oficial mexicana NOM-CRP-001-ECOL/1993. (22 de octubre de 1993).

NOM-CRP-004-ECOL/1993. Requisitos que deben reunir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto de los radioactivos. (22 de octubre de 1993).

NOM-CRP-005-ECOL/1993. Requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado para residuos peligrosos. (22 de octubre de 1993).

NOM-CRP-006-ECOL/1993. Requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado para residuos peligrosos.
(22 de octubre de 1993).

NOM-CRP-007-ECOL/1993. Requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos.
(22 de octubre de 1993).

4) 19 Normas Oficiales Mexicanas:

NOM-AA-15-1985. Protección al ambiente. Contaminación del suelo. Residuos sólidos municipales. Muestreo. Método de Cuarteo.

NOM-AA-16-1984. Protección al ambiente. Contaminación del suelo. Residuos sólidos municipales. Determinación de humedad.

NOM-AA-17-1980. Aguas. Determinación de color.

NOM-AA-18-1984. Protección al ambiente. Contaminación del suelo. Residuos sólidos municipales. Determinación de cenizas.

NOM-AA-19-1985. Protección al ambiente. Contaminación del suelo. Residuos sólidos municipales. Peso volumétrico "In situ".

NOM-AA-21-1985. Protección al ambiente. Contaminación del suelo. Residuos sólidos municipales. Determinación de materia orgánica.

NOM-AA-22-1985. Protección al ambiente. Contaminación del suelo. Residuos sólidos municipales. Selección y cuantificación de subproductos.

NOM-AA-24-1984. Protección al ambiente. Contaminación del suelo. Residuos sólidos municipales. Determinación de nitrógeno total.

NOM-AA-25-1975. Protección al ambiente. Contaminación del suelo. Residuos sólidos. Determinación del pH. Método Potenciométrico.

NOM-AA-52-1985. Protección al ambiente. Contaminación del suelo. Residuos sólidos municipales. Preparación de muestras en laboratorio para su análisis.

NOM-AA-61-1985. Residuos sólidos municipales. Determinación de la generación.

NOM-AA-67-1985. Residuos sólidos municipales. Determinación de la relación carbono/nitrógeno.

NOM-AA-68-1986. Protección al ambiente. Contaminación del suelo. Residuos sólidos municipales. Determinación de hidrógeno a partir de materia orgánica.

NOM-AA-80-1986. Contaminación del suelo. Residuos sólidos municipales. Determinación del porcentaje de oxígeno en materia orgánica.

NOM-AA-91-1987. Residuos sólidos. Terminología.

NOM-AA-92-1984. Residuos sólidos municipales. Determinación de azufre.

NOM-AA-94-1984. Protección al ambiente. Contaminación del suelo. Residuos sólidos municipales. Determinación de fósforo total.

5) Leyes Estatales.

La Ley Estatal del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente correspondiente a cada una de las 31 entidades federativas.

- 6) Por otra parte, se tienen las normas establecidas por la diferentes dependencias de gobierno las cuales, a través de instructivos publicados regularmente, marcan los lineamientos para el uso y manejo de los desechos sólidos. Ejemplo de éstos son los instructivos elaborados por el IMSS, STPS, SSA, SARH, etc..**

También, a nivel federal, se cuenta con la siguiente reglamentación:

- a) Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas.**

- b) **Reglamento para la Protección del Ambiente contra la Contaminación originada por la Emisión de Ruido.**
 - c) **Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental.**
 - d) **Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera.**
 - e) **Las Normas Oficiales Mexicanas, los Criterios Ecológicos y las Normas Oficiales Mexicanas referentes a: Control de calidad del agua, control de calidad atmosférica y control de calidad ambiental.**
- 7) **Los acuerdos, las circulares y los comunicados (temporales y eventuales) que a nivel nacional son emitidos por las autoridades gubernamentales ya sean éstas federales, estatales, regionales, etc. (Secretarías de Estado y organismos desconcentrados y descentralizados del gobierno federal).**
- 8) **En igual forma, debemos considerar los acuerdos y los compromisos que se derivan de tratados internacionales.**

II. Biogas en rellenos sanitarios.

El estudio a detalle de las características de los sitios de disposición y de las condiciones que se presenten en éstos permitirá obtener mejores resultados y con un mayor grado de confiabilidad útil en el desarrollo de métodos de control y producción tanto de gases como de lixiviados.

Algunas características de diseño de rellenos sanitarios determinan cuales de éstos pueden ser considerados como mejores productores de biogas.

Las características de diseño para producción de gas compatibles con aquellas que se consideran parte de un buen procedimiento en la construcción de rellenos incluyen gran profundidad, membranas impermeables en el fondo y en las paredes laterales del relleno y gran cantidad de desechos orgánicos.

Otras características realzan la producción de gases pero son contrarias a lo que es considerado bueno tanto en la construcción de sitios de disposición como en la aplicación de criterios de operación; ejemplo de esto son: baja compactación, material de cubierta poroso, altas concentraciones de humedad y lixiviados, y capas de tierra de poco espesor utilizadas como cubierta diaria.

A. Biogas.

1. Definición.

El biogas es una mezcla de gases producto de la degradación biológica, en condiciones anaeróbicas, de componentes orgánicos. Generalmente, consta de 50% metano y poco menos de 50% dióxido de carbono. También contiene pequeñas cantidades de otros gases los cuales son importantes por el uso final que tienen actualmente y el uso potencial que representan.

En un relleno sanitario se considera como biogas la mezcla de gases que se genera en el seno del mismo como consecuencia de la descomposición de los desechos sólidos confinados. El mayor o menor porcentaje de cualquiera de los componentes será función del tiempo y de la degradación que los desechos sufran bajo las condiciones de temperatura, presión, densidad, humedad, etc. prevalecientes en cada punto del confinamiento.

2. Principales componentes.

La composición relativa del biogas se determina, primero, por la naturaleza de la porción biodegradable de la biomasa y, segundo, por las condiciones físico-químicas.

El biogas es incoloro, inodoro e insípido y su densidad es menor a la del aire. Los principales componentes del biogas son: el metano (CH_4), el bióxido de carbono (CO_2), el hidrógeno (H_2) y el nitrógeno (N_2) aunque constituyentes como argón, sulfuro de hidrógeno, azufre, sulfuros, disulfuros, propano, isobutano, n-butano, isopentano, hexano, heptano, octano, nonano, tolueno y benceno pueden formar parte de la mezcla.

A continuación, se presentan las características más importantes de los gases que pueden encontrarse en el entorno de un relleno sanitario y específicamente en una mezcla de biogas:

a) Metano.

El metano es incoloro, inodoro e insípido; a temperaturas ordinarias, es un gas menos pesado que el aire; en estado líquido es menos denso que el agua, tiene baja solubilidad en

el agua y es muy soluble en líquidos orgánicos como gasolina, éter y alcohol. Tiene una densidad de 0.55 respecto a la del aire y de 0.4 respecto a la del agua.

Su punto de ebullición se encuentra en los -161.1°C , su punto de fusión en -182.5°C ; su temperatura crítica es -82.1°C y su presión crítica es 45.8 kg/cm^2 .

Se considera como uno de los compuestos orgánicos más sencillos y es el miembro más simple de la familia de los alcanos; resulta de la combinación de carbono e hidrógeno, su representación química es CH_4 . Con respecto a sus propiedades físicas, el metano fija la pauta para los demás miembros de la familia de los alcanos.

Reacciona con el bromo y el cloro a la luz solar pero es inerte frente al ácido sulfúrico y ácido nítrico, y los álcalis.

El metano es el producto final de la putrefacción anaeróbica de materia orgánica y es el principal constituyente (hasta 97%) del gas natural. En la naturaleza se desprende de minas de carbón en donde forma, con el aire, una mezcla explosiva llamada grisú; se forma del cieno de las aguas residuales en los sistemas de alcantarillado, recibe el nombre de "gas de los pantanos" debido a que se genera en éstos por la descomposición de materia vegetal.

En una mezcla gaseosa como lo es el biogas generado en tiraderos de basura y rellenos sanitarios, el metano se puede presentar en concentraciones de 45 a 65%.

De presentarse en mezclas de aire en concentraciones de 5 a 15% resulta altamente explosivo. Su explosión es provocada por una chispa o por una fuente de calor encendida (arde con llama no fuliginosa) que exceda los 593°C (1100°F).

Su principal aplicación es como combustible. El gas natural de los yacimientos petrolíferos contiene hasta 98% de metano (su transportación puede ser a través de gasoductos) y en el gas de alumbrado entra en la proporción de 30%. Es una materia prima muy importante en la industria de las sustancias químicas orgánicas. Se utiliza en la obtención de negro de humo y en la obtención de monóxido de carbono e hidrógeno; estos últimos empleados como punto de partida en la producción de muchos compuestos orgánicos, amoníaco, acetileno y en la síntesis de hidrocarburos y alcoholes.

Por cloración forma cloruro de metilo, cloruro de metileno, cloroformo y tetracloruro de carbono.

De la combustión del metano se obtiene agua, dióxido de carbono y calor.

Aunque su consumo es sin purificación, si se requiere metano muy puro puede separarse por fraccionamiento de los otros constituyentes del gas natural.

b) Dióxido de carbono.

El dióxido de carbono es incoloro, inoloro y no inflamable; es un gas más pesado que el aire, altamente soluble en agua; forma ácidos débiles de soluciones corrosivas. Como gas su peso específico es 1.53 y como líquido 1.057.

Su punto de ebullición se encuentra en los $-78.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, su punto de fusión en -56°C (5atm); su temperatura crítica es 31.3°C y su presión crítica 72.91kg/cm^2 .

El dióxido de carbono, también recibe el nombre de anhídrido carbónico, resulta de la combinación de carbono y oxígeno, su representación química es CO_2 .

Industrialmente se obtiene como producto secundario de ciertos procesos, tales como fermentación o producción de cal. En el laboratorio se produce por la acción de ácido diluido sobre carbonatos metálicos.

El dióxido de carbono se obtiene a partir de la combustión de carbono y compuestos de carbono como hulla, coke, madera y aceite; también se desprende de la fermentación de la glucosa.

Existe en la atmósfera (0.03% por volumen) y en los manantiales de agua efervescente.

En una mezcla gaseosa como lo es el biogas generado en tiraderos de basura y rellenos sanitarios, el dióxido de carbono se puede presentar en concentraciones de 30 a 60%.

Este gas es potencialmente peligroso si se presenta en concentraciones de 10% en oxígeno puro ya que puede causar envenenamiento, inconsciencia o desmayo.

Sus usos principales son como refrigerante (dióxido de carbono sólido; llamado hielo seco), en extintores de incendios, bebidas efervescentes y en la fabricación de carbonato y bicarbonatos sódicos.

c) **Nitrógeno.**

El nitrógeno es un gas incoloro e inodoro. Carece de actividad química a las temperaturas ordinarias pero las temperaturas elevadas lo disocian en nitrógeno monoatómico. Su densidad respecto a la del aire es 0.967 y en estado líquido su densidad respecto a la del agua es 0.804.

Su temperatura de ebullición es -195.67°C , su punto de solidificación es -209.9°C ; su temperatura crítica es -146°C .

En mezclas de biogas puede constituir entre 1 y 20% de la mezcla.

d) **Hidrógeno.**

El hidrógeno es un gas incoloro e inodoro. En estado gaseoso su densidad respecto a la del aire es 0.07 y en estado líquido su densidad respecto a la del agua es 0.0808.

Su punto de ebullición es -252.7°C , su punto de fusión es -259.14°C .

e) **Sulfuro de hidrógeno.**

El sulfuro de hidrógeno conocido comúnmente como gas o ácido sulfhídrico, se encuentra en los manantiales de aguas sulfhídricas (corrientemente llamadas sulfurosas) y en los gases volcánicos. Este gas se produce siempre que se descomponen en ausencia de aire sustancias orgánicas que contienen azufre; en los huevos podridos se advierte su presencia por su olor característico.

El sulfuro de hidrógeno es un gas incoloro, de olor muy desagradable. Se licua fácilmente comprimiéndolo a temperatura ordinaria. El líquido puede guardarse en tubos de presión que se transportan y emplean para suministrar el gas a laboratorios y fábricas. Es moderadamente soluble en agua, de la que puede desalojarse por completo hirviendo la disolución.

En el biogas se presentan pequeñas cantidades pero es la mayor fuente de olor, el olor se inicia con concentraciones de 0.00047 ppm; en rellenos, bajo condiciones anaeróbicas, produce sulfatos (los sulfatos provienen de: desechos animales y vegetales, sulfatos de calcio y agua salobre infiltrada a través de los desechos).

f) Argón.

El argón es un gas inerte, inoloro e insípido. Su densidad es de 1.784. Es uno de los gases raros de la atmósfera y constituye el 0.93% del volumen de aire.

Su temperatura de ebullición es -185.7°C , su temperatura de fusión es -189.2°C .

El argón se usa para formar una atmósfera inerte en luces eléctricas y fluorescentes y en soldaduras.

El argón se extrae de la atmósfera, industrialmente, por destilación fraccionada del aire líquido. Se usa principalmente en las lámparas eléctricas, en las cuales su presencia tiene por efecto reducir la vaporización del metal que constituye el filamento. También se llena con argón el cárter de algunos motores y otros recintos en los que se requiere la presencia de una atmósfera inerte (como los demás gases raros, el argón carece absolutamente de actividad química y no puede combinarse con otros cuerpos).

3. Obtención y aplicación.

Técnicamente es posible recuperar metano y bióxido de carbono a partir de la descomposición de los residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios. Las alternativas de generación de energía a partir del biogas son básicamente la electricidad, la energía calorífica y un sistema combinado de estas dos.

Las condiciones de purificación, compresión y almacenaje dependerán de la forma en que se decida utilizar la energía obtenida.

a) Purificación.

Si se quisiera incrementar el poder calorífico del biogas, éste podría tratarse con soluciones de sosa o de cal para eliminar o reducir el CO₂. La conveniencia de eliminar el dióxido de carbono deberá analizarse y para esto será necesario realizar un análisis de costo-beneficio en el que se considera la ganancia de poder calorífico y el consumo de reactivos, de agua y de energía.

En cuanto al ácido sulfúrico, basta con pasar el gas a través de filtros que contengan limaduras de hierro para eliminarlo, haciendo un recambio de filtros para lavar la limadura usada, se puede tener en forma continua gas purificado, evitando la corrosión de contenedores, motores, quemadores, etc..

La humedad puede ser reducida si se pasa el biogas a través de cámaras de expansión ligeramente enfriadas para captar el vapor de agua que se condense y eliminarlo en trampas de líquidos.

b) Compresión.

Las presiones a las que con regularidad se comprime el biogas son de 7 a 10 kg/cm² en instalaciones pequeñas, de 28 a 35 kg/cm² en instalaciones de tratamiento de aguas negras de tamaño regular y de 135 a 200 kg/cm² en grandes instalaciones.

c) Importancia del biogas.

Las cantidades de metano y de dióxido de carbono que se generan en rellenos sanitarios son de interés por dos razones:

- c.1) Por el peligro potencial de explosión ya sea que se presente en el interior o en el exterior del relleno o en edificaciones adyacentes.

El biogas puede causar explosiones provocadas por el metano, su componente principal, el cual tiene niveles de explosión (proporción en volumen con aire).

Nivel bajo de explosión	5.4%
Nivel alto de explosión	13.9%

En estas condiciones el biogas necesita una temperatura entre 650 y 750°C para explotar, la cual puede ser alcanzada al encender un fósforo o al producir chispas por choques metálicos.

La densidad y su composición son también factores importantes en la seguridad, pues tomando en cuenta que la densidad del aire es 1.293 g/l, la del metano 0.27 g/l y la del dióxido de carbono 1.98 g/l y considerando una composición entre 30 y 40% de CO₂ la densidad del biogas llega a 1.09 g/l lo que lo hace más ligero que el aire y puede diluirse fácilmente, perdiendo peligrosidad. Si la proporción de CO₂ rebasa 45.7%, el biogas se vuelve más denso que el aire subiendo su límite de peligrosidad por varios factores:

- El biogas puede ser asfixiante cuando hace que el oxígeno del aire baje a 17.3%, y si llega a 13% es positivamente sofocante.
 - Si en la composición del biogas se tiene CO en proporción de 0.1%, es fatal en 4 horas y si la proporción de H₂S es de 0.6% es fatal en menos de media hora.
- c.2) Por el potencial económico tanto del metano y del dióxido de carbono como de otros gases también presentes en la mezcla de biogas.

La caracterización del biogas permite conocer las proporciones de sus principales componentes y a partir de éstas se puede deducir su poder calorífico. En comparación con el gas natural, cuya composición incluye 98% de metano, con un poder calorífico del orden de 9,800 a 10,000 kcal/m³, la composición del biogas es:

Metano	45 a 65%
Dióxido de carbono	30 a 60%
Hidrógeno	5 a 10%
Nitrógeno	1 a 20%
Acido sulfúrico	trazas

Debido a su poder calorífico, el biogas es considerado un combustible útil tanto para su aprovechamiento en zonas habitacionales (consumo doméstico) y en alumbrado como para la industria en la generación de energía calorífica, mecánica y eléctrica.

Poder calorífico de diferentes combustibles y su equivalente referido al biogas			
Combustible	Poder calorífico		Equivalentes a 1,000 m³ de biogas
	kcal/m³	kcal/kg	
Biogas	5,335		1,000 m ³
Gas natural	9,185		581 m ³
Metano	8,847		603 m ³
Propano	22,052		242 m ³
Butano	28,588		187 m ³
Electricidad	860 kcal/Kw-hr		6,203 m ³
Carbón		6,870	776 kg
Petróleo		10,357	470 kg
Fuel Oil		10,138	526 kg

Fuente: Monroy H. Oscar, Viniegra G. Gustavo (10)

Consumo de biogas en l/hr y kcal/hr considerando un poder calorífico de 6,000 kcal/m³		
Uso	l/hr	kcal/hr
Lámpara de capuchón	100	600
Quemador para estufa	320	1,920
Quemadores para horno	420	2,520
Estufa con 4 quemadores y 1 horno	2,068	12,408
Soplete de gas para plomero	250	1,500
Refrigerador de absorción 0.064 m ³ (2.285 ft ³)	83	500
Motor de combustión interna	500	

Fuente: Monroy H. Oscar, Viniegra G. Gustavo (10)

La importancia de la utilización y de la aplicación del biogas radica en la utilidad que tiene como fuente alterna de generación de energía; el aprovechamiento de biogas a partir de la descomposición de los desechos dispuestos en rellenos sanitarios no es el único camino, también puede pensarse en otras formas de generación, ejemplo de esto son el aprovechamiento de los desperdicios orgánicos y de subproductos agroindustriales.

B. Flujo de biogas.

1. Generación de biogas.

La generación de gases en rellenos sanitarios es una consecuencia directa de la inevitable actividad químico-biológica que ocurre en los desechos materiales orgánicos e inorgánicos, y de las condiciones físicas presentes en los sitios de disposición. Muchos son los factores que influyen en la generación de biogas, y por lo tanto, no se sabe con exactitud ni la tasa de generación de cada gas ni la cantidad última de gas que puede ser producida.

En un medio heterogéneo, como lo es un relleno, se pueden esperar diferentes condiciones ambientales, llevando a la formación de microambientes donde pueden crecer organismos con características muy particulares.

En esta forma se entiende que un gran número de variables se combinan en la generación de gases a partir de la disposición de residuos. Dicha generación dependerá de las características físicas, químicas y biológicas de los componentes que integran el relleno sanitario. Entre los factores más relevantes se encuentran la composición de los residuos, su densidad, el contenido de humedad y la temperatura en el interior del relleno, así como aquellos factores que definen:

a) Las condiciones iniciales del sitio de disposición; esto es:

- Permeabilidad
- Porosidad
- Temperatura ambiente
- Nivel freático
- Precipitación
- Infiltración
- Evaporación
- Transpiración

b) Las características del material de cubierta; es decir, el material utilizado en el fondo y en las paredes laterales del relleno, así como el de capas intermedias y el de la capa final de cubierta:

- Permeabilidad
- Porosidad
- Contenido de humedad
- Grado de compactación

c) **Las características de los residuos depositados diariamente:**

- **Composición**
- **Densidad**
- **Degradabilidad (muy degradable, degradable o poco degradable)**
- **Grado de compactación**
- **Permeabilidad**
- **Porosidad**
- **Contenido de humedad**

d) **Las características propias de los gases generados y las condiciones ambientales a que están sujetos. La caracterización de los gases permitirá conocer las propiedades físicas y químicas:**

- **Composición.**
- **Peso molecular.**
- **Viscosidad.**
- **Temperatura.**
- **Densidad.**
- **Presión.**
- **Concentración.**

e) **Las condiciones del sitio de relleno en sus diferentes etapas de construcción:**

- **Tamaño de las celdas.**
- **Espesor de capas de residuos.**
- **Espesor de capas de material de cubierta.**
- **Sistema de ventilación o de captación de biogas.**
- **Sistema de captación de lixiviados.**
- **Ubicación de los desechos en el relleno.**
- **Tiempo de confinamiento.**
- **Temperatura ambiente.**
- **Temperatura en el interior del relleno.**
- **pH y alcalinidad de los líquidos en el interior.**
- **Viscosidad de líquidos y gases.**

Cantidad de biogas.

El proceso de formación de metano no es propiamente una fermentación, aunque es siempre un proceso anaerobio, y que se denomina, en términos genéricos, como respiración anaerobia. La formación de metano se halla precedida de fermentación, la cual puede ser de diversos tipos: alcohólica, acética, butírica, propiónica, fórmica, etc..

Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas que se desarrollan a pH neutros (siendo muy sensibles a los cambios de éste) y que crecen dentro de un amplio intervalo de temperatura.

El proceso microbiológico se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, la estabilización anaeróbica o conversión de compuestos orgánicos se realiza en tres etapas: la primera involucra la transformación de enzimas de compuestos con alto peso molecular en compuestos listos para usarse como fuentes de energía y células de carbón; la segunda consiste en la conversión bacteriana de los compuestos que resultan de la primera etapa en compuestos intermedios de bajo peso molecular y la tercera etapa es la conversión bacteriana de estos últimos compuestos en productos finales como son el CO₂ y el CH₄.

La conversión completa puede ser representada por la siguiente ecuación:

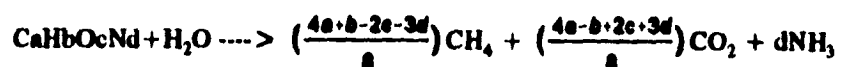


en donde: $s = a - nw - m$

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

Los términos CaHbOcNd y nCwHxOyNz son usados para representar en forma molar la composición del material presente al inicio y al final del proceso.

Si se considera que los desechos orgánicos son estabilizados completamente, la cantidad y composición de biogas generado a partir de diferentes tipos de desechos puede determinarse de acuerdo con la siguiente ecuación:



Conforme a lo anterior, la composición del gas resulta ser función directa del material que es degradado en un momento dado.

2. Factores que afectan la formación de metano.

La tasa de producción de metano en cualquier momento es función de numerosos factores:

- a) tamaño y composición de los desechos,
- b) tiempo de confinamiento de los desechos,
- c) contenido de humedad de los desechos,
- d) condiciones de temperatura en el relleno,
- e) cantidad y calidad de nutrientes y
- f) pH y alcalinidad de líquidos en el relleno.

Tamaño de los desechos.

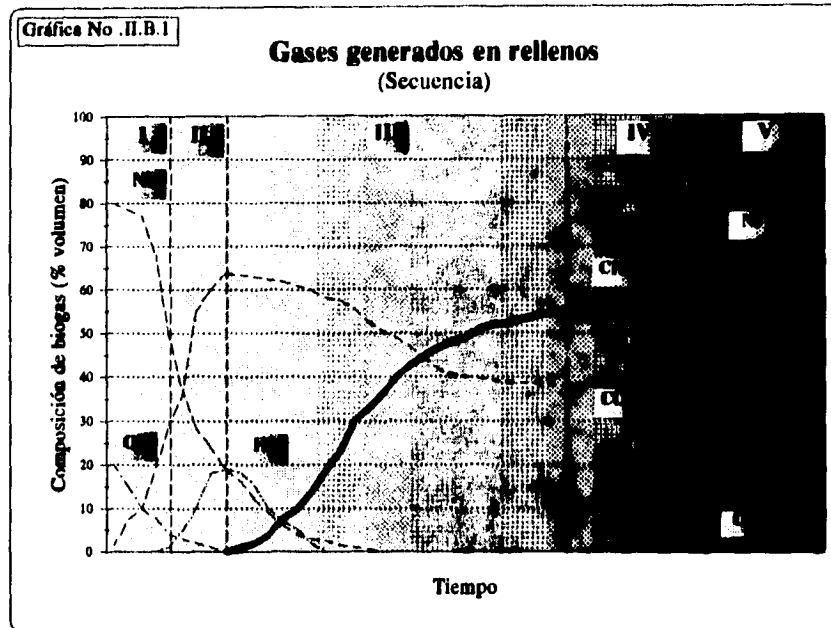
La reducción del tamaño de los desechos puede llegar a tener un marcado efecto sobre la producción de gas debido al incremento del área que queda expuesta a la acción de los microorganismos.

Tiempo de confinamiento.

El tiempo de confinamiento de los desechos es importante, ya que permite establecer el proceso de generación de biogas y la evolución que presentan las fases de descomposición en el interior del relleno. Considerando un volumen homogéneo de desechos se puede describir una secuencia de generación de biogas en 5 fases (Ver Gráfica No. II.B.1):

a) Primera fase (I).

Esta es una fase aeróbica relativamente corta la cual se inicia una vez que se ha efectuado la disposición de los residuos. La materia orgánica es degradada en un proceso de descomposición aeróbico generando principalmente dióxido de carbono.



Nota: Excepto la primera fase, cuya duración es de unos cuantos días, las demás fases pueden llegar a tener duraciones de meses, años o décadas.

b) Segunda fase (II).

Desarrollada inmediatamente después de la fase aeróbica, es una fase no metanogénica y es la primera parte de un período anaeróbico intermedio caracterizado por la actividad de bacterias fermentadoras y acetogénicas dando como resultado la generación de ácidos grasos, dióxido de carbono e hidrógeno, y la disminución en la generación de nitrógeno.

c) Tercera fase (III).

Es la segunda parte del período anaeróbico intermedio en la cual se inicia el crecimiento de bacterias metanogénicas. La generación de metano aumenta mientras que la concentración de ácidos grasos, dióxido de carbono, hidrógeno y sulfatos disminuye. Se presenta el incremento en pH y alcalinidad lo que origina un decremento en la solubilidad de calcio, hierro, manganeso y metales pesados.

d) **Cuarta fase (IV).**

También anaeróbica, es la fase de generación de metano; en ésta se establece la tasa de producción de metano originando concentraciones en la mezcla de gas de 50 a 65% en volumen. El alto porcentaje de metano mantiene bajas concentraciones de ácidos grasos e hidrógeno.

e) **Quinta fase (V).**

La tasa de generación de metano disminuye y el nitrógeno se presenta nuevamente en la mezcla de gases. Zonas aeróbicas y zonas de potencial redox también para la formación de metano aparecen en las capas superiores del relleno.

Contenido de humedad.

Dependiendo de las características físicas y químicas de los materiales orgánicos presentes en un relleno, un mismo contenido de humedad puede reflejar situaciones muy distintas respecto a la disponibilidad del agua para los microorganismos.

La producción de metano se incrementa al aumentar el contenido de humedad; un alto contenido de humedad favorece el intercambio (transporte y distribución) de substratos, nutrientes, organismos reguladores y bacterias. Si se presenta exceso de humedad, disminuyen los espacios libres en el material y se produce una fermentación anaeróbica.

La limitación en el transporte de oxígeno evita que se inhiba el crecimiento de bacterias; existe un valor mínimo de humedad necesaria para producir actividad microbiana que, en el caso de desechos municipales, llega a ser de casi 40%.

Temperatura.

Tanto la degradación aeróbica como la degradación anaeróbica producen calor, pero la generación de calor en un proceso anaeróbico se puede considerar baja debido a que la tasa de generación rara vez origina temperaturas altas.

En el fondo de un relleno con un flujo moderado de agua, el flujo de calor del relleno a los alrededores es pequeño debido a la capacidad de absorción de los desechos, y el calor generado por el proceso de descomposición anaeróbica puede originar temperaturas altas en el relleno. En climas templados es posible que las temperaturas registradas en un relleno se encuentren en un rango de 30°C a 45°C.

La formación de metano se presenta durante etapas en las cuales se establecen condiciones anaerobias. Como en todos los procesos microbianos la degradación anaeróbica de los desechos es afectada por la temperatura. La bacteria metanogénica contiene un grupo mesofílico cuyo crecimiento se encuentra entre los 20°C y 40°C y un grupo termofílico al cual favorecen las temperaturas altas (de 45°C a 75°C). En la digestión anaeróbica sólo el grupo mesofílico resulta de interés dado que se ha probado, en simulaciones de rellenos, que la producción de metano se da cuando la temperatura se mantiene entre 30°C y 40°C.

pH y alcalinidad.

El ecosistema metanogénico en el relleno es bastante delicado y las relaciones balanceadas entre los grupos de bacterias es crucial para lograr una buena tasa de producción.

La bacteria metanogénica es estrictamente anaerobia y es muy sensible a las condiciones del medio; ésta se desarrolla sólo en un pequeño rango de valores de pH (6.5 a 7.5). Si la bacteria es afectada por otros factores la conversión de hidrógeno y de ácido acético disminuye, la presión del hidrógeno se incrementa y el pH decrece, llevando a una mayor concentración de ácido butírico y ácido propiónico y una disminución mayor del pH. Eventualmente, la producción de metano se detiene.

Otros factores.

a) Oxígeno.

La ausencia de oxígeno libre es una condición necesaria para el crecimiento de las bacterias anaerobias. La bacteria metanogénica es la más sensible al oxígeno ya que requiere un potencial redox menor a -330 mV.

b) Hidrógeno.

El hidrógeno es producido tanto por las bacterias fermentativas como las acetogénicas y la presión del hidrógeno generada afecta las rutas bioquímicas. Con bajas presiones de hidrógeno la bacteria fermentativa produce hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético y, con altas presiones de hidrógeno genera hidrógeno, dióxido de carbono, etanol, ácido butírico y ácido propiónico.

c) Sulfatos.

La presencia de sulfatos reduce la producción de metano. Tanto la bacteria reductora de sulfatos como la bacteria metanogénica aprovechan el ácido acético y el hidrógeno; la producción de metano es afectada por la concentración de sulfatos pero el aumento o disminución en la formación de metano no está relacionada con efectos tóxicos de los sulfatos sobre la bacteria metanogénica, sólo se debe a una competencia por el sustrato.

d) Nutrientes.

Los ambientes anaeróbicos deben contar con los nutrientes necesarios para el crecimiento de bacterias, en particular el nitrógeno y el fósforo. Ejemplos de estos micronutrientes son: calcio, potasio, hierro, selenio, cobre y zinc.

3. Flujo de biogas.

El movimiento del gas fuera de las fronteras del relleno es función directa de la permeabilidad y de la presión del gas y concentración dentro del relleno.

El flujo de biogas en rellenos sanitarios puede ocurrir por convección o por difusión.

La convección ocurre cuando la presión total del gas no es uniforme en el sitio (cuando existe gradiente de presión). El flujo por convección es en la dirección en la cual la presión total decrece; los gases tienden a moverse de una región de alta presión a una de baja presión.

El flujo por difusión ocurre cuando la concentración de biogas no es uniforme en el sitio (cuando el gradiente de presión parcial para un gas no es igual a cero). El flujo por difusión de un gas es en la dirección en la cual la concentración (presión parcial) decrece; los gases tienden a moverse de regiones de concentración alta a regiones de baja concentración.

Para la mayor parte de los casos de interés práctico relacionados con la recuperación de gases en rellenos sanitarios el flujo por convección y por difusión ocurren en la misma dirección.

Difusividad

La difusividad o coeficiente de difusión es una propiedad de los sistemas de gases que depende de la temperatura, presión, concentración y naturaleza de los componentes.

La difusión conlleva la mezcla de moléculas de las sustancias mediante colisiones y movimientos térmicos desordenados, hasta que la mezcla alcanza una composición uniforme. La velocidad de difusión en la dirección z está relacionada con el gradiente de concentración, $\partial C/\partial z$, mediante la Primera Ley de Fick:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -DA \frac{\partial C}{\partial z}$$

en donde N es el flujo por unidad de área, D es el coeficiente de difusión y A es el área de la superficie de contacto. Los cambios de concentración con el tiempo y con la distancia están relacionados por la Segunda Ley de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

El coeficiente de difusión binaria de dos gases se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$D_{12} = \frac{0.0018587^{1.5} [(M_1 + M_2) / M_1 M_2]^{0.5}}{p \sigma_{12}^2 \Omega_D}$$

en donde: D_{12} = Coeficiente de difusión binaria, en cm^2/s .
 M_1, M_2 = Peso molecular de los dos gases.
 Ω_D = Integral de choque.
 σ_{12} = Diámetro efectivo de choque, en Å.
 T = Temperatura absoluta, en K.
 p = Presión, en atm.

Viscosidad.

Para conocer el valor de la viscosidad de una mezcla de gases en función de las viscosidades individuales de los componentes se utiliza la fórmula semiempírica de Wilke:

$$\mu = \sum \frac{\mu_i}{1 + \sum_{j=1}^2 \Theta_{ij} \frac{y_j}{y_i}}$$

siendo:

$$\Theta_{ij} = \frac{[1 + (\frac{\mu_i}{\mu_j})^{0.5} (\frac{M_j}{M_i})^{0.25}]^2}{\sqrt{8} (1 + \frac{M_i^{0.5}}{M_j})}$$

en donde: μ_i = Viscosidad, en $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$.
 y_i = Fracción molar.
 M_i, M_j = Peso molecular.

La viscosidad de cada gas está dada por las siguientes fórmulas:

$$\mu_{CH_4} = (1.935 + 0.0305T) \times 10^{-6}$$

$$\mu_{CO_2} = (-30.212 + 0.256T - 0.00035T^2) \times 10^{-6}$$

4. Ecuación diferencial que establece el flujo de biogas.

La expresión cinética utilizada para expresar la tasa de producción de CO_2 y CH_4 es una ecuación de pseudo-primer orden. Esta ecuación resulta de aplicar condiciones límite a la ecuación de Monod que relaciona el porcentaje de cada sustrato (tipo de desecho) aprovechado tanto por los organismos de éste como por los de sustratos localizados alrededor.

$$\frac{dS}{dt} = \frac{KXS}{K_s + S}$$

en donde: dS/dt = Tasa de crecimiento de la biomasa, masa/unidad de volumen · tiempo.

K = Tasa máxima de crecimiento específico, tiempo⁻¹.

X = Concentración de microorganismos, masa/unidad de volumen.

S = Concentración del sustrato, masa/unidad de volumen.

K_s = Constante de saturación, masa/unidad de volumen.

Esta ecuación indica que la relación funcional entre la tasa máxima de crecimiento específico y la concentración del sustrato es continua sobre el rango total de concentración del sustrato. Se presentan dos casos extremos:

- Cuando $S \gg K_s$:

$$\frac{dS}{dt} = KX$$

y cuando $S \ll K_s$:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{KXS}{K_s}$$

En la aplicación de este modelo cinético para la descomposición de los desechos en un relleno sanitario se debe considerar que los desechos orgánicos son la limitación para la tasa de producción de la bacteria de metano; por otro lado, la generación de CO_2 y de CH_4 es directamente proporcional a la cantidad y tipo de sustrato utilizado por la bacteria metanogénica.

Una vez colocados los desechos, después de un lapso relativamente corto, en el cual se establecen las condiciones anaeróbicas y se forma y estabiliza la biomasa microbial, la producción de gas alcanza un valor pico. Posteriormente, la producción de gas decrece junto con la fracción orgánica de los residuos degradados. La expresión que proporciona la tasa de producción de gas es:

$$\frac{dS}{dt} = \lambda S$$

Integrando la ecuación anterior se obtiene la expresión de producción de gas:

$$S = \lambda S_0 e^{-t\lambda}$$

en donde: S = Volumen de gas producido después del tiempo t .
 S_0 = Volumen total de gas para t_0 .
 t = Tiempo.
 λ = Constante de producción de gas.

Las ecuaciones de generación para los gases CH₄ y CO₂ son:

$$\alpha_i = \sum_n A_n \lambda_n S_{o,i} e^{-\lambda_n z}$$

en donde: α_i = Tasa de generación del gas i , en Kg/m³.
 A_m = Porcentaje del material de acuerdo a su degradabilidad.
 λ_m = Constante de generación de cada material, en días⁻¹.

El flujo de gases en un relleno sanitario queda definido por el fenómeno de difusión que ocurre entre los gases el cual se presenta siempre que exista una variación en la concentración.

El flujo unidimensional de un sistema de dos gases a través de un medio poroso y la concentración de gases está descrita por la siguiente ecuación:

$$\Phi \frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_i \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) - \frac{\partial u C_i}{\partial z} + \alpha_i$$

en donde: C_i = Concentración del gas i , en kg/m³ ($i=1, CH_4$; $i=2, CO_2$)
 t = Tiempo, en días.
 D_i = Coeficiente de difusión del gas i , en m²/día.
 u = Velocidad de la mezcla, en m/día.
 α_i = Tasa de generación del gas i , en kg/m³.
 z = Coordenada vertical (positiva hacia abajo), en m.

La ecuación de flujo es dada por la Ley de Darcy, la cual eliminando el término gravitacional queda como:

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\delta P}{\delta z}$$

en donde: u = Velocidad de la mezcla, en m/día.
 μ = Viscosidad de la mezcla, en $N \cdot s/m^2$.
 k = Permeabilidad, en darcys. ($1 \text{ darcy} = 9.87 \times 10^9 \text{ cm}^2$).
 P = Presión, en Pa.
 z = Coordenada vertical, en m.

La ecuación de estado para los gases es:

$$P = (R_1 C_1 + R_2 C_2) T$$

$$R_i = \frac{R}{M_i}$$

en donde: R_i = Constante de cada gas.
 R = Constante Universal de los Gases, en kJ/kgK
 M_i = Peso molecular del gas i .
 T = Temperatura absoluta, en K.

Sustituyendo las ecuaciones de flujo y de estado en la ecuación de flujo unidimensional se tiene:

$$\phi \frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_i \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k}{\mu} C_i \frac{\partial}{\partial z} (R_1 C_1 + R_2 C_2) T \right] + \alpha_i$$

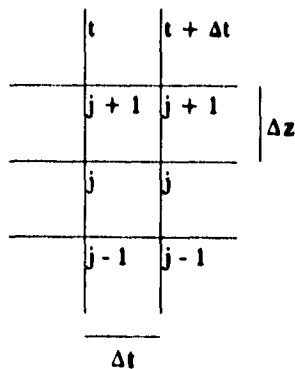
III. Método de diferencias finitas aplicado a la ecuación característica de flujo de biogas.

A. Solución de la ecuación característica.

1. Modelo de diferencias finitas.

El flujo unidimensional de un sistema formado por dos gases a través de un medio poroso y la distribución de concentraciones queda descrita por:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_i \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) - \frac{\partial u C_i}{\partial z} + \alpha_i$$



- i = 1 = CH₄
- i = 2 = CO₂
- j = 1, 2, 3, ..., n
- n = Número de puntos de concentración.
- t = Tiempo.
- Δt = Incremento en el tiempo.

El modelo de diferencias finitas para la ecuación anterior es:

$$\phi \frac{(C^{n+\Delta t})_i - (C^n)_i}{\Delta t} = D_i \frac{(C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}))}{\Delta z^2} - \frac{KT}{\mu} \left[C_i \left(\frac{R_1(C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1})) + R_2(C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}))}{2\Delta z} \right) + \frac{R_1(C_{i+1} - C_{i-1}) + R_2(C_{i+1} - C_{i-1}))}{2\Delta z} \left(\frac{C_{i+1} - C_{i-1}}{2\Delta z} \right) \right] + \sigma_i$$

Para CH₄:

$$\phi \frac{(C^{n+\Delta t})_{11} - (C^n)_{11}}{\Delta t} = D_1 \frac{(C_{12} - 2C_{11} + C_{10}))}{\Delta z^2} - \frac{KT}{\mu} \left[C_{11} \left(\frac{R_1(C_{12} - 2C_{11} + C_{10})) + R_2(C_{22} - 2C_{21} + C_{20}))}{2\Delta z} \right) + \frac{R_1(C_{12} - C_{10}) + R_2(C_{22} - C_{20}))}{2\Delta z} \left(\frac{C_{12} - C_{10}}{2\Delta z} \right) \right] + \sigma_1$$

45

$$(C^{n+\Delta t})_{11} = (C^n)_{11} + \frac{\Delta t D_1}{\phi \Delta z^2} (C_{12} - 2C_{11} + C_{10}) - \frac{KT \Delta t}{4\phi \mu \Delta z^2} [C_{11} (R_1(C_{12} - 2C_{11} + C_{10})) + R_2(C_{22} - 2C_{21} + C_{20})) + R_1(C_{12} - C_{10}) + R_2(C_{22} - C_{20})] (C_{12} - C_{10}) + \sigma_1$$

Para CO₂:

$$\phi \frac{(C^{n+\Delta t})_{21} - (C^n)_{21}}{\Delta t} = D_2 \frac{(C_{22} - 2C_{21} + C_{20}))}{\Delta z^2} - \frac{KT}{\mu} \left[C_{21} \left(\frac{R_1(C_{12} - 2C_{11} + C_{10})) + R_2(C_{22} - 2C_{21} + C_{20}))}{2\Delta z} \right) + \frac{R_1(C_{12} - C_{10}) + R_2(C_{22} - C_{20}))}{2\Delta z} \left(\frac{C_{22} - C_{20}}{2\Delta z} \right) \right] + \sigma_2$$

$$(C^{n+\Delta t})_{21} = (C^n)_{21} + \frac{\Delta t D_2}{\phi \Delta z^2} (C_{22} - 2C_{21} + C_{20}) - \frac{KT \Delta t}{4\phi \mu \Delta z^2} [C_{21} (R_1(C_{12} - 2C_{11} + C_{10})) + R_2(C_{22} - 2C_{21} + C_{20})) + R_1(C_{12} - C_{10}) + R_2(C_{22} - C_{20})] (C_{22} - C_{20}) + \sigma_2$$

2. Consideraciones básicas.

Para dar solución al sistema de ecuaciones que describe el flujo de gases se emplea un esquema de diferencias finitas. La modelación del flujo de biogas en el relleno sanitario se hace bajo las consideraciones siguientes:

- a) El flujo de gases es unidimensional en la dirección vertical.
- b) Los gases (biogas) que se generan en el relleno sanitario constituyen una mezcla formada por dos gases: uno de ellos el metano (CH_4) y, el otro, dióxido de carbono (CO_2).
- c) El relleno sanitario se entiende como un depósito de desechos sólidos municipales debidamente colocados en capas de espesor constante; cualquier estrato, ya sea de desechos sólidos o de material impermeable (en capas intermedias o de cubierta final) se consideran estratos homogéneos.
- d) El flujo de gas hacia estratos situados a una mayor profundidad que la indicada como máxima está restringida.
- e) Las concentraciones de metano y dióxido de carbono son calculadas manteniendo una variación lineal entre dos puntos de concentración.
- f) La concentración de gas en un punto situado en la superficie del terreno se considera constante.
- g) El cálculo se inicia cuando se desarrolla la fase anaeróbica (metanogénica) durante la cual el biogas está compuesto en su mayor parte por metano y dióxido de carbono.
- h) Únicamente se considera generación de biogas en estratos de desechos.
- i) La generación de gas en un segmento es asignada a un punto de concentración; el valor de la generación para cada gas está dada por el producto $\alpha \Delta z$.
- j) La temperatura se mantiene constante, en el tiempo, en cada punto de concentración; la temperatura asignada a cada punto de concentración se define a partir de la temperatura que

se establezca para el punto de mayor profundidad y de un gradiente de temperatura por metro (decremento).

k) El valor de la viscosidad de la mezcla de gases se calcula de acuerdo a la composición de la mezcla, su valor se corrige para cada tiempo.

l) Los incrementos de tiempo para dar estabilidad a la solución numérica se obtienen utilizando la siguiente aproximación:

$$\Delta t_s = \frac{\phi \Delta z^2}{2D + \frac{k}{\mu} P_{atm}}$$

en donde: $\phi = 0.50$

Δz = La menor distancia entre dos puntos de concentración, en m.

$D = 0.50 \text{ m}^2/\text{día}$.

$k = 1 \text{ darcy}$.

$\mu = 1.35 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$

$P_{atm} = 101,300 \text{ N}/\text{m}^2$

Nota: Considerando el flujo de un sólo gas en un medio poroso y considerando que los gradientes de presión son pequeños, la presión atmosférica en el medio poroso es igual a la presión atmosférica. Fórmula propuesta por Findikakis Angelous N. y Leckie Jamea O. (17).

m) **Datos iniciales.** Los datos iniciales necesarios para alimentar al programa son:

- **Puntos de concentración (número).** El número de puntos en el sentido vertical para los cuales se calcula la concentración tanto de metano como de dióxido de carbono; la numeración debe considerar que el primer punto de concentración esta situado en la parte inferior (la de mayor profundidad) del relleno en estudio; de esta manera, el punto de concentración último se considera como un punto situado en la parte superior del relleno cuya cota es cero.
- **Tiempo inicial y Tiempo final (número de día).** Estos dos valores limitan el lapso para el cual se calculará la concentración, es decir, el tiempo inicial será el número de día en que se inicia el cálculo, y al cual corresponden las concentraciones iniciales, y el tiempo final será el número de día en que finaliza el cálculo.

- **Etapa de generación.** Se presenta la opción de realizar el cálculo durante etapas de generación creciente o decreciente, o de realizar el cálculo eliminando la producción de gases.

Nota: En el programa la generación de gases asignada a cada punto de concentración está determinada por el valor de la permeabilidad; esto es: si un punto de concentración está localizado en un estrato en donde la permeabilidad es menor a 0.1 darcys su generación correspondiente será igual a cero; si este punto de concentración queda situado en estratos de desechos su permeabilidad será mayor y por lo tanto en el programa se asigna la concentración correspondiente.

- **Porcentaje de material degradable (en %).** Es el porcentaje de degradabilidad correspondiente a cada tipo de desecho de acuerdo a su clasificación considerando que los desechos pueden ser muy degradables, degradables o poco degradables.
- **Constante de generación (en año⁻¹).** El valor de la constante de proporcionalidad "k" estimada para cada tipo de desecho de acuerdo al tipo de material y a la etapa de generación.
- **Concentración inicial (en kg/m³).** La concentración inicial de metano y de dióxido de carbono asignada a cada uno de los puntos de concentración.
- **Porosidad (en %).** El valor de la porosidad determinada para cada estrato.

Nota: Se considera "estrato" el definido por dos puntos de concentración consecutivos.

- **Permeabilidad (en darcys).** Al igual que en el caso de la porosidad, deberá indicarse el valor de la permeabilidad para cada estrato.

Nota: Se considera "estrato" el definido por dos puntos de concentración consecutivos.

- **Temperatura y gradiente de temperatura (en °C).** La temperatura en el fondo del relleno (asignada al primer punto) y el decremento de temperatura por metro. El programa calcula la temperatura para cada punto de concentración tomando como referencia la temperatura indicada asignando ésta al punto situado a la máxima profundidad.

Nota: La temperatura se mantiene constante en el tiempo para cada uno de los puntos de concentración. Incluyendo una subrutina para proporcionar diferentes temperaturas es factible modificar, de manera sencilla, la temperatura por períodos en el tiempo.

- **Espesor de estrato (en m).** El espesor de un estrato será la distancia entre puntos de concentración consecutivos.

Nota: Se considera "estrato" el definido por dos puntos de concentración seguidos.

- **Generación total de metano y de dióxido de carbono (en kg/m³).** La generación total de metano y de dióxido de carbono estimada que será generada por los desechos dispuestos en el relleno sanitario.

Nota: El programa considera el 50% de la generación total en cualquiera de las etapas de generación. Durante una etapa de generación creciente significará la cantidad total de gas a producir y durante una etapa de generación decreciente la cantidad total representará el remanente por producir.

Se considera que la capa de fondo en el relleno es impermeable y, por lo tanto, no existirá flujo hacia un estrato situado a mayor profundidad.

n) Cálculo en el programa de computadora.

- **Generación total. Criterio.** Tanto para la etapa de generación creciente como para la etapa de generación decreciente se considera el 50% de la generación total, es decir, la producción total durante la etapa creciente será igual a la mitad de la generación total y en la etapa decreciente se considera que el remanente por producir será igual, al inicio del cálculo, a la mitad de la generación total.
- **Incremento de tiempo.** La solución explícita requiere menor esfuerzo, en lo referente a programación, que una solución implícita; sin embargo, existen algunas limitaciones en cuanto al tamaño del incremento de tiempo que puede ser usado. Un incremento de tiempo mayor al valor crítico hace que el método explícito sea inestable. El valor utilizado como incremento de tiempo es indicado en el inciso (l).
- **Constantes utilizadas.** En el programa son valores fijos las siguientes constantes:
 - **Peso molecular del metano:** 16.0426
 - **Peso molecular del dióxido de carbono:** 44.009
 - **Constante Universal de los Gases:** 8.314 joules/g-mol, K

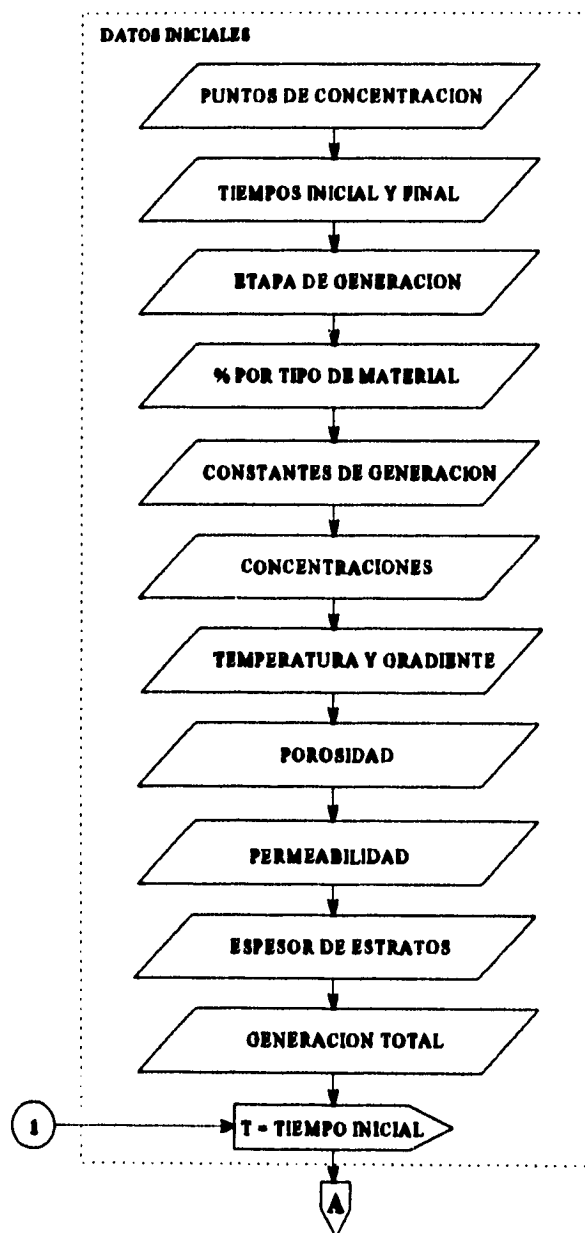
- Presión atmosférica: 101,300 N/m²
- Densidad del metano: 0.7126 kg/m³
- Densidad del dióxido de carbono: 1.9783 kg/m³

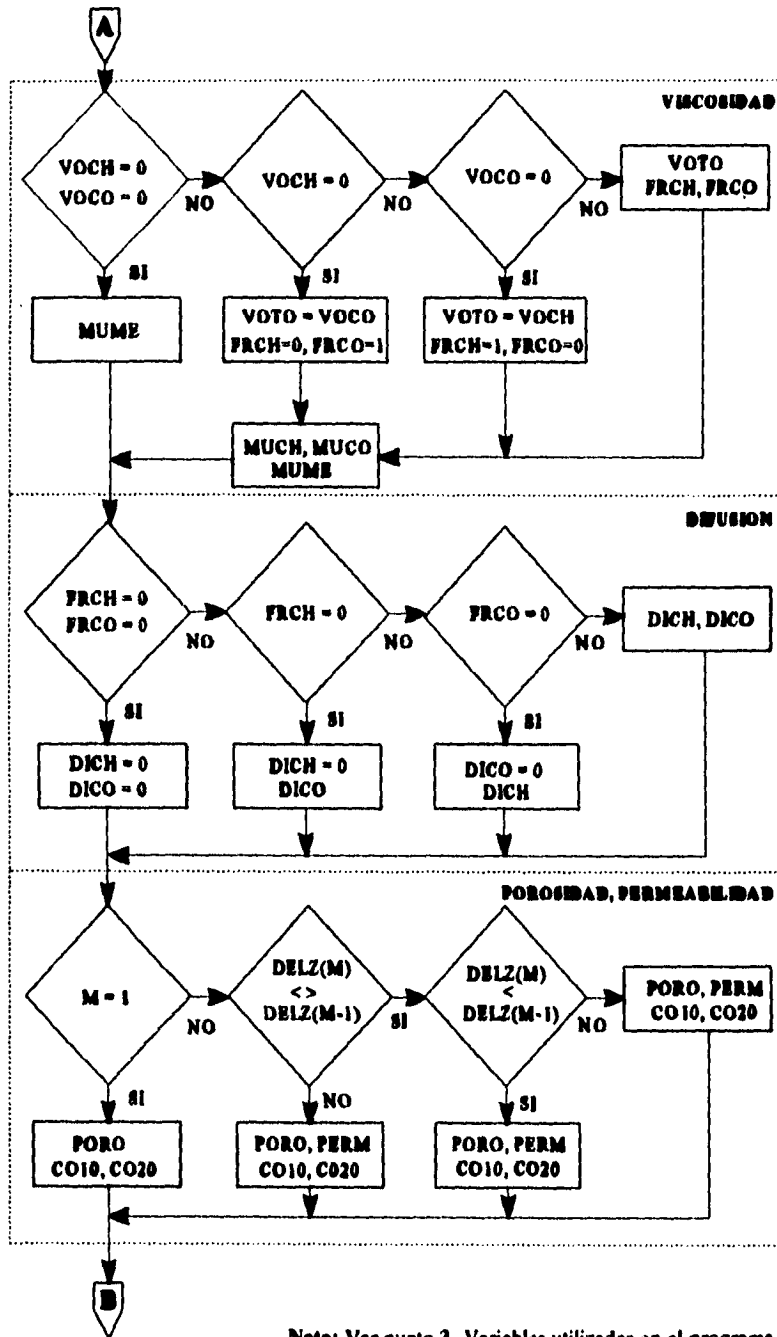
ñ) De los resultados.

El cálculo se realiza con los incrementos de tiempo obtenidos a partir de la fórmula presentada en el inciso (l); dado que el diferencial de tiempo utilizado puede resultar pequeño, se guardan únicamente los valores correspondientes a periodos de 10 días. El tiempo y el valor de la concentración de los gases obtenido en cada uno de los puntos se guarda en archivos de datos, uno para cada punto de concentración.

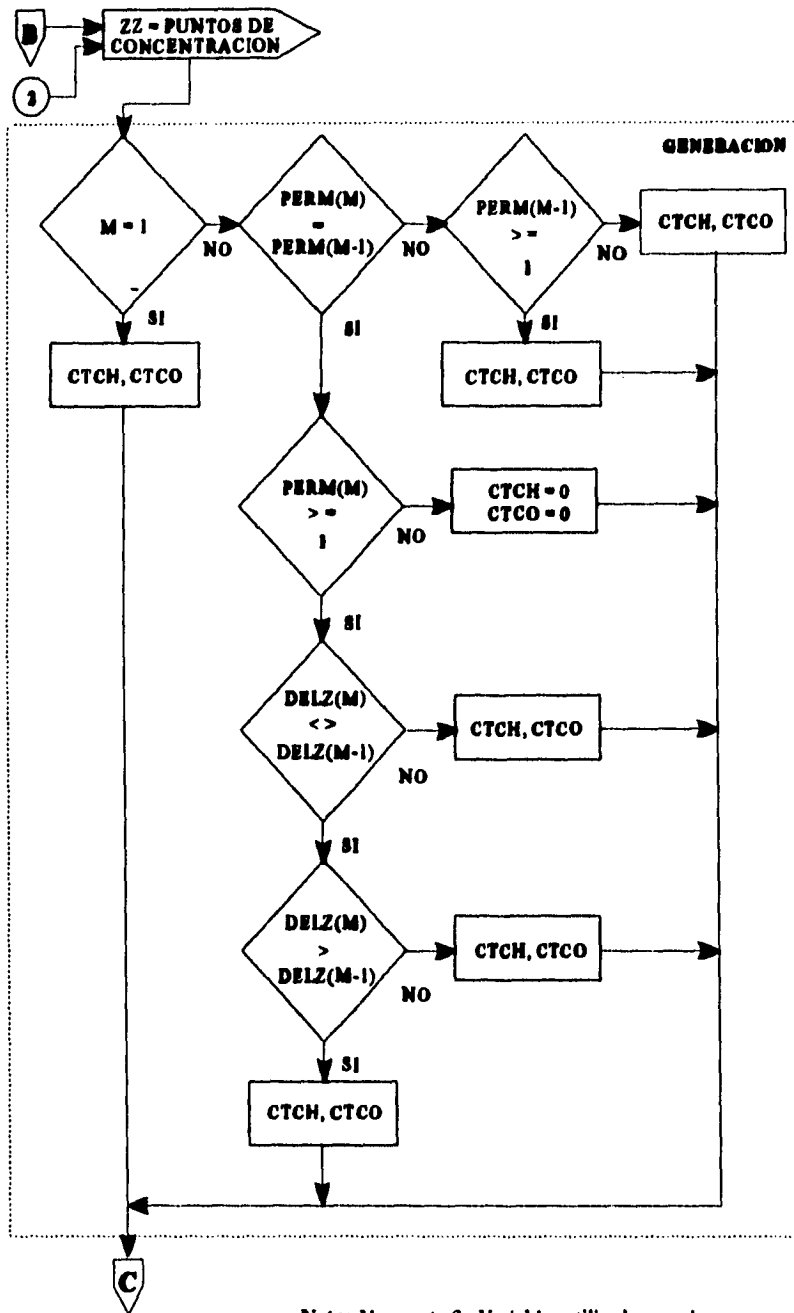
B. Programa de computadora.

1. Diagrama de flujo.

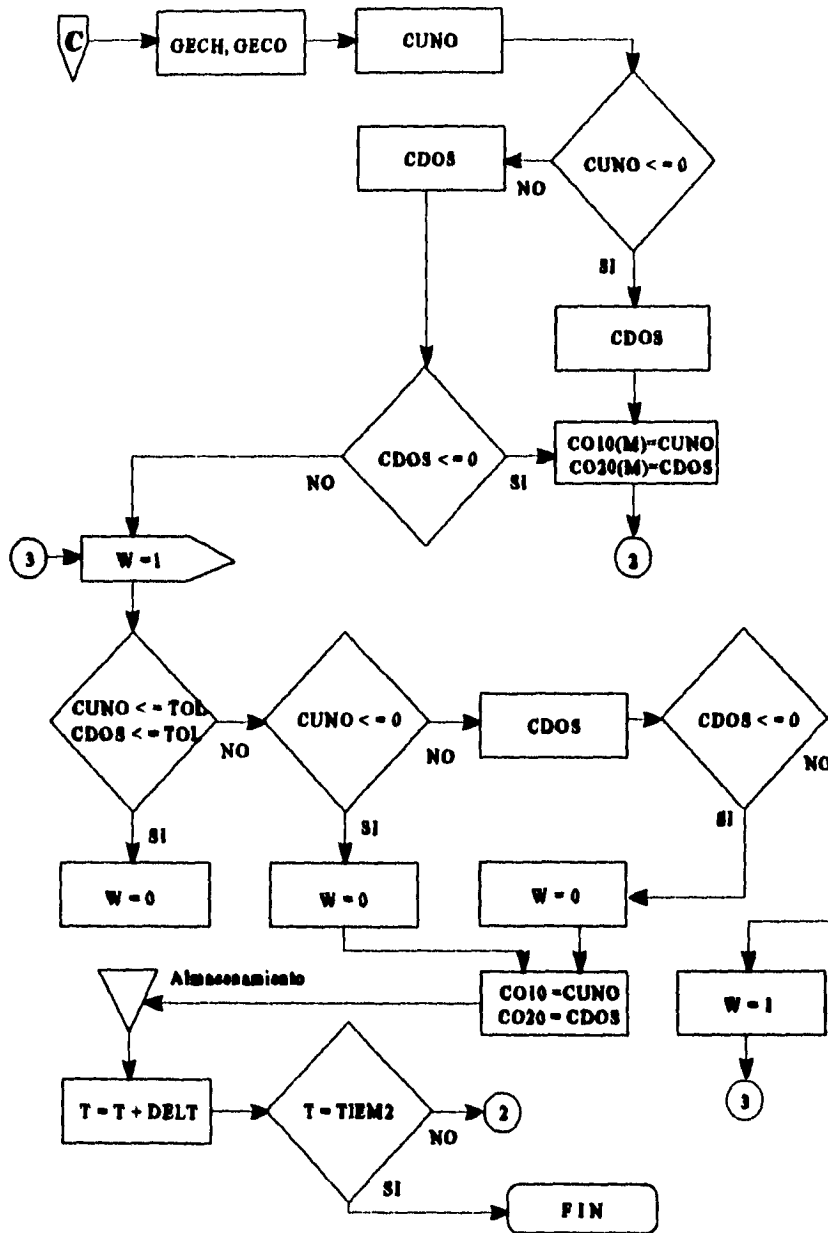




Nota: Ver punto 3. Variables utilizadas en el programa (página 66).



Nota: Ver punto 3. Variables utilizadas en el programa (página 66).



Nota: Ver punto 3. Variables utilizadas en el programa (página 66).

2. Listado del programa.

```
REM TESIS DE LICENCIATURA
REM TEMA: DIFUSION Y GENERACION DE BIOGAS EN RELLENOS SANITARIOS
REM METODO DE DIFERENCIAS FINITAS
REM DISEÑO Y ELABORACION: CESAR CALVO
REM NOMBRE DEL ARCHIVO: CONVER18.BAS
REM FECHA: ABRIL DE 1995
REM SE PREGUNTAN LOS DATOS INICIALES
CLS
CLEAR
LOCATE 1, 25
PRINT "METODO DE DIFERENCIAS FINITAS APLICADO"
LOCATE 2, 23
PRINT "AL FLUJO DE BIOGAS EN RELLENOS SANITARIOS"
LOCATE 3, 1
PRINT "PUNTOS DE CONCENTRACION EN EL SENTIDO VERTICAL (Z)"
LOCATE 3, 53
INPUT ZZ
Z = ZZ - 1
LOCATE 4, 1
PRINT "TIEMPO INICIAL (día número)"
LOCATE 4, 40
PRINT "TIEMPO FINAL (día número)"
LOCATE 4, 29
INPUT TIEM1
LOCATE 4, 66
INPUT TIEM2
LOCATE 5, 1
PRINT "ETAPA DE GENERACION =====>"
LOCATE 6, 1
PRINT "(1) CRECIENTE, (2) DECRECIENTE, (0) SIN GENERACION"
LOCATE 5, 28
INPUT ETAPA
LOCATE 7, 1
PRINT "PORCENTAJE DE MATERIAL DEGRADABLE"
PRINT "MUY DEGRADABLE (%)"
PRINT "DEGRADABLE (%)"
PRINT "POCO DEGRADABLE (%)"
IF ETAPA = 1 THEN
  LOCATE 8, 20
  INPUT POA1
  LOCATE 9, 17
  INPUT POB1
  LOCATE 10, 21
  INPUT POC1
  POA2 = 0: POB2 = 0: POC2 = 0
ELSE
  IF ETAPA = 2 THEN
    LOCATE 8, 20
    INPUT POA2
    LOCATE 9, 17
    INPUT POB2
```

```

        LOCATE 10, 21
        INPUT POC2
        POA1 = 0: POB1 = 0: POC1 = 0
    ELSE
        POA1 = 0: POB1 = 0: POC1 = 0: POA2 = 0: POB2 = 0: POC2 = 0
    END IF
END IF
LOCATE 11, 1
PRINT "CONSTANTES DE GENERACION"
PRINT "MUY DEGRADABLE (en año -1)"
PRINT "DEGRADABLE (en año -1)"
PRINT "POCO DEGRADABLE (en año -1)"
IF ETAPA = 1 THEN
    LOCATE 12, 27
    INPUT COA1
    LOCATE 13, 23
    INPUT COB1
    LOCATE 14, 28
    INPUT COC1
    COA2 = 0: COB2 = 0: COC2 = 0
ELSE
    IF ETAPA = 2 THEN
        LOCATE 12, 27
        INPUT COA2
        LOCATE 13, 23
        INPUT COB2
        LOCATE 14, 28
        INPUT COC2
        COA1 = 0: COB1 = 0: COC1 = 0
    ELSE
        COA1 = 0: COB1 = 0: COC1 = 0: COA2 = 0: COB2 = 0: COC2 = 0
    END IF
END IF
V = TIEM2 - TIEM1
DIM CO10(ZZ), CO20(ZZ), PORO(Z), PERM(Z), DELZ(Z), CUNO(Z), CDOS(Z)
50 GOSUB 5000
REM CALCULO DE LA GENERACION REMANENTE
CTCH = CTCH / 2
CTCO = CTCO / 2
REM CONSTANTES UTILIZADAS
PMCH = 16.0426
PMCO = 44.009
COUN = 8.314
CLS
REM 100 GOSUB 1000
REM SE INICIAN LOS CALCULOS
REM CONSTANTE DE LOS GASES
COCH = (COUN / PMCH) / 1000
COCO = (COUN / PMCO) / 1000
REM INCREMENTO DE TIEMPO
DELZ = DELZ(1)
FOR I = 1 TO Z
    IF DELZ > DELZ(I) THEN
        DELZ = DELZ(I)
    
```

```

END IF
NEXT I
I = 0
MUME = .0000135 / 86400
PERM = 9.87E-13
PORO = .5
PATM = 101300
DELT = PORO * DELZ ^ 2 / (2 * .5 + (PERM * PATM / MUME))
T = TIEM1
REM PARA VARIOS PUNTOS
REM SE CALCULAN LAS CONCENTRACIONES CUNO Y CDOS
REM EN EL TIEMPO
REM SE CREAN ARCHIVOS DE DATOS PARA 11 PUNTOS
OPEN "CADATOSFIN.DAT" FOR OUTPUT AS #14
OPEN "CAFINAL001.DAT" FOR OUTPUT AS #1
OPEN "CAFINAL002.DAT" FOR OUTPUT AS #2
OPEN "CAFINAL003.DAT" FOR OUTPUT AS #3
OPEN "CAFINAL004.DAT" FOR OUTPUT AS #4
OPEN "CAFINAL005.DAT" FOR OUTPUT AS #5
OPEN "CAFINAL006.DAT" FOR OUTPUT AS #6
OPEN "CAFINAL007.DAT" FOR OUTPUT AS #7
OPEN "CAFINAL008.DAT" FOR OUTPUT AS #8
OPEN "CAFINAL009.DAT" FOR OUTPUT AS #9
OPEN "CAFINAL010.DAT" FOR OUTPUT AS #10
OPEN "CAFINAL011.DAT" FOR OUTPUT AS #11
WRITE #14, BAJA, DELZ
WRITE #1, CO10(1), CO20(1)
WRITE #2, CO10(2), CO20(2)
WRITE #3, CO10(3), CO20(3)
WRITE #4, CO10(4), CO20(4)
WRITE #5, CO10(5), CO20(5)
WRITE #6, CO10(6), CO20(6)
WRITE #7, CO10(7), CO20(7)
WRITE #8, CO10(8), CO20(8)
WRITE #9, CO10(9), CO20(9)
WRITE #10, CO10(10), CO20(10)
WRITE #11, CO10(11), CO20(11)
CLOSE
REM CONSTANTES DE GENERACION "K" EN LA ETAPA DE CRECIENTE
GEA1 = COA1 / 365 * DELT: GEB1 = COB1 / 365 * DELT: GEC1 = COC1 / 365 * DELT
REM CONSTANTES DE GENERACION "K" EN LA ETAPA DE DECRECIENTE
GEA2 = COA2 / 365 * DELT: GEB2 = COB2 / 365 * DELT: GEC2 = COC2 / 365 * DELT
TOL = .00001
W = 1
LIN = 1
Q = 0
R = 0
DO
FOR M = 1 TO Z
REM TEMPERATURA ABSOLUTA
PROF = PROF + DELZ(M)
REM TEMPERATURA ESTIMADA POR QUINCENA PARA UN AÑO
SELECT CASE T
CASE 0 TO 365

```

```

      TEMC = 25
CASE 365 TO 730
      TEMC = 25
CASE 730 TO 1065
      TEMC = 25
CASE 1065 TO 1430
      TEMC = 24
CASE 1430 TO 1795
      TEMC = 24
CASE 1795 TO 2160
      TEMC = 23
CASE 2160 TO 2525
      TEMC = 23
CASE 2525 TO 2870
      TEMC = 25
END SELECT
IF M = 1 THEN
      TEMK = TEMC + 273
ELSE
      TEMK = TEMC - BAJA * PROF + 273
END IF
REM FRACCIONES MOLARES
VOCH = CO10(M) / .7126
VOCO = CO20(M) / 1.9783
IF VOCH = 0 AND VOCO = 0 THEN
      FRCH = 0
      FRCO = 0
      MUME = .0000135 / 86400
ELSE
      IF VOCH = 0 THEN
            VOTO = VOCO
            FRCH = 0
            FRCO = 1
      ELSE
            IF VOCO = 0 THEN
                  VOTO = VOCH
                  FRCH = 1
                  FRCO = 0
            ELSE
                  VOTO = VOCH + VOCO
                  FRCH = VOCH / VOTO
                  FRCO = VOCO / VOTO
            END IF
      END IF
END IF
REM PESO MOLECULAR DE LA MEZCLA
PMME = FRCH * PMCH + FRCO * PMCO
REM VISCOSIDAD DE LOS GASES
MUCH = (1.935 + .0305 * TEMK) * 10 ^ -6
MUCO = (-30.212 + .256 * TEMK - .00035 * TEMK ^ 2) * 10 ^ -6
TE11 = (1 + SQR(MUCH / MUCH) * (PMCH / PMCH) ^ .25) ^ 2 / SQR(8 + 8 * PMCH / PMCH)
TE12 = (1 + SQR(MUCH / MUCO) * (PMCO / PMCH) ^ .25) ^ 2 / SQR(8 + 8 * PMCH / PMCO)
TE21 = (1 + SQR(MUCO / MUCH) * (PMCH / PMCO) ^ .25) ^ 2 / SQR(8 + 8 * PMCO / PMCH)
TE22 = (1 + SQR(MUCO / MUCO) * (PMCO / PMCO) ^ .25) ^ 2 / SQR(8 + 8 * PMCO / PMCO)
MUME = (FRCH * MUCH / (FRCH * TE11 + FRCO * TE12) + FRCO * MUCO / (FRCH * TE21

```

```

+ FRCO * TE22)) / 86400
END IF
REM COEFICIENTE DE DIFUSION
IF FRCH = 0 AND FRCO = 0 THEN
  DICH = 0
  DICO = 0
ELSE
  IF FRCH = 0 THEN
    PATM = 1
    DICH = 0
    DICO = (.001858 * T ^ 1.5 * ((PMCO + PMCO) / (PMCO * PMCO)) ^ .5) / (PATM * 3.941
^ 2 * 1.1756)
  ELSE
    IF FRCO = 0 THEN
      PATM = 1
      DICH = (.001858 * T ^ 1.5 * ((PMCH + PMCH) / (PMCH * PMCH)) ^ .5) / (PATM *
3.758 ^ 2 * 1.057)
      DICO = 0
    ELSE
      PATM = 1
      DICH = (.001858 * T ^ 1.5 * ((PMCH + PMCO) / (PMCH * PMCO)) ^ .5) / (PATM *
3.8495 ^ 2 * 1.1124)
      DICO = (.001858 * T ^ 1.5 * ((PMCH + PMCO) / (PMCH * PMCO)) ^ .5) / (PATM *
3.8495 ^ 2 * 1.1124)
    END IF
  END IF
END IF
END IF
REM PARA UN PUNTO
REM SE CALCULAN LAS CONCENTRACIONES CUNO Y CDOS
IF M = 1 THEN
  CO10 = 0; CO11 = CO10(M); CO12 = CO10(M + 1)
  CO20 = 0; CO21 = CO20(M); CO22 = CO20(M + 1)
  PORO = (PORO(M) + PORO(M - 1)) / 2
ELSE
  IF DELZ(M) <> DELZ(M - 1) THEN
    CO10 = CO10(M - 1); CO11 = CO10(M); CO12 = CO10(M + 1)
    CO20 = CO20(M - 1); CO21 = CO20(M); CO22 = CO20(M + 1)
    IF DELZ(M) < DELZ(M - 1) THEN
      CO10 = CO11 - (ABS(CO11 - CO10) / DELZ(M - 1)) * DELZ(M)
      CO20 = CO21 - (ABS(CO21 - CO20) / DELZ(M - 1)) * DELZ(M)
      PORO = (PORO(M) + PORO(M - 1)) / 2
      PERM = 9.87E-13 * (PERM(M) + PERM(M - 1)) / 2
      A = DELT / (PORO * DELZ(M) ^ 2)
      B = (PERM * TEMK * DELT) / (4 * PORO * MUME * DELZ(M) ^ 2)
    ELSE
      CO12 = CO11 + (ABS(CO12 - CO11) / DELZ(M)) * DELZ(M - 1)
      CO22 = CO21 + (ABS(CO22 - CO21) / DELZ(M)) * DELZ(M - 1)
      PORO = (PORO(M) + PORO(M - 1)) / 2
      PERM = 9.87E-13 * (PERM(M) + PERM(M - 1)) / 2
      A = DELT / (PORO * DELZ(M - 1) ^ 2)
      B = (PERM * TEMK * DELT) / (4 * PORO * MUME * DELZ(M - 1) ^ 2)
    END IF
  ELSE
    CO10 = CO10(M - 1); CO11 = CO10(M); CO12 = CO10(M + 1)

```

```

CO20 = CO20(M - 1): CO21 = CO20(M): CO22 = CO20(M + 1)
PORO = (PORO(M) + PORO(M - 1)) / 2
PERM = 9.87E-13 * (PERM(M) + PERM(M - 1)) / 2
A = DELT / (PORO * DELZ(M) ^ 2)
B = (PERM * TEMK * DELT) / (4 * PORO * MUME * DELZ(M) ^ 2)
END IF
END IF
IF M = 1 THEN
CTCH = DELZ(M) * CTCH / 2
CTCO = DELZ(M) * CTCO / 2
ELSE
IF PERM(M) = PERM(M - 1) THEN
IF PERM(M) >= 1 THEN
IF DELZ(M) <> DELZ(M - 1) THEN
IF DELZ(M) > DELZ(M - 1) THEN
CTCH = DELZ(M - 1) * CTCH
CTCO = DELZ(M - 1) * CTCO
ELSE
CTCH = DELZ(M) * CTCH
CTCO = DELZ(M) * CTCO
END IF
END IF
ELSE
CTCH = DELZ(M) * CTCH
CTCO = DELZ(M) * CTCO
END IF
ELSE
CTCH = 0
CTCO = 0
END IF
ELSE
IF PERM(M - 1) >= 1 THEN
CTCH = DELZ(M - 1) * CTCH
CTCO = DELZ(M - 1) * CTCO
ELSE
CTCH = DELZ(M) * CTCH
CTCO = DELZ(M) * CTCO
END IF
END IF
END IF
END IF
C = DICH * (CO12 - 2 * CO11 + CO10)
D = 4 * CO11 * (COCH * (CO12 - 2 * CO11 + CO10) + COCO * (CO22 - 2 * CO21 + CO20)) +
COCH * (CO12 - CO10) ^ 2 + COCO * (CO22 - CO20) * (CO12 - CO10)
SELECT CASE ETAPA
CASE IS = 1
GECH = CTCH * (POA1 / 100 * GEA1 * EXP(GEA1 * T) + POB1 / 100 * GEB1 * EXP(GEB1
* T) + POC1 / 100 * GEC1 * EXP(GEC1 * T))
GECO = CTCO * (POA1 / 100 * GEA1 * EXP(GEA1 * T) + POB1 / 100 * GEB1 * EXP(GEB1
* T) + POC1 / 100 * GEC1 * EXP(GEC1 * T))
CASE IS = 2
GECH = CTCH * (POA2 / 100 * GEA2 * EXP(-GEA2 * T) + POB2 / 100 * GEB2 *
EXP(-GEB2 * T) + POC2 / 100 * GEC2 * EXP(-GEC2 * T))
GECO = CTCO * (POA2 / 100 * GEA2 * EXP(-GEA2 * T) + POB2 / 100 * GEB2 * EXP(-GEB2
* T) + POC2 / 100 * GEC2 * EXP(-GEC2 * T))
CASE IS = 0

```

```

      GECH = 0
      GECO = 0
    END SELECT
    ALCH = (DELT / PORO) * GECH
    ALCO = (DELT / PORO) * GECO
    CUNO = A * C - B * D + CO11 + ALCH
    IF CUNO <= 0 THEN
      CUNO = 0
      E = DICO * (CO22 - 2 * CO21 + CO20)
      F = 4 * CO21 * (COCH * (CO12 - 2 * CUNO + CO10) + COCO * (CO22 - 2 * CO21 + CO20))
+ COCH * (CO12 - CO10) * (CO22 - CO10) + COCO * (CO22 - CO20) ^ 2
      CDOS = A * E - B * F + CO21 + ALCO
      GOTO 900
    ELSE
      E = DICO * (CO22 - 2 * CO21 + CO20)
      F = 4 * CO21 * (COCH * (CO12 - 2 * CUNO + CO10) + COCO * (CO22 - 2 * CO21 + CO20))
+ COCH * (CO12 - CO10) * (CO22 - CO10) + COCO * (CO22 - CO20) ^ 2
      CDOS = A * E - B * F + CO21 + ALCO
    END IF
    IF CDOS <= 0 THEN
      CDOS = 0
      GOTO 900
    ELSE
      W = 1
      DO WHILE W = 1
        IF ABS(CO11 - CUNO) < TOL AND ABS(CO21 - CDOS) < TOL THEN
          W = 0
        ELSE
          CO11 = CUNO
          CO21 = CDOS
          C = DICH * (CO12 - 2 * CO11 + CO10)
          D = 4 * CO11 * (COCH * (CO12 - 2 * CO11 + CO10) + COCO * (CO22 - 2 * CO21 +
CO20)) + COCH * (CO12 - CO10) ^ 2 + COCO * (CO22 - CO20) * (CO12 - CO10)
          CUNO = A * C - B * D + CO11 + ALCH
          IF CUNO <= 0 THEN
            CUNO = 0
            E = DICO * (CO22 - 2 * CO21 + CO20)
            F = 4 * CO21 * (COCH * (CO12 - 2 * CUNO + CO10) + COCO * (CO22 - 2 * CO21
+ CO20)) + COCH * (CO12 - CO10) * (CO22 - CO10) + COCO * (CO22 - CO20) ^ 2
            CDOS = A * E - B * F + CO21 + ALCO
            W = 0
          ELSE
            E = DICO * (CO22 - 2 * CO21 + CO20)
            F = 4 * CO21 * (COCH * (CO12 - 2 * CUNO + CO10) + COCO * (CO22 - 2 * CO21
+ CO20)) + COCH * (CO12 - CO10) * (CO22 - CO10) + COCO * (CO22 - CO20) ^ 2
            CDOS = A * E - B * F + CO21 + ALCO
            IF CDOS <= 0 THEN
              CDOS = 0
              W = 0
            ELSE
              W = 1
            END IF
          END IF
        END IF
      END IF
    END IF
  END IF

```

```

        LOOP
        END IF
900    CO10(M) = CUNO
        CO20(M) = CDOS
    NEXT M
    M = 1
    R = R + 1
    IF R >= 10 / DELT THEN
        R = 0
        IF Q < V THEN
            Q = Q + 10
            I = 0
            OPEN "C:\CESAR\DATOSFIN.DAT" FOR APPEND AS #14
            WRITE #14, TEMC, BAJA, PROF, TEMK
            CLOSE #14
            OPEN "CAFINAL001.DAT" FOR APPEND AS #1
            OPEN "CAFINAL002.DAT" FOR APPEND AS #2
            OPEN "CAFINAL003.DAT" FOR APPEND AS #3
            OPEN "CAFINAL004.DAT" FOR APPEND AS #4
            OPEN "CAFINAL005.DAT" FOR APPEND AS #5
            OPEN "CAFINAL006.DAT" FOR APPEND AS #6
            OPEN "CAFINAL007.DAT" FOR APPEND AS #7
            OPEN "CAFINAL008.DAT" FOR APPEND AS #8
            OPEN "CAFINAL009.DAT" FOR APPEND AS #9
            OPEN "CAFINAL010.DAT" FOR APPEND AS #10
            OPEN "CAFINAL011.DAT" FOR APPEND AS #11
            FOR I = 1 TO ZZ
                CCH4 = CO10(I) / .7126
                CCO2 = CO20(I) / 1.9783
                PRINT #1, USING "##.#####"; T; CCH4; CCO2
            NEXT I
            CLOSE
        ELSE
            CLOSE
            BEEP
            END
        END IF
        END IF
        T = T + DELT
        PROF = 0
        CC = CC + 1
        IF CC = 10000000 THEN
            BEEP
            END
        END IF
        LOCATE 21, 2
        PRINT "T = "; USING "###.#####"; T
        LOCATE 22, 2
        PRINT "VECES="; CC
    LOOP WHILE T < TIEM2
    CLOSE
    END
    REM SUBROUTINA DE CAPTURA DE DATOS INICIALES
5000 LOCATE 16, 1

```



```

PRINT "
LOCATE 17, 1
PRINT "
LOCATE 18, 1
PRINT "
LOCATE 16, 1
PRINT "CONCENTRACION INICIAL DE METANO"
LOCATE 17, 1
PRINT " (en kg/m3)"
FOR I = 1 TO ZZ
  LOCATE 18, 1
  PRINT "CO10("; USING "##"; I
  LOCATE 18, 8
  PRINT ")="
  LOCATE 18, 11
  INPUT CO10(I)
NEXT I
LOCATE 16, 1
PRINT "
LOCATE 17, 1
PRINT "
LOCATE 18, 1
PRINT "
LOCATE 16, 1
PRINT "CONCENTRACION INICIAL DE DIOXIDO DE CARBONO"
LOCATE 17, 1
PRINT " (en kg/m3)"
FOR I = 1 TO ZZ
  LOCATE 18, 1
  PRINT "CO20("; USING "##"; I
  LOCATE 18, 8
  PRINT ")="
  LOCATE 18, 11
  INPUT CO20(I)
NEXT I
LOCATE 16, 1
PRINT "
LOCATE 17, 1
PRINT "
LOCATE 18, 1
PRINT "
LOCATE 16, 1
PRINT "POROSIDAD"
FOR I = 1 TO Z
  LOCATE 18, 1
  PRINT "PORO("; USING "##"; I
  LOCATE 18, 8
  PRINT ")="
  LOCATE 18, 11
  INPUT PORO(I)
NEXT I
LOCATE 16, 1
PRINT "
LOCATE 17, 1

```

```

PRINT "
LOCATE 18, 1
PRINT "
LOCATE 16, 1
PRINT "PERMEABILIDAD"
LOCATE 17, 1
PRINT " (en darcys)"
FOR I = 1 TO Z
  LOCATE 18, 1
  PRINT "PERM("; USING "##"; I
  LOCATE 18, 8
  PRINT ")="
  LOCATE 18, 11
  INPUT PERM(I)
NEXT I
LOCATE 16, 1
PRINT "
LOCATE 17, 1
PRINT "
LOCATE 18, 1
PRINT "
LOCATE 16, 1
PRINT " TEMPERATURA"
LOCATE 17, 1
PRINT "(en grados centígrados)"
LOCATE 18, 1
PRINT "TEMPC="
LOCATE 18, 7
INPUT TEMPC
LOCATE 16, 30
PRINT "DECREMENTO DE TEMPERATURA POR METRO"
LOCATE 17, 1
PRINT "(en grados centígrados)"
LOCATE 18, 30
PRINT "DECREMENTO="
LOCATE 18, 42
INPUT BAJA
LOCATE 16, 1
PRINT "
LOCATE 17, 1
PRINT "
LOCATE 18, 1
PRINT "
LOCATE 16, 1
PRINT "DELTA Z"
LOCATE 17, 1
PRINT " (en metros)"
FOR I = 1 TO Z
  LOCATE 18, 1
  PRINT "DELZ("; USING "##"; I
  LOCATE 18, 8
  PRINT ")="
  LOCATE 18, 11
  INPUT DELZ(I)

```

```

NEXT I
LOCATE 16, 1
PRINT "
LOCATE 17, 1
PRINT "
LOCATE 18, 1
PRINT "
LOCATE 16, 1
PRINT "GENERACION TOTAL DE METANO"
LOCATE 17, 1
PRINT " (en kg/m3)"
LOCATE 18, 1
INPUT "CTCH="; CTCH
LOCATE 16, 1
PRINT "
LOCATE 17, 1
PRINT "
LOCATE 18, 1
PRINT "
LOCATE 16, 1
PRINT "GENERACION TOTAL DE DIOXIDO DE CARBONO"
LOCATE 17, 1
PRINT " (en kg/m3)"
LOCATE 18, 1
INPUT "CTCO="; CTCO
5100 RETURN
REM SE IMPRIME PARA CADA T: CUNO Y CDOS
5500 IF LIN >= 6 THEN
    FOR P = 1 TO 6
        LOCATE 17 + P, 1
        PRINT "
    NEXT P
    P = 1
    LIN = 1
    LIN = LIN + 1
    LOCATE 17 + LIN, 21
    PRINT "CUNO("; USING "##"; M
    LOCATE 17 + LIN, 28
    PRINT ")="
    LOCATE 17 + LIN, 30
    PRINT USING "##.#####"; CUNO
    LOCATE 17 + LIN, 47
    PRINT "CDOS("; USING "##"; M
    LOCATE 17 + LIN, 54
    PRINT ")="
    LOCATE 17 + LIN, 56
    PRINT USING "##.#####"; CDOS
ELSE
    LIN = LIN + 1
    LOCATE 17 + LIN, 21
    PRINT "CUNO("; USING "##"; M
    LOCATE 17 + LIN, 28
    PRINT ")="
    LOCATE 17 + LIN, 30

```

```

PRINT USING "##.#####"; CUNO
LOCATE 17 + LIN, 47
PRINT "CDOS("; USING "##"; M
LOCATE 17 + LIN, 54
PRINT ")="
LOCATE 17 + LIN, 56
PRINT USING "##.#####"; CDOS
END IF
5600 RETURN

```

3. Variables utilizadas en el programa.

a) Datos.

TEMC = Temperatura.
CO10 = Concentración de metano.
CO20 = Concentración de dióxido de carbono.
PORO = Porosidad.
PERM = Permeabilidad.
DELT = Diferencial de tiempo.
DELZ = Espesor de estratos.
TIEM1 = Número de día inicial (para iniciar el cálculo).
TIEM2 = Número de día final (para terminar el cálculo).
CO11 = Concentración de metano.
CO12 = Concentración de dióxido de carbono.
COA1, COB1, COC1 = Constantes de generación
ZZ = Número de puntos de concentración.
CTCH = Generación total de metano.
CTCO = Generación total de dióxido de carbono.
POA1, POB1, POC1 = Porcentajes de material degradable.

b) Cálculos.

Z = Número de estratos.
FRCH = Fracción molar de metano.
FRCO = Fracción molar de dióxido de carbono.
MUME = Viscosidad de la mezcla
COCH = Constante del gas metano.
COCO = Constante del gas dióxido de carbono.
DICH = Coeficiente de difusión de metano (en una mezcla formada por dos gases).
DICO = Coeficiente de difusión de dióxido de carbono (en una mezcla formada por dos gases).
TEMK = Temperatura absoluta.
GECH = Generación de metano en el segmento.
GECO = Generación de dióxido de carbono en el segmento.

VOCH = Volumen de metano.
VOCO = Volumen de dióxido de carbono.
VOTO = Volumen total de gas.
PROF = Profundidad.

c) Resultados.

CUNO = Concentración de metano.
CDOS = Concentración de dióxido de carbono.

d) Constantes.

PMCH = Peso molecular del metano.
PMCO = Peso molecular de dióxido de carbono.
COUN = Constante Universal de los Gases.
PATM = Presión atmosférica.

IV. Ejemplo de aplicación.

A. Ejemplo No.1.

1. Condiciones iniciales.

a) Datos generales.

Este primer ejemplo se resuelve para los valores indicados por Findikakis Angelous N. y Leckie James O. (17); dado que no se contó con la totalidad de la información empleada en el trabajo mencionado; los datos faltantes se fijaron bajo las siguientes consideraciones:

- Generación potencial.

La generación potencial en el caso de metano es de $0.06 \text{ m}^3/\text{kg}$ y de $0.06 \text{ m}^3/\text{kg}$ en el de dióxido de carbono. Considerando una muestra de 100 kg de desechos y que la densidad del metano es $0.7176 \text{ kg}/\text{m}^3$ y la densidad del dióxido de carbono es $1.9783 \text{ kg}/\text{m}^3$, se tiene:

$$\text{CH}_4 \quad 0.06 (100) = 6.00 \text{ m}^3 \quad \rightarrow \quad 50 \%$$

$$\text{CO}_2 \quad 0.06 (100) = \underline{6.00 \text{ m}^3} \quad \rightarrow \quad 50 \%$$

$$\text{Volumen de la mezcla} = 12.00 \text{ m}^3$$

- **Peso de metano y de dióxido de carbono.**

$$\text{CH}_4 \quad 6 (0.7126) = 4.2756 \text{ kg}$$

$$\text{CO}_2 \quad 6 (1.9783) = 11.8698 \text{ kg}$$

- **Cantidad teórica de cada componente.**

Peso seco:

$$\text{CH}_4 \quad \frac{4.2756}{81} = 0.0528 \text{ kg/kg}$$

$$\text{CO}_2 \quad \frac{11.8698}{81} = 0.1465 \text{ kg/kg}$$

Peso de los desechos:

$$\text{CH}_4 \quad \frac{4.2756}{100} = 0.02283 \text{ kg/kg} \quad \frac{815 \text{ kg/m}^3}{34.85 \text{ kg/m}^3}$$

$$\text{CO}_2 \quad \frac{11.8698}{100} = 0.1187 \text{ kg/kg} \quad \frac{815 \text{ kg/m}^3}{96.74 \text{ kg/m}^3}$$

- **Constantes de generación.**

La generación de metano se determina a partir de los períodos que para cada tipo de desecho se indican a continuación:

Características de los desechos	Tiempo ($t_{1/2}$)	Tiempo ($t_{9/10}$)	K ₁ (año ⁻¹)	K ₂ (año ⁻¹)
Muy degradable	0.5	5	7.82	.87
Degradable	3.5	30	1.11	0.15
Poco degradable	25	40	0.16	0.26

Fuente: Findikakis Angelous N. y Leckie James O. (17)

En el cuadro siguiente se indican los datos utilizados para alimentar el programa de computadora.

Cuadro IV.A.1. Datos del relleno	
Profundidad del relleno	26.00 m
Capas intermedias	2.00 m
Cubierta final	2.00 m
Estratos de desechos sólidos	6.00 m
Porosidad de los desechos	0.5
Porosidad de material de cubierta	0.5
Permeabilidad de los desechos	1 darcy
Permeabilidad de material de cubierta	10 ⁻¹ darcy
Densidad de los desechos	815 kg/m ³
Composición de los desechos	
Muy degradable	15.00 %
Degradable	55.00 %
Poco degradable	30.00 %
Constantes de generación	
Muy degradable	0.870
Degradable	0.150
Poco degradable	0.260
Contenido de humedad	19 %
Temperatura ambiente	17.8 °C
Temperatura en el fondo del relleno	29.2 °C
Gradiente de temperatura	0.4 °C por metro
Generación total de metano	17.43 kg/m ³
Generación total de dióxido de carbono	47.37 kg/m ³

Se consideró un relleno sanitario definido por tres estratos de desechos sólidos, cada uno de 6 metros de espesor con capas impermeables intermedias (de 2 metros cada una) y una capa de cubierta final también de 2 metros de espesor; se definieron 13 puntos de concentración; el valor inicial de la concentración en cada uno de los puntos de concentración en la etapa decreciente es igual al resultado obtenido como concentración al finalizar la etapa de crecimiento anterior.

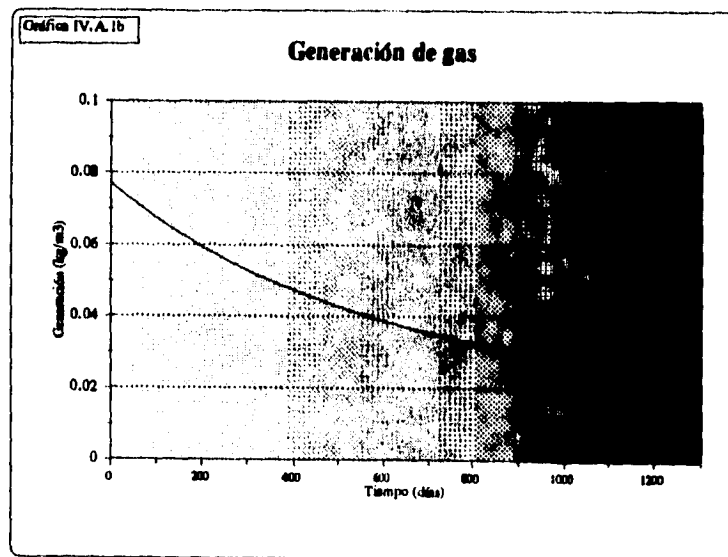
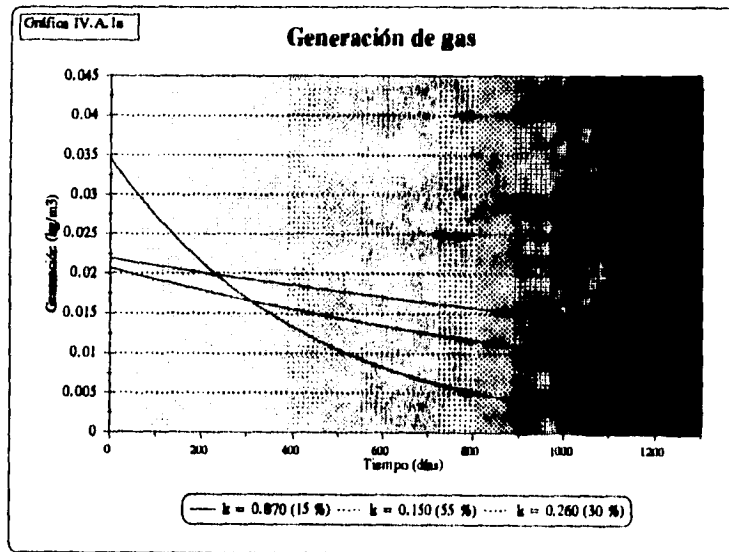
La permeabilidad en capas de material de cubierta se consideró igual a 0.1 darcy y el gradiente de temperatura por metro igual a 0.4 °C. En la figura IV.A.1 se muestra la distribución de los puntos de concentración en el relleno sanitario.

Figura IV.A.1. Representación gráfica.

Material	Distancia	13	Profundidad
Cubierta final	1 m	12	-1 m
	1 m	11	-2 m
Desechos sólidos	3 m	10	-5 m
	3 m	9	-8 m
Capa intermedia	2 m	8	-9 m
		7	-10 m
Desechos sólidos	3 m	6	-13 m
	3 m	5	-18 m
Capa intermedia	2 m	4	-19 m
		3	-20 m
Desechos sólidos	3 m	2	-23 m
	3 m	1	-26 m

Estrato impermeable

Considerando el valor estimado como generación total en una etapa de generación decreciente y las constantes de generación para cada tipo de material, se obtiene el comportamiento de la generación siguiente:

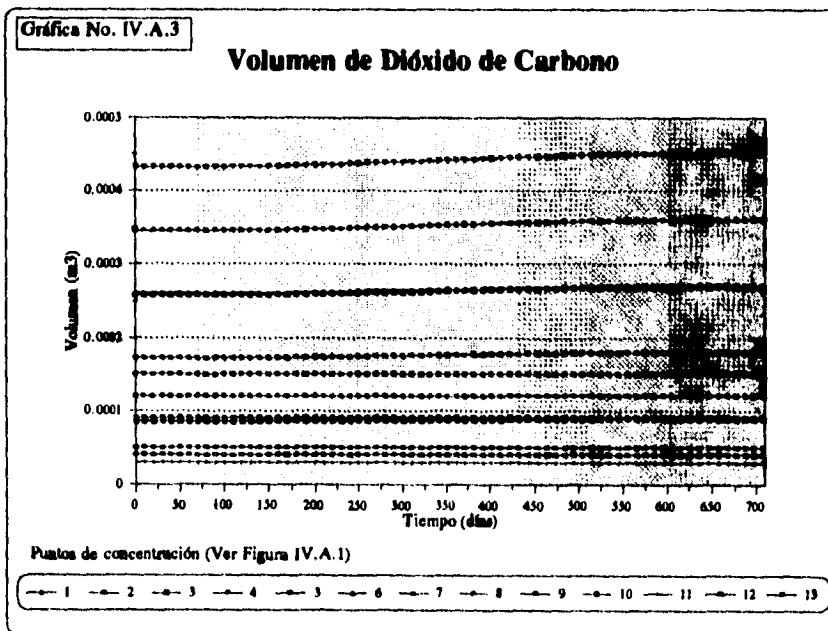
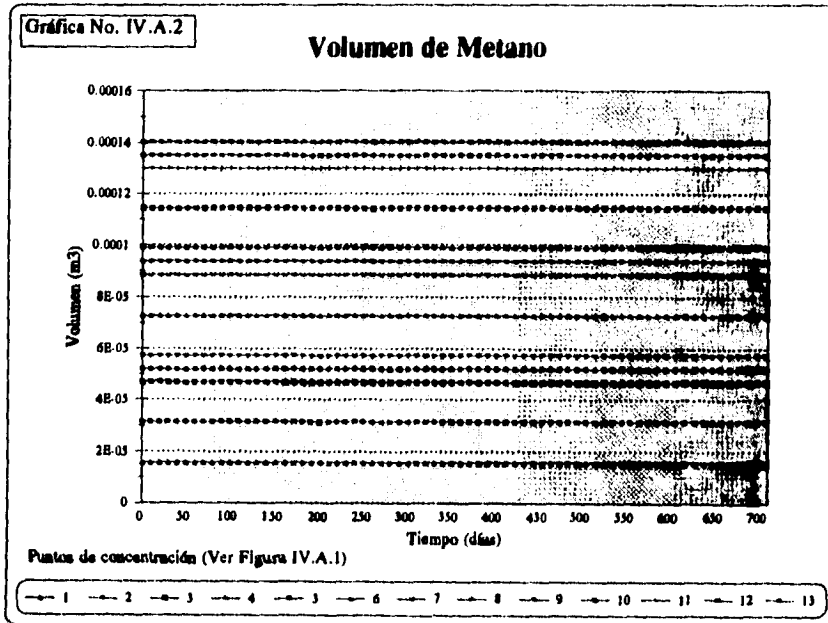


2. Resultados.

La Gráfica IV.A.2 y la Gráfica IV.A.3 muestran el volumen de gas que representaría cada punto de concentración; la Gráfica IV.A.4 y la Gráfica IV.A.5 muestran el perfil de concentración correspondiente a tres instantes diferentes; finalmente, en la Gráfica IV.A.6 se compara el volumen de metano y de dióxido de carbono, y la Gráfica IV.A.7 el porcentaje de cada uno de los gases. La Tabla IV.A.1 muestra los resultados, en el tiempo, de las concentraciones para cada punto de concentración.

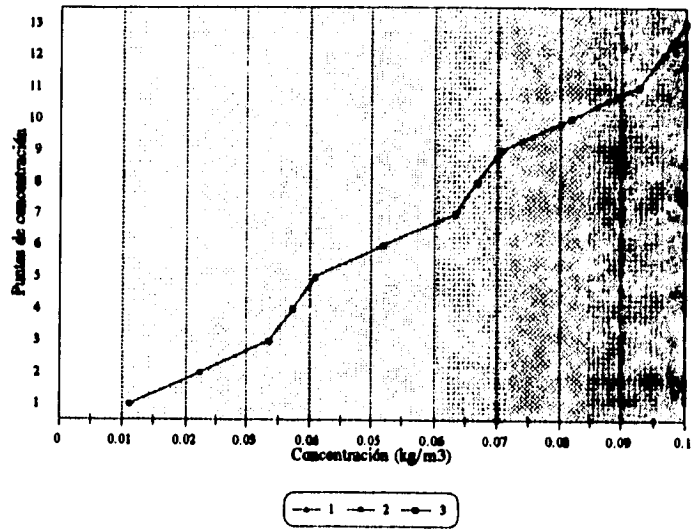
En el artículo mencionado (15) el porcentaje de los gases en la mezcla se mantiene prácticamente constante (50% de metano y 50% de dióxido de carbono); los resultados muestran que la concentración se mantuvo casi constante en la mayor parte de los puntos, conservándose la relación de metano y de dióxido de carbono desde el inicio del cálculo, y mostrando ligera tendencia de disminución de metano al finalizar el periodo calculado.

Debido a que es necesario, para correr el programa, proporcionar las concentraciones iniciales en cada uno de los puntos, en este ejemplo, las concentraciones iniciales asignadas fueron los datos resultantes de correr el programa para una etapa de generación creciente. Las concentraciones iniciales (asignadas en esta forma) tenían una relación 34% de metano y 66% de dióxido de carbono, lo que explica el que no se obtuviera una relación 50/50 como la indicada en el artículo; por otra parte, la generación mantiene una relación de aproximadamente 40% metano y 60% dióxido de carbono (conforme los datos indicados en el artículo).



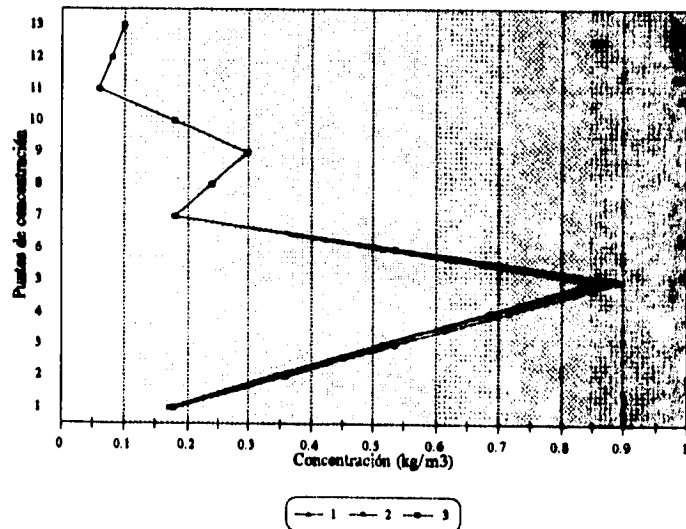
Gráfica No. IV.A.4

Concentración de Metano



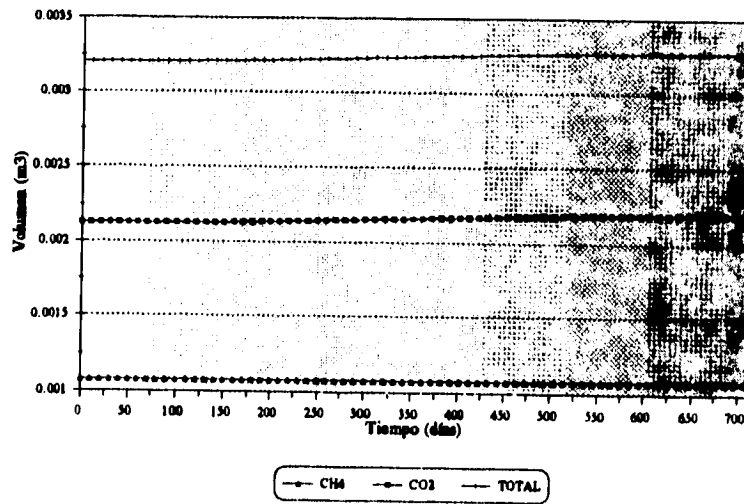
Gráfica No. IV.A.5

Concentración de Dióxido de Carbono



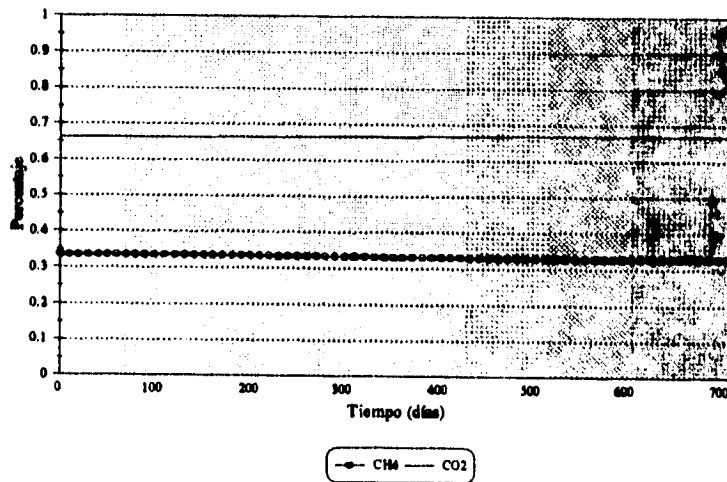
Gráfica No. IV.A.6

Volumen de Metano y Dióxido de Carbono



Gráfica No. IV.A.7

Porcentaje Metano y Dióxido de Carbono



B. Ejemplo No. 2.

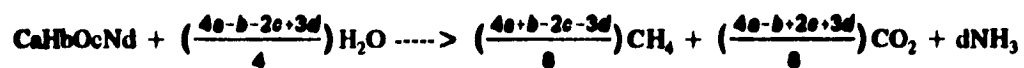
ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

1. Condiciones iniciales.

a) Composición de los desechos sólidos.

Se considera una mezcla de gases formada únicamente por metano y dióxido de carbono.

El biogas es generado por la descomposición de los desechos sólidos municipales dispuestos en un relleno sanitario. La generación total de gases (CH₄ y CO₂) se determina estequiométricamente representando el proceso de conversión de los compuestos orgánicos mediante la siguiente expresión:



Para realizar el cálculo de la generación total de biogas se considera una muestra de desechos de 100 kilogramos. Además, se considera un contenido de humedad igual al 25% y que del total de los desechos el 5% no es degradable.

La composición de los desechos sólidos en esta muestra es la siguiente:

Componentes	Porcentaje del peso	Peso de la muestra (kg)
Desechos de alimentos	25	25
Papel	40	40
Cartón	4	4
Plásticos	4	4
Textiles	2	2
Hule	1	1
Piel	0	0
Residuos de jardinería	12	12
Madera	2	2
Vidrio	2	2

Continúa

Continuación

Componentes	Porcentaje del peso	Peso de la muestra (kg)
Latas	0	0
Metales no ferrosos	0	0
Metales ferrosos	3	3
Cenizas, polvo, etc.	5	5

Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H. y Eliassen R. (13)

b) Materia orgánica.

En una muestra de 100 kg, el peso seco será igual a:

$$100 (0.25) = 25; \quad 100 - 25 = 75 \text{ kg}$$

c) Materia orgánica degradable.

$$\frac{75}{100} (75) = 71.25 \text{ kg}$$

d) Determinación de los índices de la fórmula estequiométrica.

Elemento	% Peso	Peso molecular	Moles	Coficiente estequiométrico
Carbón	50.23	12.001	4.182	41.41
Hidrógeno	6.34	1.0079	6.2903	62.28
Oxígeno	29.21	15.999	1.8253	18.07
Nitrógeno	1.54	14.006	0.101	1

La fórmula aproximada es: $C_{41.41} H_{62.28} O_{18.07} N$

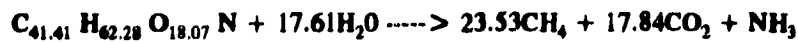
Calculando los coeficientes, para $a = 41.41$, $b = 62.28$, $c = 18.07$ y $d = 1$, se tiene:

$$\frac{4 (41.41) - 62.28 - 2 (18.07) + 3 (1)}{4} = \frac{72.42}{4} = 17.60$$

$$\frac{4(41.41) + 62.28 - 2(18.07) - 3(1)}{4} = \frac{188.58}{4} = 23.60$$

$$\frac{4(41.41) - 62.28 + 2(18.07) + 3(1)}{4} = \frac{142.70}{4} = 17.84$$

Por lo tanto:



El peso molecular de la muestra es:

$C_{41.41}$	$H_{62.28}$	$O_{18.07}$	N	$41.41(12.011) + 62.28(1.0079) + 18.07(15.999) + 14.006 = 863.10$	
	$17.61H_2O$			$17.61[1.0079(2) + 15.999] =$	317.20
	$23.57CH_4$			$23.57[12.011 + 1.0079(4)] =$	378.10
	$17.84CO_2$			$17.84[12.011 + 15.999(2)] =$	785.10
	NH_3			$14.006 + 1.0079(3) =$	17.03
				$863.1 + 317.2 = 378.1 + 785.1 + 17.03$	
				$1180.30 \approx 1180.23$	

e) Determinación del peso de metano y de dióxido de carbono.

$$CH_4 \quad \frac{378.12}{1180.28} (75) = 22.83 \text{ kg}$$

$$CO_2 \quad \frac{785.12}{1180.28} (75) = 47.40 \text{ kg}$$

f) Conversión a volumen.

La densidad del metano es 0.7176 kg/m^3 y la densidad del dióxido de carbono es 1.9783 kg/m^3 .

$$\text{CH}_4 \quad \frac{22.83}{0.7176} = 31.81 \text{ m}^3 = 31,814.38 \text{ Litros}$$

$$\text{CO}_2 \quad \frac{47.4}{1.9783} = 23.96 \text{ m}^3 = 23,959.97 \text{ Litros}$$

$$\text{Volumen de la mezcla} = 55.77 \text{ m}^3 = 55,774.35 \text{ Litros}$$

g) Porcentaje del volumen.

$$\% \text{ CH}_4 \quad \frac{31.81}{55.77} = 0.57 = 0.57$$

$$\% \text{ CO}_2 \quad \frac{23.96}{55.77} = 0.43 = 0.43$$

h) Cantidad teórica de gas generado por unidad de peso.

Peso seco de material orgánico:

$$\frac{55.77}{71.25} = 0.7827 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \frac{55,774.35}{71.25} = 782.80 \text{ litros/kg}$$

Peso húmedo (desechos sólidos):

$$\frac{55.77}{100} = 0.5577 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \frac{55,774.35}{100} = 55.77 \text{ litros/kg}$$

i) Cantidad teórica de cada componente.

Peso seco:

$$\text{CH}_4 \quad \frac{22.83}{71.25} = 0.3204 \text{ kg/kg}$$

$$\text{CO}_2 \quad \frac{47.4}{71.25} = 0.6653 \text{ kg/kg}$$

Peso húmedo:

			800 kg/m³
CH₄	$\frac{22.83}{100}$	=	0.2283 kg/kg 182.64 kg/m³
CO₂	$\frac{47.4}{100}$	=	0.4740 kg/kg 379.20 kg/m³

j) Constantes de generación.

La generación de metano se determina a partir de los períodos que para cada tipo de desecho se indican a continuación:

Características de los desechos	Tiempo (t _{1/2})	Tiempo (t _{9/10})	K ₁ (año ⁻¹)	K ₂ (año ⁻¹)
Muy degradable	1	3.5	3.91	1.56
Degradable	2	6	1.96	0.978
Poco degradable	20	60	0.196	0.098

Fuente: Emcon Associates (6)

k) Porcentaje de acuerdo con la degradabilidad de los desechos.

Características de los desechos	Porcentaje de desechos
Muy degradable	50.23
Degradable	38.85
Poco degradable	10.92

Fuente: Dirección Técnica de Desechos Sólidos. DDF.

l) Generación en la etapa creciente.

$$\frac{dG}{dt} = K_1 G \quad \begin{array}{l} G = G_0 \text{ cuando } t = 0 \\ G = G \text{ cuando } t = t \end{array} \quad \text{o} \quad \begin{array}{l} G = G \text{ cuando } t = t \\ G = L/2 \text{ cuando } t = t/2 \end{array}$$

$$G = G_0 e^{K_1 t} \quad \text{o} \quad \ln G = \ln G_0 + K_1 t \quad \rightarrow \quad K_1 = \frac{(\ln G / \ln G_0)}{t}$$

Si $G = L = L_0/2$ para $t/2$ y $G_0 = L_0/100$, se tiene:

$$K_1 = \frac{(\ln L_0/2) / (L_0/100)}{t/2} = \frac{\ln 50}{t/2}$$

$$\alpha_i = \sum_m A_m K_{1m} L e^{2K_{1m} t}$$

m) Generación en la etapa decreciente.

$$\frac{dL}{dt} = -K_2 L \quad \begin{array}{l} L = G_0 - G \text{ cuando } t = t \\ L = L_0/2 \text{ cuando } t = t/2 \end{array}$$

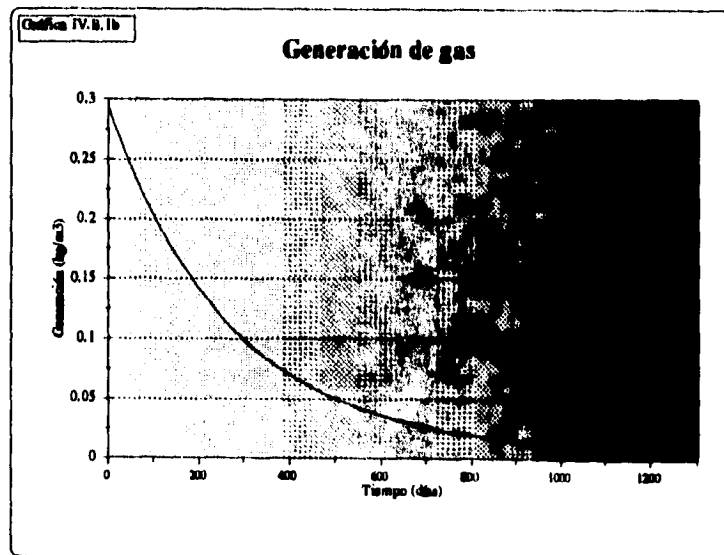
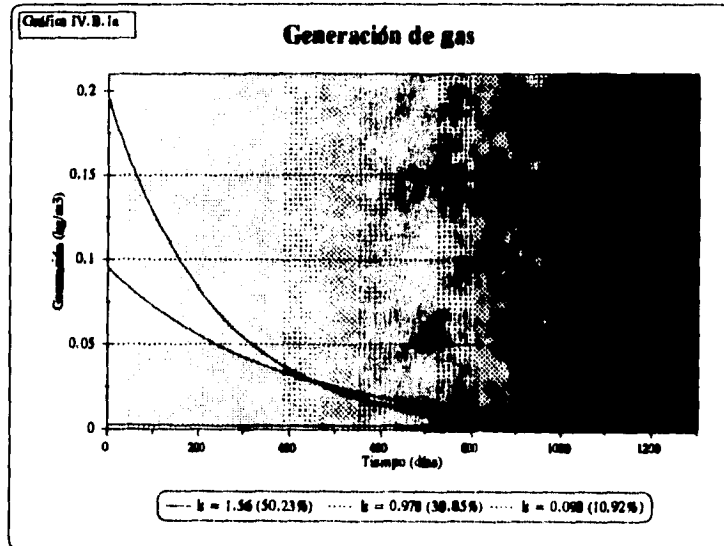
$$L = L_0 e^{-K_2 t} \quad \text{o} \quad \ln L = \ln L_0 - K_2 t \quad \rightarrow \quad K_2 = \frac{(\ln L / \ln L_0)}{t}$$

Si $L = L_0/100$ para $t = t_{99/100}$ y $L = L_0/2$ para $t = t/2$, se tiene:

$$K_2 = \frac{(\ln L_0/2 / L_0/100)}{t_{99/100} - t/2} = \frac{\ln 50}{t_{99/100} - t/2}$$

$$\alpha_i = \sum_m A_m K_{2m} L e^{-K_{2m} t}$$

Considerando el valor estimado como generación total en una etapa de generación decreciente y las constantes de generación para cada tipo de material, se obtiene el comportamiento de la generación siguiente:



n) Resumen.

Cuadro IV.B.1. Datos del relleno	
Profundidad del relleno	22.00 m
Capas intermedias	2.00 m
Cubierta final	2.00 m
Estratos de desechos sólidos	9.00 m
Porosidad de los desechos	0.5
Porosidad de material de cubierta	0.5
Permeabilidad de los desechos	1 darcy
Permeabilidad de material de cubierta	10 ⁻¹ darcy
Densidad de los desechos	800 kg/m ³
Composición de los desechos	
Muy degradable	53.20 %
Degradable	38.85 %
Poco degradable	10.92 %
Constantes de generación	
Muy degradable	1.560
Degradable	0.978
Poco degradable	0.098
Contenido de humedad	25 %
Temperatura ambiente	18 °C
Temperatura en el fondo del relleno	29.2 °C
Gradiente de temperatura	0.5 °C por metro
Generación total de metano	182.64 kg/m ³
Generación total de dióxido de carbono	379.20 kg/m ³

Nota: Se consideran dos etapas durante la generación de biogas: una primera etapa de crecimiento, la cual tiene una duración hasta el momento en que se ha generado la mitad del valor estimado de generación total; una segunda etapa decreciente durante la cual se agota el biogas por generar remanente.

Las constantes de generación se calcularon con base en los períodos supuestos tanto para la etapa en la cual se considera ocurre la mayor generación de biogas como para la etapa final durante la cual se considera se cumple con haberse generado hasta el 99% del valor estimado como generación total.

ñ) Representación gráfica.

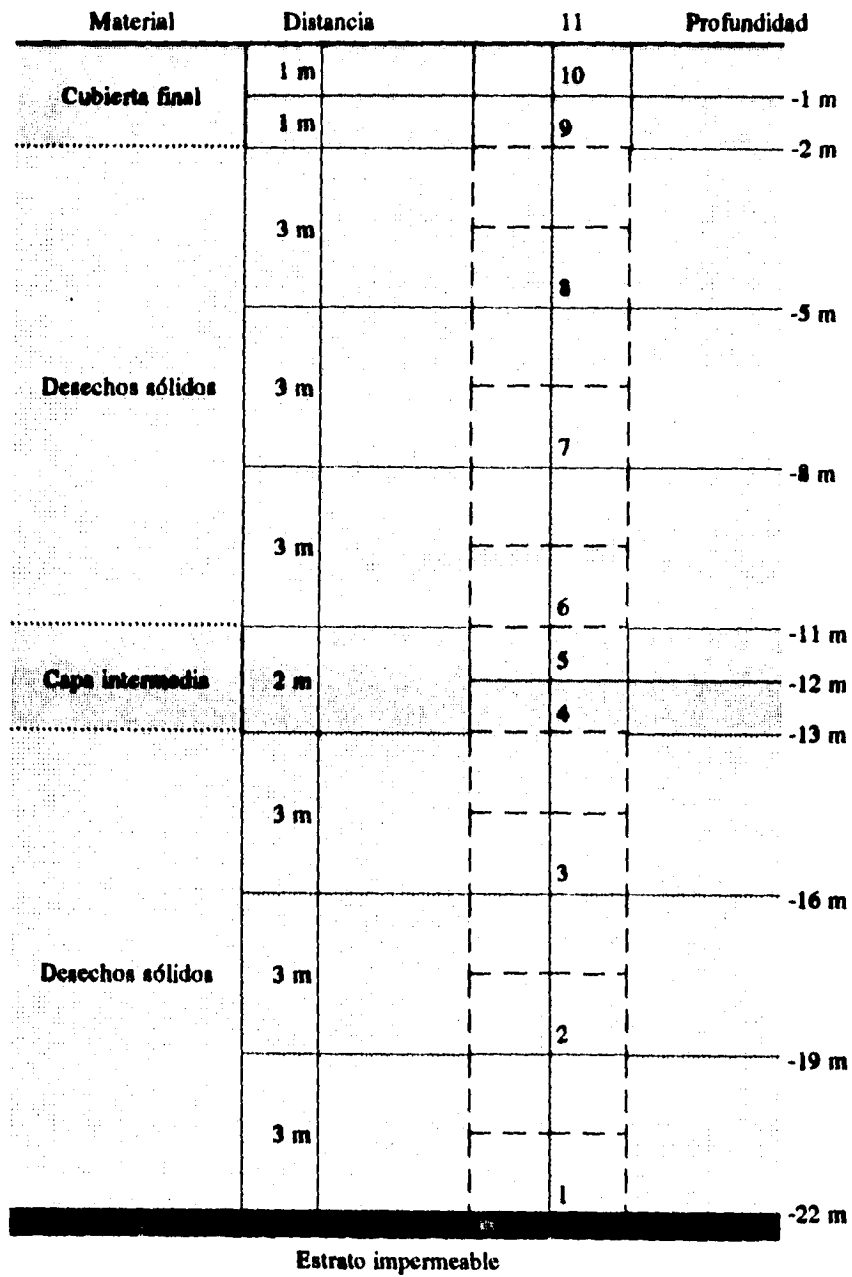


Figura IV.B.1.

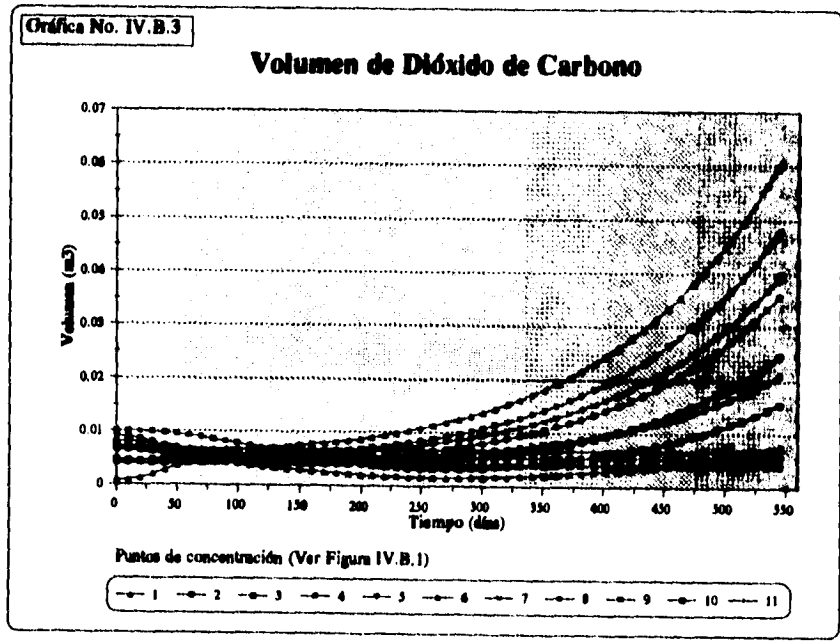
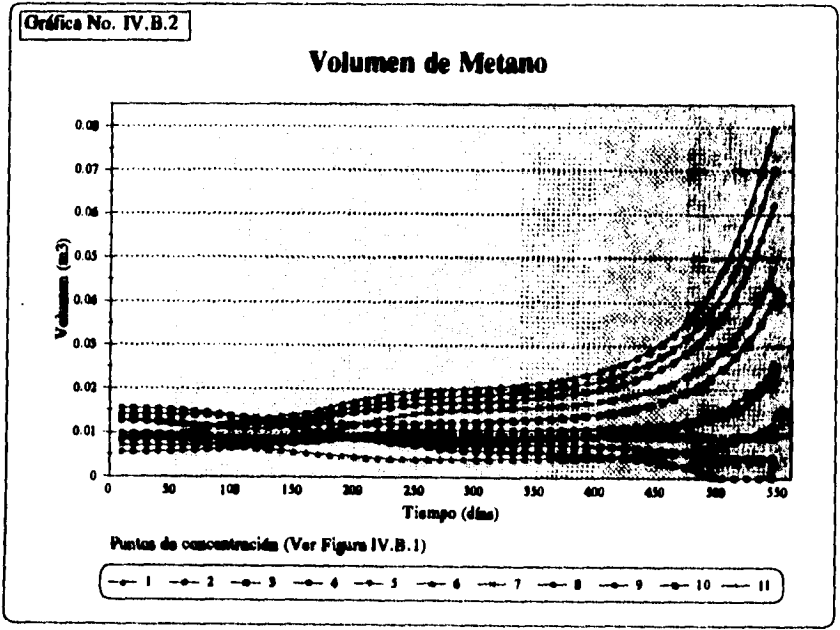
2. Resultados.

La Gráfica IV.B.2 y la Gráfica IV.B.3 muestran el volumen de gas que representaría cada punto de concentración; la Gráfica IV.B.4 y la Gráfica IV.B.5 muestran el perfil de concentración correspondiente a tres instantes diferentes; finalmente, en la Gráfica IV.B.6 se compara el volumen de metano y de dióxido de carbono, y la Gráfica IV.B.7 el porcentaje de cada uno de los gases. La Tabla IV.B.1 muestra los resultados, en el tiempo, de las concentraciones para cada punto de concentración.

Las concentraciones iniciales asignadas a cada punto son valores cercanos al primer valor que se obtiene como generación al momento de iniciar el cálculo. En este segundo ejemplo, se obtuvieron resultados para un tiempo equivalente a 550 días. El comportamiento de las concentraciones obtenidas en cada uno de los puntos tiene variaciones significativas pero corresponde a las condiciones establecidas para cada uno de ellos; puntos situados en un estrato de baja permeabilidad muestran baja concentración, así como puntos situados en zonas de desechos tienen una mayor concentración.

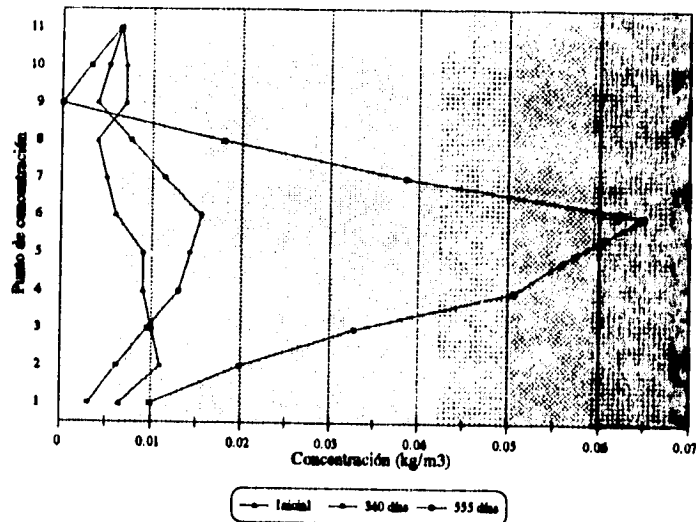
Al inicio del cálculo, en la mayoría de los puntos, se observa una corrección a valores que posteriormente mantienen un comportamiento de acuerdo a lo establecido como condiciones del relleno; esto se entiende puesto que los valores dados como concentración inicial en cada punto fueron aleatorios sin mantener una relación entre ellos o con las condiciones del relleno.

Los porcentajes de los gases en la mezcla varían en el tiempo manteniéndose entre 50% a 60% de metano y de 40% a 50% de dióxido de carbono.



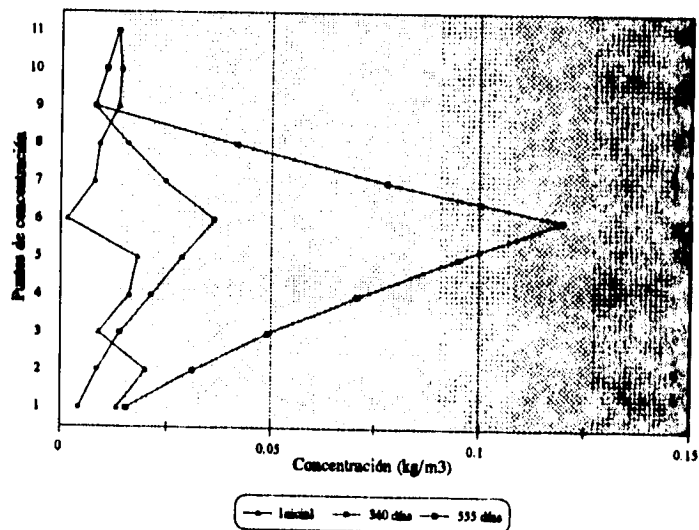
Gráfica No. IV.B.4

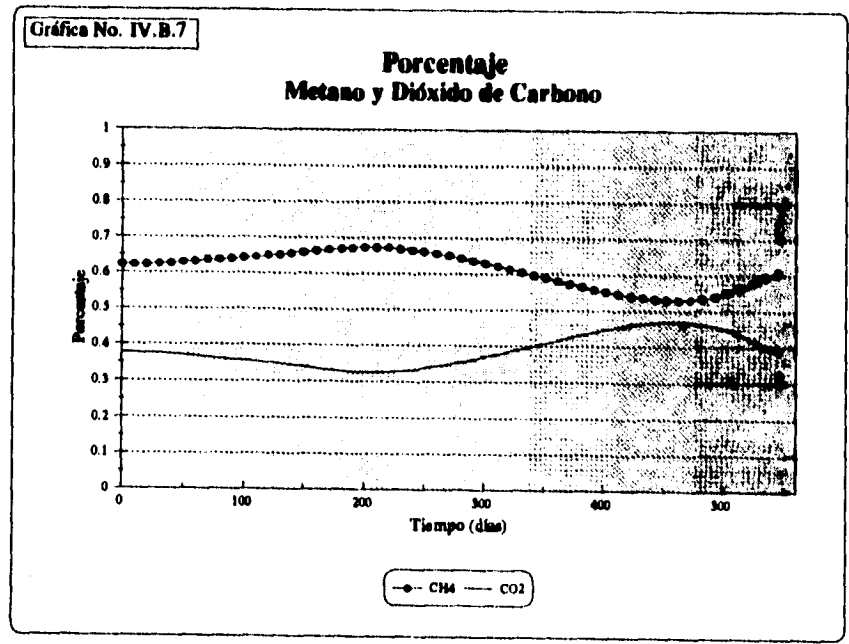
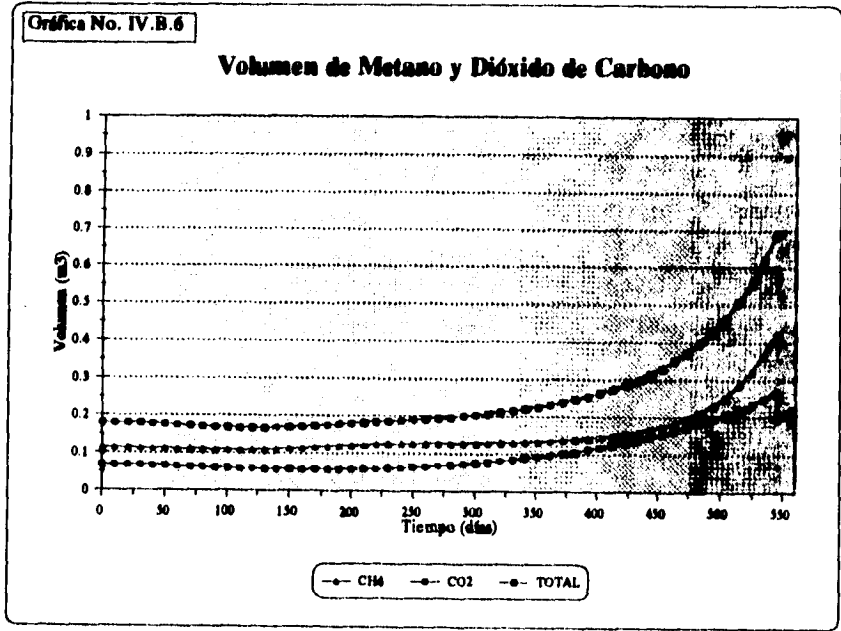
Concentración de Metano



Gráfica No. IV.B.5

Concentración de Dióxido de Carbono





IV. Conclusiones.

En la elaboración de esta tesis busqué abarcar los aspectos más importante relacionados con el biogas tratando de mostrar un panorama general sobre el tema. La presentación, primero, de las características de desechos sólidos y rellenos sanitarios seguido de las características del biogas para finalizar con ejemplos de aplicación se debe a que traté de acotar lo mejor posible el tema partiendo de lo general hasta llegar a un caso particular de aplicación. A continuación presento las conclusiones obtenidas durante el desarrollo del trabajo:

Del modelo matemático.

1. **Contar con un modelo matemático que represente condiciones particulares de un relleno sanitario es de gran ayuda para el estudio y para normar el criterio que se aplique en el tratamiento de los desechos sólidos municipales. Asimismo, es una herramienta útil para la planeación de rellenos sanitarios en sus diversas etapas de diseño, construcción, operación y cierre.**

El programa para la modelación del flujo de biogas, como el que se presenta en este trabajo, es un elemento de fácil inserción en la vida práctica; por otra parte, considero que el tema constituye un enlace entre la investigación, la academia y la solución práctica de un problema de gran magnitud, común en cualquier población.

2. **El tiempo es un factor muy importante en el manejo de los desechos sólidos, y en especial, en la operación de los rellenos sanitarios. El contar con una herramienta para el estudio, que sea sencilla de aplicar y de la cual se puedan obtener resultados con gran rapidez facilita la toma de decisiones en la solución de casos reales.**

A pesar de que el método empleado da como resultado un proceso relativamente lento de cálculo, el programa de computadora que presento (elaborado en lenguaje qbasic) tiene la facilidad de instalarse y utilizarse en computadoras personales, lo cual facilita su uso en lugares cuya infraestructura se encuentre reducida al mínimo.

3. El comportamiento del modelo es adecuado. De acuerdo con las pruebas efectuadas, en casos con condiciones diferentes, el comportamiento de los resultados se mantiene en rangos aceptables; debo mencionar que resulta ser bastante sensible a variaciones en valores de generación total, de temperatura y de permeabilidad.
4. Es necesario tener presente que en un relleno se pueden tener condiciones similares a las de otro pero éstas nunca son iguales, por lo que deben considerarse las características particulares en cada caso. Para la aplicación práctica del programa en un caso particular considero necesario, con objeto de mejorar los resultados, pensar en la modificación y adecuación de subrutinas de cálculo o valores iniciales de acuerdo con las condiciones que definan el sitio de estudio.
5. En este trabajo se describe la metodología empleada para el estudio del biogas en rellenos sanitarios; considero que a partir de ésta, puede continuarse el estudio para mejorar y abarcar con mayor detalle el tema de flujo de gases en lugares de disposición de desechos sólidos.

De la legislación.

Encuentro dos problemas básicos en nuestra legislación: el primero de ellos, el enfoque que se tiene en la elaboración de la normatividad, y el segundo, el concepto bajo el que se tratan los desechos sólidos.

Dadas las características del problema de disposición y tratamiento de desechos y las condiciones económicas del país, considero que hace falta una pieza clave para estar en posibilidad de atacar el problema, misma que puede obtenerse a través de la normatividad. Esto es, por medio de la legislación, debería pedirse la realización de estudios en lugares de disposición final dando mayor relevancia a la recopilación de información y de datos que definan las condiciones del ambiente en cada sitio antes que imponer metodologías y aplicar tecnologías avanzadas; ésto, por supuesto implica tener que cubrir largos períodos de observación y

recopilación pero que a la larga nos proporcionarán los elementos para decidir los caminos a seguir en el tratamiento de este problema.

Nuestra legislación, clasifica tásitamente a los desechos sólidos como peligrosos y no peligrosos; la mayoría de las normas están dirigidas hacia el tratamiento de los desechos peligrosos dejando por omisión la definición, la determinación y el tratamiento los desechos sólidos no peligrosos (entre los que se encuentran los desechos sólidos municipales). Esto crea lagunas enormes que afectan directamente al tratamiento de los desechos sólidos municipales puesto que no se cuenta con la normatividad específica que contemple plenamente el problema de disposición, tratamiento y mucho menos el aprovechamiento.

Generales.

En la actualidad el tratamiento de los desechos sólidos ha evolucionado y se han diversificado las opciones de tratamiento; es un hecho que en México, y en general en los países en vías de desarrollo, por su problemática económica, el relleno sanitario como método de disposición seguirá siendo por muchos años el más empleado. Esta simple condición a futuro, da la pauta para que se lleven acabo, en los sitios de disposición final, más estudios relacionados con el control y prevención de la contaminación por desechos sólidos, además de buscar el aprovechamiento de productos y subproductos generados a partir de desechos sólidos.

Creo que el estancamiento que se registra en el tratamiento de algunos problemas se debe principalmente a la falta de aplicación e implementación de metodologías de trabajo adecuadas a nuestro entorno.

La aplicación de modelos matemáticos en cualquier problema relacionado con la obtención de energía a partir de nuevas fuentes, en este caso los rellenos sanitarios, siempre implica un proceso de observación e investigación, y en consecuencia, un paso en el progreso.

En los próximos años, el desarrollo mundial estará enmarcado por las nuevas formas de energía, la elaboración de nuevos materiales, la informática, la tecnología espacial y la biotecnología; países como el nuestro, siempre en búsqueda de nuevos y mejores estadios de desarrollo, tienen la oportunidad de penetrar en el mercado mundial, al desarrollar cualquiera de estas tecnologías.

Referencias.

1. Arnaud Alain, Bernard Max, Berset Claudette, Bocquet Jöelle, Bouix Marielle, Rosnay Joël de, et al.; *Biotecnología*, Technique et Documentation, 1984.
2. Barbor José A., Ibarz Aznárez José; *Química General Moderna*, EDESA, 1977.
3. Constant M., Naveau H., Ferrero G. L., Nyma E.; *Biogas end-use in the European Community*, Commission of the European Communities.
4. Christensen Thomas H., Cossu Raffaello, Stegmann Rainer; *Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact*, Academic Press, 1989.
5. Doffis Caso Armando; *La Basura es la Solución*, Editorial Concepto, S.A., 1991.
6. Emcon Associates; *Methane Generation and Recovery from Landfills*, 1980.
7. Granet Irving; *Termodinámica*, Prentice Hall, 1988.
8. Huebner Kenneth H.; *The Finite Element Method for Engineers*, John Wiley & Sons, 1975.
9. Metz Clyde R.; *Fisicoquímica*, McGraw Hill, 1976.
10. Monroy H. Oscar, Viniegra G. Gustavo; *Biotecnología para el Aprovechamiento de los Desperdicios Orgánicos*, AGT Editor, S.A., 1981.
11. Morrison Robert, Thornton Boyd, Robert Neilson; *Química Orgánica*, Addison-Wesley, 1989.

12. Pavoni Joseph L., Heer John E. jr., Hagerty D. Joseph; *Handbook of Solid Waste Disposal. Material and Energy Recovery*, Van Nostrand Reinhold Company, 1975.
13. Tchobanoglous G., Theisen H. y Eliassen R.; *Solid Wastes*, McGraw Hill, 1977.
14. Treybal Robert E.; *Operaciones de Transferencia de Masa*, McGraw Hill, 1990.
15. Viessman Warren jr., Hammer Mark J.; *Water Supply and Pollution Control*, Harper and Row, 1985.
16. White Frank M.; *Viscous Fluid Flow*, McGraw Hill, 1991.
17. Findikakis Angelous N., Leckie James O.; Numerical Simulation of Gas Flow in Sanitary Landfills, M. ASCE, *Journal of the Environmental Engineering Division*, Octubre, 1979. p.p. 927-945.
18. López Felipe. *Obtención Experimental de Parámetros de Diseño y Operación de un Relleno Sanitario mediante un Celda de Control*, 1994, México.
19. Metcalfe Douglas E., Fawcett Grahame J.; *Modelling Gas Migration through Unsaturated Soils from Waste Disposal Sites*, Department of Civil Engineering University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.
20. Moore, Charles A., Rai Iqbal S., Lynch, John; Computer Design of Landfill Methane Migration Control, *Journal of the Environmental Engineering Division*, Febrero, 1982. p.p. 89-106.
21. Secretaría de Desarrollo Social. Instituto Nacional de Ecología; *Proyecto Tipo de Relleno Sanitario*, TRIDIM, S.A. DE C.V., 1992.
22. Schultz J. F.; *Landfill Gas Generation, Control and Utilization*.
23. *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente*.
24. *Normas Oficiales Mexicanas*.