

39  
2º



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

GENERACION, CONTROL Y APROVECHAMIENTO  
DEL BIOGAS EN SITIOS DE DISPOSICION FINAL  
DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERA CIVIL

P R E S E N T A:

**GUERRERO LANDEROS, MARIA REYES**



ASESOR: M.C. CONSTANTINO GUTIERREZ PALACIOS

MEXICO, D. F.

1996

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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  
60-1-025/95

Señorita  
**MARIA REYES GUERRERO LANDEROS**  
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.C. CONSTANTINO GUTIERREZ PALACIOS, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"GENERACION, CONTROL Y APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS EN SITIOS DE  
DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES"**

**INTRODUCCION**

- I. MANEJO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS**
  - II. GENERACION, CARACTERIZACION Y COMPORTAMIENTO DEL BIOGAS**
  - III. METODOS DE EVALUACION DE LA PRODUCCION POTENCIAL DEL BIOGAS**
  - IV. SISTEMAS PARA EL CONTROL DEL BIOGAS**
  - V. ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS**
  - VI. EJEMPLOS DE APLICACION**
  - VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA**

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 03 de marzo de 1995.  
EL DIRECTOR

ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/RCR\*nl

Con cariño para mis padres

**Carlos y Elsa**

por su desinteresada ayuda en todos los momentos de mi existencia.

Para

**Carlos Leonel**

por ser parte importante en mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS.**

Con profundo agradecimiento para mi profesor y director de tesis el M. en C. Constantino Gutiérrez Palacios por brindarme durante el desarrollo de este trabajo, su gran apoyo.

Así mismo a los Ingenieros Felipe López Sánchez, Jorge Sánchez Gómez, Heriberto Bárcenas Ramírez y Rafael Morales y Monroy, quienes a través de sus cursos, seminarios y ponencias pude obtener valiosa información sin la cual no hubiera sido posible la realización del tema.

A la Secretaría de Ecología del Estado de México, a la Dirección Técnica de Desechos Sólidos del D.D.F., a la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos y al Instituto Nacional de Ecología; instituciones que de manera incondicional me permitieron el acceso a su gran acervo bibliográfico.

## INDICE

INTRODUCCION.....	1
<b>CAPITULO I.- MANEJO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES .....</b>	<b>11</b>
I.1.- CICLO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS .....	12
I.2.- COMPOSICION DE LOS RESIDUOS SOLIDOS .....	21
<b>CAPITULO II.-GENERACION, CARACTERIZACION Y COMPORTAMIENTO DEL BIOGAS.....</b>	<b>28</b>
II.1.- IMPORTANCIA DEL BIOGAS .....	28
II.2.- GENERACION DEL BIOGAS EN SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS .....	30
II.3.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCION DEL BIOGAS .....	37
II.4.- CARACTERIZACION DEL BIOGAS .....	47
II.5.- COMPORTAMIENTO DEL BIOGAS EN LOS SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS .....	50
<b>CAPITULO III.- METODOS DE EVALUACION DE LA PRODUCCION POTENCIAL DE BIOGAS EN SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE DESECHOS SOLIDOS MUNICIPALES.....</b>	<b>68</b>
III.1.- CALCULO DEL METANO .....	69
<b>CAPITULO IV.- SISTEMAS PARA EL CONTROL DE BIOGAS.....</b>	<b>97</b>
IV.1.- CONTROL DEL BIOGAS EN RELLENOS SANITARIOS .....	113

IV.2.- CONTROL DEL BIOGAS EN TIRADEROS A CIELO ABIERTO .....	155
IV.3.- UBICACION DE LOS POZOS DE BIOGAS EN SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE DESECHOS SOLIDOS MUNICIPALES .....	157
IV.4.- SISTEMAS PARA EL MONITOREO DEL BIOGAS .....	163
IV.5.- RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCION DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DEL BIOGAS .....	172

**CAPITULO V.-ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO  
DEL BIOGAS..... 176**

V.1.- TRATAMIENTO DEL BIOGAS .....	177
V.2.- APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS .....	182

**CAPITULO VI.-EJEMPLO DE APLICACION ..... 200**

VI.1.- DATOS GENERALES DEL PROYECTO .....	201
VI.2.- IMPORTANCIA DEL CONTROL DEL BIOGAS .....	205
VI.3.- ESTIMACION DE LA PRODUCCION DEL BIOGAS .....	206
VI.4.- SISTEMA PROPUESTO PARA EL CONTROL Y TRATAMIENTO DEL BIOGAS .....	214
VI.5.- SISTEMAS PARA EL MONITOREO DEL BIOGAS .....	222
VI.6.- APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA .....	225
VI.7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL EJEMPLO .....	230

**CAPITULO VII.-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 232**

VII.1.- CONCLUSIONES .....	232
VII.2.- RECOMENDACIONES .....	234

<b>ANEXO I.-ALBUM DE FOTOGRAFIAS .....</b>	<b>236</b>
<b>ANEXO II.- GLOSARIO DE TERMINOS .....</b>	<b>244</b>
<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>248</b>



## INTRODUCCION

La naturaleza está formada por seres vivos y no vivos unidos y relacionados para formar un todo en constante armonía y equilibrio. Los seres vivos se han clasificado en plantas, animales y el hombre, constituidos por órganos complejos que les permiten realizar las funciones propias de su ciclo biológico. Los seres no vivos también llamados factores físicos son el agua, el aire, la luz, el suelo, etc., de los cuales depende la existencia de los primeros.

Ambos seres durante su estancia en la tierra sufren constantes transformaciones físicas, químicas y biológicas, presentándose con mayor rapidez en los organismos vivos, debido a que están compuestos por materia orgánica susceptible a ser biodegradada durante un tiempo relativamente corto, sufriendo desgaste y perdiendo energía desde que nacen hasta que mueren.

En esta última etapa se inicia su desintegración para ser transformados en materia simple de fácil absorción por el suelo, el agua y aire, incorporándose así al medio físico.

Este proceso de descomposición o desintegración de la materia orgánica es llevada a cabo por microorganismos como bacterias, hongos, gérmenes, etc., que digieren sus componentes, y como resultado de esta función, originan desprendimientos de líquidos y gases que pueden ser agresivos para la naturaleza cuando no son controlados.

Dichos gases y líquidos se producen en mayor volumen en los sitios donde hay más concentración de materia orgánica en estado de descomposición, como es el caso de las aguas residuales y los desechos sólidos; ambos de procedencia municipal (domiciliarios, parques, jardines, mercados, de vía pública, etc.).

De estos dos productos (gases y líquidos) es únicamente de interés para este trabajo el estudio del gas que se genera en los sitios de disposición de residuos sólidos (rellenos sanitarios y tiraderos no controlados), donde se confinan grandes volúmenes de materia orgánica.

A dicho gas se le denomina biogas en referencia a su origen, el cual de acuerdo a estudios se ha observado que está compuesto por metano, bióxido de carbono, amoníaco y ácido sulfhídrico, principalmente; producidos durante la descomposición bacteriana en ausencia

de aire de la materia orgánica contenida en los residuos sólidos. Esta composición le atribuye propiedades importantes que lo definen, por un lado, como un energético potencialmente aprovechable, con un mediano poder calorífico, inflamable y explosivo en ciertas concentraciones; por otro lado, como un contaminante con grandes posibilidades de degradar el medio ambiente, si no es controlado; pues además de tener olor desagradable es asfixiante y coadyuva al deterioro de la capa de ozono y por ende a la presentación de lluvia ácida y al efecto de invernadero. Por dichas atribuciones se ha considerado relevante el estudio del biogas.

Cabe mencionar que la utilización del biogas y específicamente el producido en digestores anaerobios, ha sido una alternativa muy importante para su utilización como energético. En algunos países de Asia y Africa, esta tecnología es explotada con éxito; entre dichos países se encuentran: China, Corea, Taiwan, Thailandia, India, Nepal, Pakistan, Bangladesh, Egipto, Sudán, Algeria, Cameroon, Mali, Senegal, Liberia, Tunisia, Kenya, Tanzania y Etiopía.

En Latinoamérica, países como: Brasil, Venezuela, Ecuador, Colombia, Perú y Chile, se han interesado en la utilización del biogas producido tanto en digestores anaerobios, como en los sitios de disposición final de desechos sólidos.

En México dicha posibilidad también ha representado una alternativa en su uso como energético, por lo que centros de investigación como el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) de Cuernavaca y organismos como la Fundación de Ecodesarrollo Xochicalli (FEXAC), han implementado aproximadamente 150 plantas (digestores) para la producción de biogas, llevándose a cabo diversos estudios con el fin de aprovecharlo.

Respecto al biogas generado en los sitios de disposición final de residuos sólidos de México, cabe mencionar que es hasta 1985 cuando en la Ciudad de México, a través del Departamento del Distrito Federal, surge el interés de su estudio llevándose a cabo experimentos en los sitios ubicados en Santa Cruz Meyehualco, San Lorenzo Tezonco y Santa Fe; para conocer el comportamiento dinámico en lo que corresponde a la determinación del gasto máximo posible a ser extraído.

Tomando mayor interés en el aprovechamiento del biogas producido en los sitios de disposición final de desechos sólidos, en 1990 la Dirección Técnica de Desechos Sólidos del D.D.F., en coordinación con la Comisión Federal de Electricidad, implementó en el

tiradero clausurado denominado Parque Cuicláhuac en Santa Cruz Meyehualco D.F., un equipo de prueba para utilizarlo en la generación de energía eléctrica, lo cual no obtuvo resultados favorables ya que el volumen de biogas era muy bajo.

En 1994 la dirección antes mencionada elige el sitio clausurado denominado Alameda Poniente en Santa Fe, D.F., para aprovechar el biogas en la generación de energía eléctrica.

No obstante estos estudios y los realizados en los últimos años, aún no se cuenta con suficiente información sobre la generación, propiedades, composición, control y aprovechamiento del biogas.

Por ello se ha considerado necesario el desarrollo de este estudio con el fin de ganar mayor experiencia en dichos aspectos. Además con el propósito de despertar el interés del ingeniero en sus diversas especialidades (ambiental, civil, industrial y mecánico) en la investigación de éste, estructurando los aspectos técnicos y administrativos, y con ello encontrar una solución integral a mediano plazo para el manejo del biogas.

Para tratar en forma general el tema referido, este trabajo se divide en siete capítulos, los cuales se describen y resumen a continuación:

En el primer capítulo "**Manejo de los Residuos Sólidos Municipales**", se presenta una descripción general de cada una de las etapas que siguen dichos residuos, desde que son generados, hasta que son confinados en algún sitio de disposición final, información que sirve como antecedente del tema en estudio.

Se menciona que en México la generación de residuos domiciliarios por persona es de 0.6 a 1.0 Kg. en un día; dato aproximado dependiente de factores como el nivel socioeconómico, hábitos de consumo y uso de suelo, principalmente. Estos factores determinan también la composición de los residuos sólidos y la cantidad de material degradable con posibilidad de generar biogas.

Después de esta etapa los residuos pasan al almacenamiento, la cual es responsabilidad de quien la lleve a cabo.

En seguida los residuos municipales son recolectados, actividad que en México se efectúa a través de los métodos de esquina, de acera, por contenedores e intradomiciliaria;

dependiendo del tipo de demanda requerida y del grado de tecnificación de los equipos utilizados; los cuales van desde vehículos rudimentarios hasta vehículos especiales.

Posteriormente los desechos son transportados hacia la estación de transferencia cuando existe, en donde son transferidos a vehículos de mayor capacidad diseñados para hacer recorridos muy grandes. Lo anterior con el fin de transportar los residuos al sitio de disposición final para su confinamiento.

Esta actividad se efectúa utilizando algún método de operación (zanja, área o ambos), con la ayuda de maquinaria pesada (bulldozers, retroexcavadoras, traxcavos, compactadores, motoconformadoras y vehículos como pipas, volteos, etc.).

En lo que se refiere a la etapa de tratamiento, éste se limita generalmente a la separación de materiales reciclables como algún tipo de vidrio, cartón, papel, aluminio y otros subproductos que el recolector considere de valor; disminuyendo en una mínima parte el volumen de desechos que se van a confinar.

Y por último la etapa de disposición final, la cual es de gran trascendencia para este trabajo, pues es el lugar en donde se presenta una concentración de los contaminantes generados durante todo el ciclo de los residuos sólidos por su alto contenido de materia orgánica, humedad y toda clase de microorganismos.

Además es aquí donde se genera un mayor volumen de biogas, que como ya se mencionó, es un recurso energético con posibilidades de ser aprovechado o un contaminante de alto riesgo cuando no es controlado.

Profundizando sobre el estudio de este recurso, en el capítulo número dos "**Generación, Caracterización y Comportamiento del Biogas**", se presenta como información inicial la teoría desarrollada respecto a su producción, la cual define al biogas como el producto de la descomposición biológica, física y química de la materia orgánica de los residuos confinados en un sitio de disposición final, evolucionando esta descomposición a través de la etapa aerobia y posteriormente en la anaerobia, en donde finalmente se presenta la producción de los principales componentes del biogas como el metano y el bióxido de carbono.

Es decir, cuando los desechos sólidos son despositados, compactados y cubiertos formando estratos, la materia orgánica continúa con su descomposición en un medio aerobio, hasta que los microorganismos causantes de esta descomposición consumen el aire (aproximadamente el 80% de nitrógeno y 20% de oxígeno) encontrado en dichos estratos, simplificando a la materia orgánica y produciendo bióxido de carbono y agua con liberación de energía.

Una vez que es consumido el aire, se inicia la etapa anaerobia, la cual es dividida en tres fases, la primera anaerobia no metanogénica; en ella se presenta una fermentación ácida de la materia orgánica convirtiéndose los azúcares, los aminoácidos, los pépticos, etc., en otros compuestos como los ácidos acético y propiónico con producción de bióxido de carbono, trazas de nitrógeno e hidrógeno.

En seguida la fase metanogénica inestable donde dichos ácidos son transformados a metano y bióxido de carbono por microorganismos anaerobios llamados metanogénicos, desprendiendo además trazas de ácido sulfhídrico y nitrógeno (en esta fase la producción de metano es ascendente pero aún no estable); llegando a estabilizarse después de un tiempo variable (30 meses aproximadamente) en donde el porcentaje del bióxido de carbono y metano pueden alcanzar aproximadamente el 50% cada uno; esta producción se mantiene por un tiempo aún no definido aunque se cree que es de 5 a 10 años aproximadamente.

En lo que se refiere a los componentes del biogas, de acuerdo a análisis de cromatografía, se ha encontrado que los predominantes son el metano y el bióxido de carbono, detectándose trazas de ácido sulfhídrico, nitrógeno, hidrógeno, mercaptanos, aminas y otros gases producto de la digestión anaerobia como el etano, propano, etc.

La generación y composición del biogas dependen de factores como:

- El tipo de desechos confinados en relación a su grado de descomposición, es decir si son de fácil, moderada o lenta degradabilidad.
  
- El tiempo de retención de los residuos sólidos confinados para que se presente la fase anaerobia que da lugar a la producción de biogas.
  
- La materia orgánica debe tener una humedad del 60 al 80% de su peso.

- La temperatura de los desechos orgánicos deben estar en un rango de 30 a 60 °C para que haya una buena producción de dicho energético.

- La calidad y cantidad de nutrientes de la materia orgánica, es decir, los materiales ricos en celulosa y hemicelulosa con suficiente sustancia proteínica para los microorganismos productores de biogas.

- El pH de los líquidos percolados que se considera aceptable debe oscilar en un rango de 6.7 a 7.5, si éste se pierde, la producción de biogas se inhibe por tornarse el medio demasiado ácido.

- El grado de compactación del material de cobertura de los desechos sólidos es importante en la aceleración del proceso de biodegradabilidad, al impedir o favorecer el paso de aire hacia los estratos; propiciando que predomine cualquiera de las dos fases (aerobia o anaerobia).

- La producción del biogas, también depende de las sustancias inhibitorias como el cloroformo, o acelerantes como los lodos orgánicos.

- La dirección que toma el biogas al desplazarse es otro factor a considerar para conocer su volumen, en ella intervienen la granulometría del suelo en donde se depositan los residuos, la permeabilidad, el nivel de aguas freáticas, el material utilizado para la cobertura de los desechos sólidos, la climatología los conductos naturales del subsuelo (fisuras, oquedades, etc.) y conductos artificiales que favorecen la migración horizontal de biogas (alcantarillas, albañales, túneles, tuberías de agua potable y pozos de agua).

El biogas por sus propiedades es un recurso energético potencialmente aprovechable, aunque también es un contaminante del medio natural, como ya se mencionó; algunas de estas propiedades son: inflamabilidad, poder calorífico (entre 4,700 a 6,000 Kcal/m<sup>3</sup>), explosividad cuando el metano alcanza concentraciones entre el 5 y el 15% en el aire, etc.

Conocidas las características y comportamiento del biogas en un sitio de disposición final de desechos sólidos municipales, en el tercer capítulo "**Métodos de Evaluación de la Producción Potencial del Biogas**", se presentan dos análisis basados en la producción de metano, el primero es el estequiométrico que proporciona el volumen de dicho biogas por

cantidad de desechos sólidos, y el segundo es un método cinético con el que se obtiene la cantidad de metano en un tiempo determinado.

El primer método considera una reacción anaerobia en donde la materia orgánica con alto contenido de humedad sufre un metabolismo, generando metano, bióxido de carbono y trazas de otros gases. Éste se basa en la composición química de los residuos sólidos (CHON), datos que se obtienen en laboratorio con muestras inalteradas de los residuos confinados. Con estos datos se efectúa un análisis estequiométrica en donde se consideran una serie de constantes y finalmente se obtiene una aproximación de los gases que se producen.

Para hacer una comparación de dichos resultados se efectúa un análisis considerando únicamente la composición química de los subproductos y en especial el papel por contener nutrientes favorables a la producción de dicho gas.

El segundo método se basa en tres categorías de desechos dependientes de su velocidad de degradación (lentamente degradables, moderada velocidad de degradación y rápidamente degradables), para estimar el volumen de dicho gas por unidad de tiempo.

Con estos resultados y las dimensiones del sitio de disposición final, así como el volumen total de residuos confinados y la vida útil del sitio, se obtiene una estimación de la cantidad total de biogas generado; dato que se utiliza para evaluar su posibilidad de uso así como para proponer las obras de control.

Considerando el tipo de obra para el control de la migración del biogas en el capítulo cuarto, "**Sistemas para el Control del Biogas**", se presenta una descripción de la infraestructura que se ha utilizado.

Dicha infraestructura consiste en pequeñas obras cuyo proceso constructivo es muy sencillo, y son principalmente pozos de profundidades variables y diámetros entre 0.40 y 0.60 m., que pueden operar en forma pasiva o activa. La primera cuando el biogas fluye de manera natural hacia el exterior y la segunda cuando el biogas es extraído con algún mecanismo. Estos pozos se ubican en la superficie de las plataformas que conforman el sitio de disposición final.

Para llevar a cabo dicha ubicación se toman dos criterios: el práctico y teórico; el primero considera las condiciones del sitio; es decir, magnitud y ubicación de éste, el espesor de los estratos de desechos sólidos confinados, las fracturas superficiales por donde emana el biogas y los resultados del monitoreo superficial.

El segundo criterio se utiliza como complemento del primero; éste consiste en aplicar el concepto de radio de influencia, que define una distancia radial a partir de un pozo dentro del cual todo el biogas es captado. Dicho criterio se aplica cuando se conocen los parámetros como la tasa de producción de metano, el flujo de biogas por pozo y la fracción de metano, el peso volumétrico de los residuos y la profundidad promedio de los pozos.

La red de conducción del biogas es parte de la infraestructura requerida para el manejo del biogas, la cual puede tenderse subterránea o superficial:

La red subterránea consiste en colocar la tubería en una zanja de 0.60 m. de profundidad, con la ventaja de disminuir el riesgo de ser dañada por acciones de vandalismo, no obstante dificulta su mantenimiento.

La red superficial consiste en colocar sobre el nivel de terreno natural la instalación y tiene la ventaja de facilitar su mantenimiento y la localización de fugas; sin embargo obstruye la superficie, limitando e impidiendo su uso como zona de esparcimiento social.

Respecto al equipo para el tratamiento del biogas, éste depende del tipo de aprovechamiento que se le va a dar y básicamente consiste en filtros, separador de condensados, sopladores, etc.

Adicionalmente al equipamiento necesario para el control del biogas, se construyen sistemas de monitoreo, con el fin de detectar las migraciones horizontales de dicho gas en los límites del sitio de disposición final y en las zonas habitacionales cercanas (a 100.0 m. aproximadamente).

Los pozos para monitoreo de biogas son pozos de menor dimensión que los pozos de extracción, se instrumentan con tres tubos de donde se toman muestras para su caracterización, utilizando los resultados para definir las medidas preventivas de posibles siniestros.



En lo que se refiere al aprovechamiento del biogas de los sitios de disposición final, como ya se mencionó, se han realizado algunos estudios en países como Estados Unidos, Brasil, Chile, Colombia, entre otros; quienes proponen las alternativas mencionadas en el siguiente capítulo.

En la capítulo quinto, "Alternativas para el Aprovechamiento del Biogas", se describen algunas posibles formas de utilizar este energético como combustible para uso doméstico y de vehículos, en la generación de energía eléctrica, así como para la producción de metanol. Se mencionan las ventajas y desventajas de cada alternativa y la infraestructura requerida en cada caso.

Por ejemplo:

En su uso como combustible doméstico y para vehículos se requiere de pozos de extracción activa, red de captación, unidad de pretratamiento y equipo de transporte (soplador y línea de conducción).

Para la generación de electricidad se necesitan pozos de extracción, red de captación, unidades de pretratamiento (remoción de condensados y eliminación de ácido sulfhídrico).

Como parte complementaria al aspecto teórico, se presenta un ejemplo de un sitio de disposición final de desechos sólidos del Estado de México; donde se proponen las medidas para el control y posible aprovechamiento del biogas generado.

El capítulo sexto, "Ejemplo de Aplicación", se basa en un proyecto real de un tiradero de desechos sólidos, del Estado de México denominado "Las Águilas" ubicado en el Municipio de Atizapán de Zaragoza; se estima la producción de biogas, aplicando los métodos estequiométrico y cinético.

Por otro lado, se presenta la cantidad de pozos requeridos en el sitio, para ello se utiliza el concepto de radio de influencia. También se propone un sistema de pozos de operación activa, así como una red subterránea para la conducción del biogas, y el equipo de tratamiento y utilización como combustible en la generación de energía eléctrica para proporcionar el alumbrado del tiradero "Las Águilas".

Y finalmente, como resultado del análisis de dicho estudio, se presentan en el capítulo séptimo las "**Conclusiones y Recomendaciones**", en donde se mencionan de manera general los aspectos relevantes tratados, llegando así a la siguiente conclusión:

El manejo del biogas generado en los sitios de disposición final de desechos sólidos de nuestro país, se efectúa de manera inadecuada, representando un problema de alto riesgo a los seres vivos, cuando podría ser un recurso energético aprovechable.

Para lograr esto, es necesario primeramente tener pleno conocimiento de su existencia, para continuar con investigaciones más profundas, cuyos resultados permitan determinar la rentabilidad de dicho gas, o por lo menos encontrar soluciones eficientes para su control.

En seguida se presenta de manera más amplia el contenido de los capítulos antes mencionados.

# CAPITULO I

## MANEJO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES

El ser humano en su afán por satisfacer sus necesidades y aspiraciones ha logrado en los últimos años un gran progreso científico y tecnológico, y en su constante búsqueda por seguir desarrollándose ha provocado desequilibrios en su entorno.

Esto último por la utilización y explotación indiscriminada de los recursos naturales (agua, aire y suelo), así como por problemas demográficos (entre otros el acelerado crecimiento, las concentraciones desordenadas en ciertas áreas del territorio, etc.), los cambios en sus hábitos de consumo al utilizar una mayor cantidad de productos de difícil biodegradabilidad, etc. Ésto ha traído como consecuencia la generación de grandes cantidades de residuos sólidos, líquidos y gaseosos, los cuales cuando no reciben un manejo adecuado ya sea por negligencia, falta de recursos financieros, desconocimiento de técnicas, renuencia para invertir en su tratamiento, etc., operan en el ambiente alterando su estado normal, contaminando los distintos medios, afectando el equilibrio ecológico y la salud de los seres vivos.

Sin embargo, si se controlan de manera adecuada, además de mitigar los impactos negativos, se puede obtener provecho de muchos de estos residuos susceptibles a ser empleados una y otra vez, como el papel, el vidrio, el cartón, los metales, etc., así como los inmensos caudales de aguas residuales y la gran cantidad de productos que las instalaciones fabriles desperdician.

Desafortunadamente dichas soluciones no se han aplicado de manera amplia en países en vías de desarrollo como México, que tienen que enfrentar el reto de lograr, simultáneamente y con un mínimo de recursos técnicos y económicos, la satisfacción de las necesidades de su creciente población y la conservación del medio natural.

No así en los países desarrollados cuyos problemas de deterioro ambiental se han solucionado en un alto porcentaje, contando actualmente con la infraestructura, recursos y acervo de conocimientos para ello.

En este capítulo sólo se hace referencia a los residuos sólidos municipales, como uno de los factores que contribuyen al deterioro de la naturaleza cuando no son manejados adecuadamente, por ejemplo: al originar olores desagradables, al coadyuvar en la proliferación de fauna nociva (insectos, roedores, etc.); al incorporar sustancias contaminantes como el lixiviado y el biogas, siendo este último el que toma importancia en el presente trabajo.

Previamente al desarrollo de los temas correspondientes al biogas, es importante presentar las principales etapas que se consideran en un sistema integral para el manejo de los residuos sólidos desde que son generados, hasta que se confinan en un sitio de disposición final, formando un ciclo.

## **I.1) CICLO DE LOS RESIDUOS SOLIDOS.**

La fase inicial es la generación de los residuos sólidos, continuando con el almacenamiento, la recolección, el transporte, el tratamiento y la disposición final. Por tanto, cualquier esfuerzo que se realice en alguna de estas etapas, tiene un efecto directo en las demás.

A continuación se presenta en la figura I.1. una ilustración general del ciclo de los residuos sólidos municipales, describiendo en forma resumida cada una de sus etapas, considerando los aspectos más importantes que las caracterizan.

### **I.1.1) GENERACION.**

Previamente a la descripción de la generación de residuos sólidos, se debe aclarar que en este trabajo, dicha generación es referida a los residuos sólidos municipales; entendiéndose como tales a los derivados de las actividades urbanas, resaltando aquellos que son producidos en fuentes como: casas habitación, mercados, vía pública, red de drenaje, parques públicos, restaurantes y otros comercios en donde los residuos que se producen no son peligrosos.

## CICLO DE LOS DESECHOS SOLIDOS MUNICIPALES

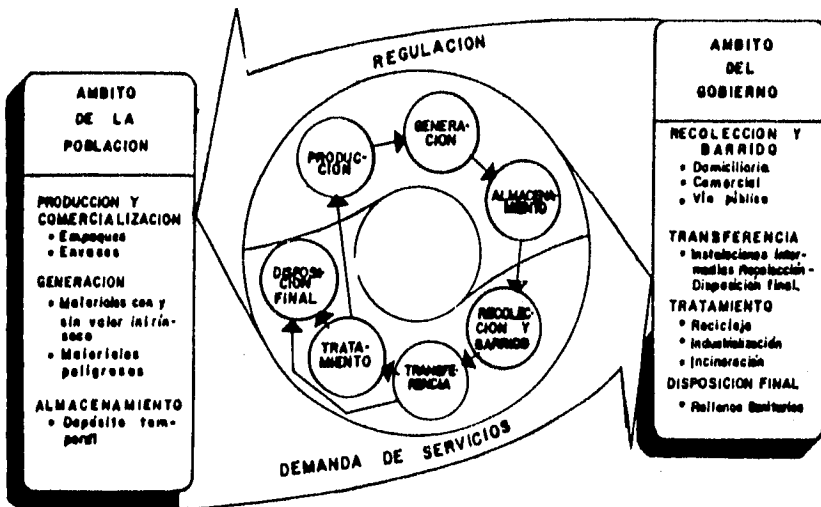


FIG. 1.1

El proceso se inicia con la generación propiamente dicha de los residuos que resultan de las distintas actividades productivas del hombre. Estos residuos que tienen un valor comercial intrínseco, se convierten en desechos cuando carecen de interés o bien cuando es difícil su incorporación a los ciclos productivos como materia prima, siendo finalmente orientados a su confinamiento.

De acuerdo a estudios estadísticos, se considera que la generación promedio per-cápita de residuos sólidos municipales en la República Mexicana, varía de 0.6 a 1.0 Kg./día <sup>1</sup>, dependiendo de algunos factores como los siguientes: estrato social o nivel socioeconómico (alto, medio o bajo); uso de suelo (habitacional, comercial, etc.); estaciones del año; hábitos alimenticios y día de la semana.

Es también función de estos factores la composición de los residuos sólidos municipales, al respecto se ha observado que en países latinoamericanos dicha composición varía de acuerdo al nivel socioeconómico, de la siguiente manera:

En el estrato bajo se generan residuos en donde predomina la materia orgánica. En el estrato alto, se ha encontrado mayor cantidad de material inorgánico que orgánico, siendo el primero potencialmente reciclable en un alto porcentaje. En cuanto al estrato medio, se ha observado que los residuos que generan tienden a poseer porcentajes semejantes de materia orgánica e inorgánica.

Si la zona es comercial, los residuos generados dependen del giro que tenga el comercio; siendo los mercados de frutas y verduras los que aportan mayor cantidad de materia orgánica.

Cuando el uso de suelo es habitacional, los residuos generados dependen del nivel socioeconómico.

Si es una zona de reserva ecológica o agrícola, los residuos se componen principalmente de materia orgánica.

Es importante considerar las estaciones del año, ya que la flora de las vías públicas, parques, jardines, etc., son componentes de los residuos sólidos municipales, observándose

---

(1) Dirección Técnica de Desechos Sólidos del D.D.F., "Muestreo de Generación de Desechos Sólidos Domiciliarios para el D.F." p 33

que es en otoño cuando hay un alto volumen de hojas, ramas, troncos, flores, etc., las cuales se desprenden por la acción del viento.

Los hábitos alimenticios están ligados directamente con el nivel socioeconómico de la población; de esta manera, en el estrato bajo se genera mayor cantidad de materia orgánica.

Se ha observado que en los días de asueto, en este caso sábados y domingos hay una mayor generación de residuos tanto en vías públicas, centros recreativos y domicilios; cuya composición depende del nivel socioeconómico de la comunidad.

Los residuos sólidos orgánicos e inorgánicos que se generan en México casi siempre se revuelven desde que son almacenados, lo cual dificulta su manejo, tratamiento y disposición final; además de repercutir en la producción eficiente del biogas ya que como se explica más adelante, el tiempo de degradación de los desechos es variable dependiendo de su tipo.

#### **1.1.2) ALMACENAMIENTO.**

Una vez generados los residuos sólidos, se procede a su almacenamiento, etapa que se refiere a la acción de retener temporalmente los residuos sólidos municipales en un recipiente seguro y adecuado, en espera de ser recolectados por el servicio de limpia.

El almacenamiento de los residuos sólidos en las casas habitación, en los establecimientos comerciales, en las industrias y otras fuentes similares, es responsabilidad de sus ocupantes, recomendándose recipientes con la capacidad suficiente (normalmente de 20 a 50 lts. <sup>2</sup>) para contener los residuos sólidos, tamaño y forma conveniente para el vertido de éstos, material resistente de fácil limpieza (metálicos o de plástico rígido) con tapa ajustada.

Dichos recipientes se deben colocar en zonas externas de almacenamiento, protegidos de la intemperie (lluvia y viento), para evitar que se derrame el contenido al exterior, originando posibles focos de contaminación.

---

(2) Jorge Sánchez Gómez. "Sistemas de Almacenamiento". Facultad de Ingeniería UNAM. División de Educación

Continúa p. 9

Siguiendo la secuencia del ciclo de los residuos sólidos, en seguida se describe la etapa correspondiente a la recolección, ubicando al barrido como una actividad propia de ésta, asignada a la vía pública.

### **1.1.3) BARRIDO.**

Los residuos generados en la vía pública son reunidos para incorporarse a la recolección y al transporte mediante el barrido manual que se puede llevar a cabo de forma individual o por medio de cuadrillas, o bien a través del barrido mecánico el cual se aplica generalmente en ciudades con vías de tránsito intenso, donde el barrido manual resulta de gran riesgo.

Los desechos encontrados en la vía pública provienen de fuentes naturales y de la actividad de hombre, siendo las primeras originadas por la vegetación misma, como los árboles y las plantas que por acción del viento desprenden hojas, ramas, semillas y flores, además del acarreo del polvo. Las segundas producto de la actividad del hombre al arrojar en lugares inapropiados envolturas de papel, cartón, trapo, celofán, plásticos, envases de vidrio, colillas de cigarro, residuos alimenticios, desechos domiciliarios, derrames accidentales de carga transportada, arcilla, lodos, animales muertos, madera, materiales de construcción, etc.

Realizada esta recolección específica, los residuos son almacenados de manera momentánea para su posterior vertido en los vehículos recolectores.

### **1.1.4) RECOLECCION.**

La recolección de los residuos sólidos es la parte central de servicio de limpia, el propósito fundamental es recoger en su lugar de origen, los desechos municipales, principalmente los domiciliarios y de vía pública, así esta etapa representa el enlace entre el almacenamiento y la transferencia, el tratamiento o disposición final.

Tomando en cuenta la composición, cantidad y volumen para establecer la frecuencia de recolección de acuerdo a las necesidades de cada lugar, se requiere un sistema de recolección apropiado para cada caso y para cada tipo de desechos sólidos (de comercios, mercados, rastros, etc.) dependiendo de factores como la densidad de población, el sistema vial y el tráfico vehicular; estableciendo rutas, horarios y métodos de recolección.



En México se practican principalmente los siguientes métodos de recolección:

**a) De esquina o parada en puntos fijos:**

Es el método más económico mediante el cual los usuarios llevan sus residuos al vehículo recolector, forman una fila ordenada para que el operador reciba el recipiente, o entregue a otro que se encuentra en la carrocería, el cual vierte el contenido y lo regresa al operario que se lo entregó, para que a su vez lo devuelvan al usuario quien se retira; la operación se repite tantas veces como sea necesario, hasta atender a todos los usuarios que lo hayan solicitado.

**b) De acera:**

En este método el personal operario del vehículo recolector toma los recipientes con basura que sobre la acera han sido colocados por los usuarios del servicio, para después trasladarse hacia el vehículo recolector, con el fin de vaciar el contenido de dichos recipientes dentro de la tolva o sección de carga del vehículo, regresándolos posteriormente al sitio de la acera de donde los tomaron, para que los usuarios atendidos los introduzcan ya vacíos a sus domicilios.

Para realizar esta actividad, el vehículo debe transitar a bajas velocidades en ambos sentidos de la calle.

Este método además de ser más costoso que el de esquina, presenta el inconveniente de que los residuos sean esparcidos por animales, cuando los recipientes no se encuentran herméticamente cerrados, teniendo que colocar canastillas elevadas, lo cual implica un costo adicional para los usuarios.

**c) Intradomiciliario:**

Es semejante al anterior, con la variante de que los operarios del vehículo recolector entran hasta las casas habitación por los recipientes con desechos, regresándolos hasta el mismo sitio de donde los tomaron después de haberlos vaciado dentro de la caja del vehículo. Dicho método se considera más costoso que el de acera y aún más que el de esquina.

#### **d) Por contenedores:**

Es semejante al de esquina ya que el vehículo recolector también debe detenerse en ciertos puntos determinados para llevar a cabo la prestación del servicio; es el más adecuado para centros de gran generación o de difícil acceso (mercados, centros comerciales, hospitales, etc.).

En general los reglamentos de limpia, norman todas las acciones y actividades para que con la colaboración de los habitantes de la población sea un servicio eficiente.

Posterior a la recolección, los desechos sólidos municipales son transportados a estaciones de transferencia, plantas de tratamiento o directamente a los sitios de disposición final.

#### **I.1.5) TRANSPORTE.**

El equipo para el transporte de los residuos sólidos utilizados durante la recolección hacia la transferencia o hacia el sitio de disposición final, es seleccionado en función del tipo de desechos, de su volumen y de la vialidad de la ciudad; por ejemplo pueden ser desde carretas remolcadas por animales de tiro, camiones con cajas abiertas como los volteos, camiones de redilas, hasta vehículos cerrados con mecanismos de compactación como los camiones de carga trasera, de carga lateral y carga frontal.

#### **I.1.6) TRANSFERENCIA.**

Los residuos sólidos una vez que son recolectados deben ser trasladados a los sitios de disposición final para su confinamiento; estos sitios generalmente se encuentran muy alejados de la zona urbana, por lo que no es conveniente que los vehículos recolectores realicen estos recorridos, ya que se propicia la deficiencia en el servicio de recolección.

Por ésto es necesario realizar la transferencia de los residuos sólidos de los camiones recolectores, a vehículos de mayor capacidad diseñados para esta actividad, denominados transfers (capacidad entre 15 y 21 Ton. o 48 a 70 m<sup>3</sup> . dependiendo del tonelaje recolectado).<sup>3</sup>

---

<sup>(3)</sup> Víctor Manuel Rodríguez, "Manual de Orientación Básica para el Manejo de los Desechos Sólidos en los Municipios". Secretaría de Ecología del Estado de México. p 75-76.

La transferencia de residuos sólidos sin afectar al medio circundante, debe realizarse en el interior de la estación, tratando de disminuir el riesgo de impacto ambiental a su entorno.

### **I.1.7) TRATAMIENTO.**

Cuando los desechos sólidos son enviados a las plantas de tratamiento, un porcentaje se va como rechazo a los sitios de disposición final, y el restante se transforma o se prepara para incorporarse a la actividad productiva o para reducir su volumen.

Bajo este contexto se define al "Tratamiento" de residuos sólidos como el procedimiento al que se someten éstos, mediante el cual se modifican sus características físicas, químicas y biológicas.

Algunos procesos de tratamiento que se pueden aplicar a los residuos sólidos son:

- a) **Físico:** Separación por gravedad, filtración y reducción de tamaño.
- b) **Biológico:** Composteo y digestión anaerobia.
- c) **Destrucción térmica:** Incineración.
- d) **Recuperación de materiales y reciclaje:** Separación manual y mecánica, trituración, compactación y composteo.

### **I.1.8) DISPOSICION FINAL.**

Se considera como el momento en que los desechos sólidos son depositados en lugares específicos a efecto de concentrarlos o aislarlos para su posterior degradación.

En nuestro país esta actividad se ha efectuado en gran medida en sitios no adecuados, originando grandes tiraderos a cielo abierto. Sin embargo, actualmente se pretende confinar un mayor porcentaje de dichos residuos en sitios adecuados como los rellenos sanitarios.

Algunos aspectos de ambos sitios se presentan a continuación:

#### **a) Tiradero a cielo abierto:**

Surgen de manera clandestina y sin control alguno, trayendo consigo el deterioro ambiental de las zonas circundantes. Generalmente estos sitios se originan en barrancas, cauces de

rios, minas abandonadas, zonas pantanosas, áreas geológicas inestables, etc., siendo necesario efectuar el saneamiento, que consiste en conformar en celdas y cubrir con material impermeable los desechos expuestos, definiendo simultáneamente la infraestructura para el control de la obra como caminos internos y externos, sistemas para el control de contaminantes, casetas, cercas divisorias y sistemas de drenaje.

#### **b) Relleno Sanitario:**

Es una obra de ingeniería donde se aplican técnicas para la disposición final de los residuos sólidos y tiene como propósito no causar perjuicios al medio ambiente, ni provocar molestias o peligros a la comunidad.

Para la realización de esta obra se acude al proceso constructivo: planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento.

##### *b.1) Planeación:*

Consiste en la localización del sitio propicio en base a estudios geohidrológicos, de impacto ambiental y levantamientos topográficos principalmente.

##### *b.2) Diseño:*

Esta actividad contempla la realización del proyecto en el que se especifican técnicas, métodos constructivos, recomendaciones, manuales de organización, etc., aplicables a la construcción, operación y mantenimiento del relleno sanitario.

##### *b.3) Construcción:*

Implica el acondicionamiento del sitios para que pueda comenzar a operar, así como la realización de las obras complementarias en el momento que se requieran.

##### *b.4) Operación:*

La operación de un sitio de disposición final ya sea un tiradero a cielo abierto, o bien un relleno sanitario, comprende los aspectos administrativos y de saneamiento, consistiendo estos últimos en las actividades de recibir, acomodar, conformar y dar una cobertura diaria de los desechos que ingresan, empleando para ello maquinaria pesada como tractores de orugas, traxcavos, retroexcavadoras, compactadores, motoconformadoras y vehículos como volteos y pipas.

Dicha operación se puede efectuar mediante tres modalidades: zanja, área y/o una combinación de ambos dependiendo de la topografía del sitio y del presupuesto asignando para ello; siendo más costoso utilizar el método de zanja.

Previamente y/o paralelamente a la operación del sitio, se llevan a cabo diversas obras como caminos de acceso, canales de drenaje, cárcamos para captación de lixiviados, sistemas de control de biogas y finalmente la cobertura vegetal y forestación.

*b.5) Mantenimiento:*

Consiste en conservar en funcionamiento y en buen estado las obras de infraestructura llevadas a cabo en el sitio de disposición final, así como actividades de fumigación.

Mencionados de manera general los aspectos referentes al ciclo de los residuos sólidos, en seguida se presentan las características particulares de éstos, las cuales son de gran utilidad para conocer la generación del biogas.

## **1.2) COMPOSICION DE LOS RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES.**

Como se mencionó, los residuos sólidos municipales son de origen doméstico, parques, jardines, escuelas, vía pública y aquellos negocios (excepto las industrias), cuyos residuos no son peligrosos; éstos han sido clasificados de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-22-1985 "Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo Residuos Sólidos Municipales-Selección y Cuantificación de Subproductos". Véase tabla I.1.

TABLA I.1

COMPONENTES DE LOS RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES <sup>4</sup>

1.- ALGODON
2.- CARTON
3.- CUERO
4.- ENVASES DE CARTON
5.- FIBRA DURA VEGETAL
6.- FIBRA SINTETICA
7.- HUESO
8.- HULE
9.- LATA Y ALUMINIO
10.- LOZA Y CERAMICA
11.- MADERA
12.- MATERIAL DE CONSTRUCCION
13.- MATERIAL FERROSO
14.- MATERIAL NO FERROSO
15.- PAPEL BOND
16.- PAPEL PERIODICO
17.- PAPEL SANITARIO
18.- PAÑAL DESECHABLE
19.- PLASTICO DE PELICULA
20.- PLASTICO RIGIDO
21.- POLIURETANO
22.- POLIESTIRENO
23.- RESIDUOS ALIMENTICIOS
24.- RESIDUOS DE JARDINERIA
25.- TRAPO
26.- VIDRIO DE COLOR
27.- VIDRIO TRANSPARENTE
28.- RESIDUO FINO
29.- OTROS (PILAS, VINIL, ETC.)

(4) Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, Norma Oficial Mexicana, Nom-22-1985 p.5.

La composición de los residuos sólidos es diferente en cada país, ciudad, estrato socioeconómico y uso de suelo; esta clasificación permite conocer porcentajes de material reciclable y no reciclable, biodegradable y no biodegradable, siendo los residuos alimenticios los que constituyen la fracción predominante con aproximadamente más del 40%; además de ser los más rápidamente degradables.

El papel, cartón, trapo, residuos de jardinería y madera; representan aproximadamente el 24%, los cuales se degradan lentamente; por lo que los porcentajes relativos de estos componentes determinan la velocidad de la generación de biogas. Véase tabla I.2.

TABLA 1.2

APORTACION DE SUBPRODUCTOS EN LOS RESIDUOS SOLIDOS  
MUNICIPALES DE MEXICO<sup>1</sup>

SUBPRODUCTOS	RESIDUOS MUNICIPALES %
1.- ALGODON	0.293
2.- CARTON	4.016
3.- CUERO	0.461
4.- ENVASES DE CARTON	1.558
5.- FIBRA DURA VEGETAL	3.050
6.- FIBRA SINTETICA	0.313
7.- HUESO	0.678
8.- HULE	0.342
9.- LATA	1.261
10.- LOZA Y CERAMICA	0.453
11.- MADERA	0.482
12.- MATERIA DE CONSTRUCCION	0.425
13.- MATERIAL FERROSO	0.951
14.- MATERIAL NO FERROSO	0.584
15.- PAPEL BOND	0.981
16.- PAPEL PERIODICO	7.454
17.- PAPEL SANITARIO	4.472
18.- PAÑAL DESECHABLE	1.999
19.- PLASTICO DE PELICULA	3.771
20.- PLASTICO RIGIDO	2.154
21.- POLIURETANO	0.859
22.- POLIESTIRENO	0.248
23.- RESIDUOS ALIMENTICIOS	42.010
24.- RESIDUOS DE JARDINERIA	4.614
25.- TRAPO	1.560
26.- VIDRIO DE COLOR	2.149
27.- VIDRIO TRANSPARENTE	4.789
28.- RESIDUOS FINOS	2.995
29.- OTROS (PILAS, VINIL, ETC.)	5.078
<b>T O T A L</b>	<b>100.000</b>

13) Secretaría de Desarrollo Social, Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente

(1991-1992)



En orden descendente la degradación anaerobia se presenta en los residuos de alimentos, papel, hojas y pasto, madera y hule.

En sitios en donde se han depositado residuos con un alto contenido de materia orgánica fácilmente degradables (mercados, granjas, restaurantes, residuos domésticos, con un alto contenido de materia orgánica), el biogas se genera rápidamente durante los primeros cinco años, mientras que en aquellos donde se ha depositado basura "rica" (alto contenido de papel, cartón, trapo, madera y residuos de jardinería), es generado en un lapso de 10 a 20 años.

Los residuos sólidos degradables se clasifican en tres diferentes grupos según la velocidad de degradación de cada uno de ellos de acuerdo a la tabla 1.3.

**TABLA 1.3**

**BIODEGRADABILIDAD DE LOS RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES \***

<b>GRUPO A RAPIDAMENTE DEGRADABLES</b>	<b>GRUPO B MODERADA VELOCIDAD DE DEGRADACION</b>	<b>GRUPO C LENTAMENTE DEGRADABLES</b>	<b>GRUPO D NO DEGRADABLES</b>
RESIDUOS ALIMENTICIOS	ALGODON	CUERO	LAMINA
RESIDUOS DE JARDINERIA	CARTON	HULE	LATA
	ENVASES DE CARTON ENCERADO	PLASTICO RIGIDO Y DE PELICULA	LOZA Y CERAMICA
	FIBRA DURA VEGETAL	POLIESTIRENO	MATERIAL DE CONSTRUCCION
	PAÑAL DESECHABLE	POLIURETANO	MATERIAL FERROSO
	MADERA	FIBRA SINTETICA	MATERIAL NO FERROSO
	PAPEL	HUESO	VIDRIO
	TRAPO		

*(6) Fenn D.G., Use of the water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal site, U.S.E.P.A*

Respecto a la composición química de los residuos sólidos, éste es muy variable dependiendo del residuo que predomina en la muestra, así como el contenido de humedad que éstos presentan al ser analizados.

Algunos datos obtenidos respecto a la composición química de los residuos sólidos se muestra en la tabla I.4.

**TABLA I.4**  
**ANALISIS QUIMICOS DE SUBPRODUCTOS<sup>7</sup>**

SUBPRODUCTO	HUMEDAD %	C	H	O	N	CENIZAS	VOLATILES	PODER CALORIFICO
RESIDUOS COM	20.7	28	3.5	22	0.33	24.9	75.1	14,430
LIPIDOS	0.0	76	12.1	11	0.0	0.0	100.00	38,840
PUTRESCIBLES	72.0	45	6.4	28.8	3.3	16.0	84.0	19,730
METALES	3.0	0.8	0.04	0.2	--	99.0	1.0	288
VIDRIO	2.0	0.6	0.03	0.1	--	99.3	0.7	151
PAPEL	10.2	43	5.80	44.3	0.3	6.0	94.0	17,619
MADERA	20.0	50	6.0	42.4	0.2	1.0	99.0	20,040
PASTO	65.0	43	6.0	41.7	2.2	6.8	93.2	17,890
MALEZA	40.0	42	6.0	41.2	2.0	8.3	91.7	18,380
VERDURAS	62.0	40	5.6	39.0	2.0	13.0	87.0	16,460
CUERO	10.0	60	8.0	11.5	10.0	10.0	90.0	26,350
PLASTICO	2.0	60	7.2	22.6	--	10.2	89.8	33,420
TEXTIL	10.0	55	6.6	31.2	4.6	2.1	97.5	17,800

(7) *Rubbish, Solid Waste Management, Compostion United States 1972.*

La generación del biogas en sitios de disposición final de residuos sólidos municipales, está vinculada con el ciclo que siguen éstos, desde su generación hasta su disposición final.

Es decir, el proceso de descomposición y fermentación de la materia orgánica (etapas que conducen a la generación del biogas), se presentan desde el momento en que los productos de origen orgánico dejan de tener valor por las alteraciones de su estado normal.

Dichos residuos al mezclarse con los demás, durante cada una de las etapas del ciclo, agilizan en gran medida su descomposición.

Mencionados los aspectos referentes al manejo, composición y velocidad de degradación de los residuos sólidos municipales, factores importantes en la producción del biogas; en el siguiente capítulo se presentan las características generales de éste.

# CAPITULO II

## GENERACION, CARACTERIZACION Y COMPORTAMIENTO DEL BIOGAS

Para el control y aprovechamiento del biogas se deben conocer entre otros aspectos las causas de su generación, la composición de éste, así como su comportamiento en los sitios de disposición final. De esta manera se puede contar con los parámetros de medición para el diseño y cuantificación de los sistemas de control y del equipo requerido para su tratamiento y posible aprovechamiento.

### II.1) IMPORTANCIA DEL BIOGAS.

La relevancia que adquiere el biogas generado en los sitios de disposición final de residuos sólidos municipales es patente debido por una parte, a los aspectos negativos que causa sobre los seres vivos cuando no es controlado y por otro lado a que su potencial económico puede ser un factor benéfico.

En lo que se refiere a los aspectos negativos que dicho biogas causa en los seres vivos se consideran los siguientes:

Es explosivo cuando el metano, que es uno de sus principales componentes, se encuentra en concentraciones del 5 al 15% en volumen del aire atmosférico, es corrosivo por el porcentaje de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que contiene, y su condensado también lo es por el contenido del ácido sulfhídrico, su olor es desagradable y afecta a la comunidad que vive en los alrededores, es tóxico y puede producir asfixia.

Por ello es importante evitar la migración incontrolada hacia zonas externas del sitio en donde se genera, principalmente en zonas habitadas, aplicando medidas de control como: la extracción natural o forzada del biogas para ventearlo o incinerarlo; así como la

impermeabilización del sitio y la cobertura de los desechos sólidos; lográndose adicionalmente prevenir posibles siniestros o afectaciones a la salud pública.

Hablando de los aspectos positivos de este gas, se pueden considerar los siguientes:

Es un recurso que representa una opción a corto, mediano y largo plazo para su utilización en la producción de energía, ya sea eléctrica, calorífica o como un complemento combustible.

Lo anterior es debido principalmente a su contenido de metano, el cual es un gas con cierto poder calorífico, suficiente para poder aprovecharlo en ciertos usos.

El metano se define como combustible y carburante, no obstante su bajo poder calorífico de 8,847 kcal/m<sup>3</sup> aproximadamente, comparado con el butano (gas de uso común) que es de 28,588 kcal/m<sup>3</sup>. El metano ocupa de un 40 a un 60% del volumen total del biogas.

Dentro de los componentes del biogas, el metano es determinante en el valor calorífico del biogas, el cual fluctúa entre 4,700 a 6,000 kcal/m<sup>3</sup> <sup>8</sup>, atribuyéndole al biogas la propiedad de ser un combustible útil, aunque comparado con el poder calorífico del gas de uso común está por abajo en un 536% aproximadamente. Véase tabla II.1.

**TABLA II.1**

**PODER CALORIFICO DE DIFERENTES COMBUSTIBLES \***

COMBUSTIBLE	KCAL m <sup>3</sup>	KCAL kg	KCAL kw-h
BIOGAS	5,335		
GAS NATURAL	9,185		
METANO	8,847		
PROPANO	22,052		
BUTANO	28,588		
ELECTRICIDAD			860
CARBON		6,870	
PETROLEO		11,357	
COMBUSTOLEO		10,138	

(8) Bufete Industrial. "Muestreo y Análisis del Biogas en el extradero de Santa Cruz Meyehualco". México D.F. p.85

(9) Dirección Técnica de Desechos Sólidos. D.D.F. "Resumen Ejecutivo Relativo a la viabilidad para el aprovechamiento del biogas en sitios de disposición final de residuos sólidos". p. 71.

No obstante dicha propiedad del biogas, hasta la fecha en México no se ha considerado necesaria su utilización por contarse con otros recursos energéticos más eficientes como el petróleo, el carbón, el gas natural y la electricidad, principalmente.

Las propiedades y composición del biogas son determinantes para evaluar su importancia como posible energético y para conocer estas dos características, es necesario estudiarlo desde que se genera.

## **II.2) GENERACION DEL BIOGAS EN UN SITIO DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS.**

El biogas es una mezcla de gases que se genera en los estratos que forman los desechos sólidos orgánicos confinados en los sitios de disposición final, o cualquier otro medio en donde sean posibles las condiciones aerobias y anaerobias; en este caso se estudia al biogas producido en los sitios de disposición final de los desechos sólidos municipales, como producto de la descomposición biológica, física y química de la materia orgánica; como se describe a continuación:

**Descomposición biológica:** Efectuada por seres vivos microscópicos que transforman la materia orgánica en materia parcial o totalmente descompuesta, así como en productos finales gaseosos.

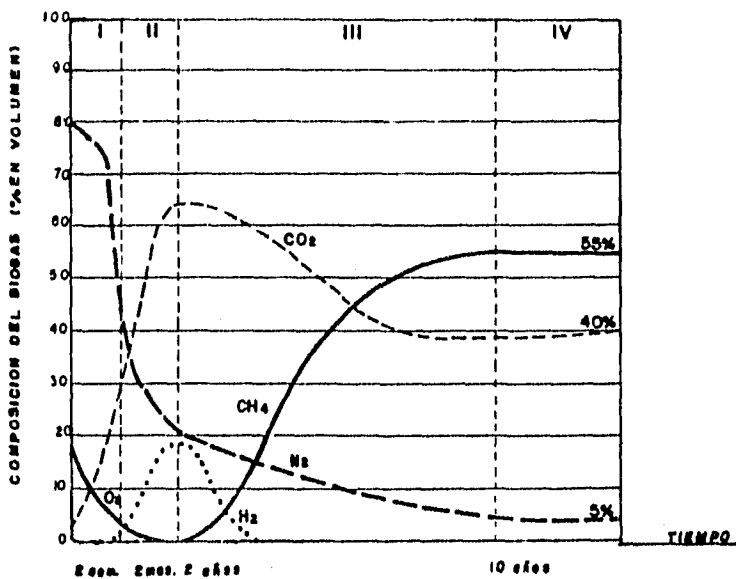
**Química:** La descomposición se lleva a cabo a través de la hidrólisis, la absorción-desorción, o el intercambio iónico de los componentes, dando como resultado variaciones en sus características y un gran movimiento de los diferentes constituyentes de los desechos sólidos.

**Descomposición física:** Esta se debe a los fenómenos físicos naturales como la temperatura, la precipitación pluvial, que al infiltrarse en la superficie del sitio de disposición final provoca la concentración de los componentes residuales.

El proceso mediante el cual se genera el biogas en sitios de disposición final de desechos sólidos municipales, ocurre básicamente de la siguiente manera:

Después del sellado de los desechos sólidos con algún material de cobertura, se presentan tres principales etapas de degradación: aeróbica, facultativa y anaeróbica, como se ilustra en la gráfica II.1.

FASES DE ACTIVIDAD MICROBIAL RELATIVA A LA FORMACION DE METANO EN SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE DESECHOS SOLIDOS.<sup>10</sup>



- I. FASE AEROBICA
- II. FASE ANAEROBICA ACIDOGENICA
- III. FASE ANAEROBICA METANOGENICA INESTABLE
- IV. FASE ANAEROBICA METANOGENICA ESTABLE

(10) Gumpson Cherie. *Anaerobic Digestion Principles and Practice for Systems* p, 110.

GRAF. II.1



Cada una de estas etapas se describen en seguida:

## II.2.1) ETAPA AEROBICA

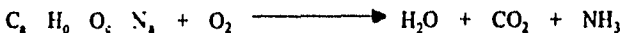
Cuando los residuos sólidos son depositados, compactados y cubiertos en el sitio de disposición final, el medio es muy poroso. Los huecos existentes están llenos de aire, en el cual el 78% es nitrógeno, 21% oxígeno y 1% trazas de otros gases <sup>11</sup>.

En esta etapa únicamente actúan microorganismos aerobios, por lo que la descomposición microbiana de los residuos toma lugar en una atmósfera rica en oxígeno, el cual es consumido por la respiración de éstos.

Bajo estas condiciones los compuestos orgánicos complejos son transformados a compuestos más simples mediante una hidrólisis enzimática; produciendo cantidades significativas de bióxido de carbono (aumentando a concentraciones del 90%), agua y amoníaco con liberación de energía, elevando la temperatura en el sitio de disposición final a más de 68°C (154°F) <sup>12</sup>.

Es decir:

Celulosa —————> Glucosa  
Proteínas —————> Aminoácidos  
Grasas —————> Glicerol



Este proceso se efectúa en un tiempo de tres meses a un año. <sup>13</sup>

---

(11) INCREMI. "Clausura de un Sitio de Disposición Final de residuos sólidos"  
México, D.F., p. 70

(12) *Ibid.*, p. 71

(13) Dirección Técnica de Desechos Sólidos D.D.F. "Resumen Ejecutivo Relativo a la Viabilidad para el Aprovechamiento del Biogas en Sitios de Disposición Final de Residuos Sólidos", p. 19.

## II.2.2) ETAPA FACULTATIVA.

El oxígeno encontrado en la materia orgánica, así como el suministrado a través del material de cubierta, es utilizado por los microorganismos (bacterias) aerobios los cuales al agotarlo durante su respiración, mueren y son sustituidos por microorganismos facultativos, los cuales son capaces de realizar sus funciones vitales, tanto en medios con oxígeno como en medios privados de él.

Dicho proceso es rápido comparado con las diferentes fases anaeróbicas que se efectúan posteriormente.

## II.2.3) ETAPA ANAEROBICA.

En general la digestión anaerobia es uno de los procesos que más se utilizan para estabilizar la porción biológicamente degradable de los residuos orgánicos.

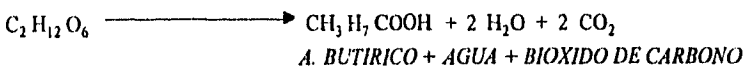
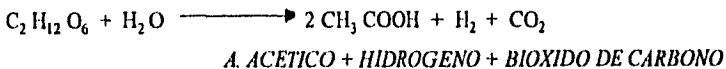
Consiste en un sistema donde los materiales orgánicos producidos durante la hidrólisis (glucosa, aminoácidos y glicerol) son utilizados por los microorganismos durante sus actividades metabólicas en ausencia de oxígeno, dando como resultado final productos como metano, bióxido de carbono, amoníaco, material celular y trazas de otros gases.

Específicamente la digestión anaerobia se ha dividido en las siguientes tres etapas:

### a) Anaeróbica no metanogénica.

En ella ocurre una fermentación ácida o conversión intracelular de los azúcares, péptidos, aminoácidos y otros compuestos, producto de la hidrólisis. Dando como resultado principalmente a los ácidos propiónico, butírico, alcohol etílico, etc..

Como se muestra en las siguientes formulaciones:





A medida que avanza el proceso, disminuye el pH a 5.4, en el que se inhibe la actividad de los microorganismos fermentadores, provocando la aparición de las bacterias metanogénicas.

**b) Anaeróbica metanogénica inestable.**

Se caracteriza por la presencia de metano y la disminución del bióxido de carbono, así como el consumo del hidrógeno.

Es en esta etapa cuando los ácidos orgánicos, producto de la fermentación ácida, son transformados a gas metano y bióxido de carbono por un grupo de microorganismos comúnmente llamados metanogénicos, los cuales son estrictamente anaerobios, la producción de metano adquiere un carácter francamente ascendente.

El proceso de esta etapa es el siguiente:

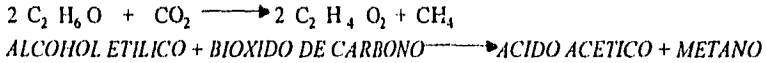
- b.1) Esta fase toma lugar simultáneamente con la fase no metanogénica.
- b.2) La producción de metano comienza después de que todo el oxígeno ha sido consumido.
- b.3) Las bacterias que forman metano son necesariamente anaerobias. El oxígeno en cualquier cantidad inhibe su actividad, sin embargo, éstas forman esporas y cuando regresan las condiciones anaerobias iniciales, recuperan nuevamente su actividad normal.
- b.4) En ausencia del oxígeno, las bacterias que forman metano convierten a los ácidos orgánicos en 50% bióxido de carbono y 50% metano aproximadamente. El gas es saturado con vapor de agua.

También se presentan pequeñas cantidades de ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ).

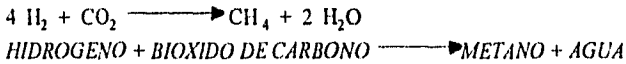
- b.5) Una pequeña cantidad de energía es perdida en el proceso de conversión de los residuos sólidos a metano, permaneciendo el 90% de la energía de los residuos sólidos. Por lo tanto, se genera menos calor que cuando concluye la descomposición aeróbica.

Se han considerado dos posibles mecanismos de formación de metano por la acción de las bacterias. En el primero el gas se produce como resultado de la oxidación del alcohol etílico y la reducción del bióxido de carbono.

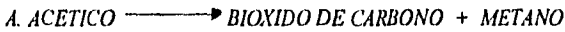
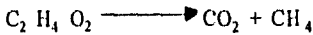
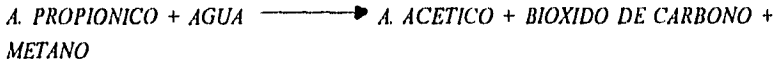
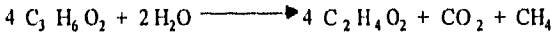
Oxidación del alcohol etílico:



Reducción del bióxido de carbono:



En el segundo, el metano se produce como resultado de la reducción del  $\text{CO}_2$ , producto de la oxidación del ácido acético y propiónico:



**c) Anaeróbica metanogénica estable.**

Se caracteriza porque en ella los porcentajes de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  que constituyen al biogas no varían con el tiempo.

Durante esta fase se presentan las siguientes condiciones:

- c.1) La producción y composición del gas se acercan a un estado estable.
- c.2) Las concentraciones de gas metano se estabilizan en un rango de 50-60% por volumen.
- c.3) Los rangos de concentración de bióxido de carbono son de 40 y 50% por volumen.
- c.4) También están presentes trazas de otros gases (por ejemplo, ácido sulfhídrico, mercaptanos, etc.); éstos son las fuentes de olor de los rellenos sanitarios.



residuos alimenticios, de jardinería, madera, algodón y papel, principalmente, y los segundos los animales muertos, hueso, cuero, etc.

De esta forma se puede hacer un diagnóstico preliminar respecto a la producción de biogas de un sitio de disposición final, con sólo conocer el tipo y cantidad de residuos que ingresan.

Por ejemplo, en sitios de disposición final en donde se han depositado desechos con un alto contenido de orgánicos fácilmente degradables (mercados, granjas, restaurantes, residuos domésticos; etc.; con alto contenido de materia orgánica), el biogas tiende a generarse rápidamente durante los primeros 5 años; mientras que en aquellos en donde se han depositados residuos "ricos" (alto contenido de papel, cartón, trapo, madera y residuos de jardinería), el biogas se genera en un lapso de 15 a 30 años aproximadamente.

### **II.3.2) TIEMPO DE RETENCION.**

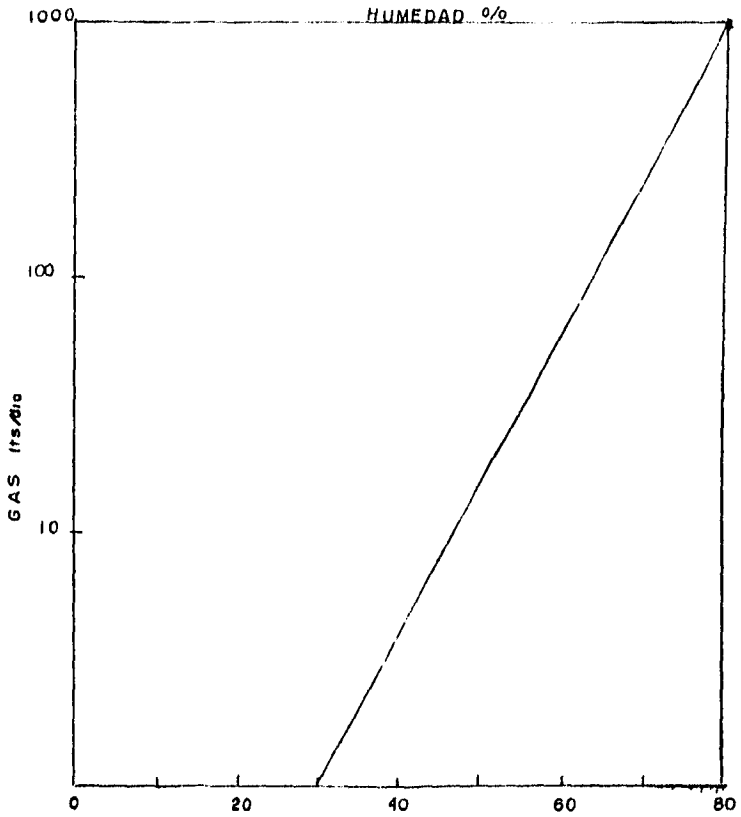
Se refiere al tiempo que requieren los residuos orgánicos confinados en un sitio de disposición final, para que se inicie la producción de biogas, es decir el tiempo necesario para que los microorganismos aerobios consuman el oxígeno atmosférico atrapado en los intersticios del substrato, para entrar a la fase anaeróbica metanogénica.

Se considera que dicha producción se presenta en general, después de dos años y medio de haberse confinado los desechos sólidos, como se ilustra en la gráfica II. 1.

### **II.3.3) CONTENIDO DE HUMEDAD.**

Si el contenido de humedad de los desechos sólidos confinados es menor del 20% respecto a su peso total, se acumula ácido acético en el yacimiento, inhibiéndose el proceso de fermentación y consecuentemente la formación de metano.

Para la producción óptima de metano se requiere que los residuos contengan del 60 al 80% de humedad respecto a su peso total como se puede observar en la gráfica II.2.



(14) Refugio Coo. Curso Intermedial sobre Diseño y Disposición Final de Residuos Sólidos. P.8

En ensayos experimentales se ha observado que al elevar la humedad de un 61% a un 75% puede aumentar de 10 a 20 veces la velocidad de generación de biogas por periodos cortos.

Esto sugiere que en un relleno sanitario el control de humedad puede ser utilizado para controlar la generación de biogas.

Por ejemplo, si en la composición de la materia orgánica el porcentaje de humedad rebasa el 80% de su peso, la producción de biogas disminuye.

#### II.3.4) TEMPERATURA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS ORGANICOS.

La temperatura de los residuos sólidos orgánicos confinados en los sitios de disposición final es uno de los factores de mayor trascendencia para que se lleve a cabo el proceso que trae consigo la producción del biogas, el cual se basa en la degradación de la materia orgánica.

En el desarrollo óptimo del proceso de generación de biogas, se requiere que el valor de la temperatura de los residuos sólidos fluctúe entre 30 y 70°C, para que las bacterias formadoras de biogas se reproduzcan y trabajen en forma óptima, según el tipo de éstas, es decir, para cada especie de bacterias, hay una temperatura en la que el crecimiento y multiplicación se produce con mayor rapidez, se llama temperatura de crecimiento óptimo.

Se distingue tres tipos de bacterias según la temperatura en donde se desarrollan, como se ilustra en la tabla II.2.

TABLA II.2

#### BACTERIAS SEGUN LAS RELACIONES DE TEMPERATURA <sup>15</sup>

CLASE	MINIMA	OPTIMA	MAXIMA
PSICROFILAS	0 °C	10 A 15 °C	30 °C
MESOFILAS	15 A 25 °C	25 A 37 °C	40 A 55 °C
TERMOFILAS	25 A 45 °C	50 A 60 °C	60 A 90 °C

(15) Burdon Kenneth and Robert P. Williams, *Microbiología, México D.F., 1981, P.168*



Las bacterias Psicrófilas se desarrollan a temperaturas próximas al punto de congelación (10 °C); éste tipo de bacterias no intervienen en la producción de biogas.

Las bacterias Mesófilas se reproducen de manera óptima en temperaturas que oscilan entre 25 y 37 °, aunque algunos investigadores consideran dicho rango entre 30 a 40 °C.

Estas bacterias se reproducen fácilmente y se mantienen activas si no hay cambios súbitos de temperatura.

Las bacterias termófilas son las que toman mayor importancia en la generación de biogas, la temperatura óptima para su desarrollo fluctúa entre 50 a 60 °C, ampliándose dicho rango de 55 a 70 °C.

En el termófilo se producen mayores cantidades de biogas en tiempos más cortos.

Normalmente las temperaturas máximas de los residuos confinados son de 30 u 40 °C, aunque depende del clima del lugar, encontrando con frecuencia temperaturas más bajas que las óptimas, lo cual repercute en la velocidad de la actividad de las enzimas y microorganismos degradadores, afectando la producción del biogas; ya que la mayoría de las bacterias dejan de multiplicarse.

### **II.3.5) CALIDAD Y CANTIDAD DE NUTRIENTES**

Los nutrientes requeridos para que se reproduzcan las bacterias hidrolíticas, acetogénicas, fermentativas y metanogénicas; productoras de biogas, son el carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre encontrados en los hidratos de carbono, grasas y proteínas, de los cuales está compuesta la materia orgánica; siendo el carbono y el nitrógeno las fuentes principales de alimentación de dichas bacterias, el primero como abastecedor de energía y el segundo para la formación de nuevas células. La relación entre ambos es de 30/1.

Dentro de los materiales orgánicos que se observan en los residuos sólidos municipales y de los cuales se puede esperar una buena producción de biogas por su cantidad y calidad de nutrientes, están los siguientes:

Ciertos residuos alimenticios (vegetales, frutas, etc.), residuos de jardinería, algodón, cartón, madera, papel, trapo, etc.

### II.3.6) NATURALEZA DE LOS MATERIALES ORGANICOS.

Como ya se mencionó, la generación de biogas se efectúa mediante el proceso de descomposición y fermentación (proceso de degradación de ciertos compuestos orgánicos denominados azúcares, a otros más sencillos) de la materia orgánica, la cual está compuesta por glúcidos, lípidos, prótidos, etc.. Siendo los glúcidos los más importantes en la producción de biogas ya que dentro del grupo que los constituyen están los polisacáridos como los azúcares, los almidones y las celulosas, formados por largas cadenas de moléculas de glucosa.

Dichos polisacáridos producen mediante procesos fermentativos o catalíticos: gases ( $\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4$ ), ácido acético, etc., que figuran entre los componentes principales del biogas.

Por otro lado, los residuos orgánicos en donde predominan materiales proteínicos, no son buenos productores de metano, pero sí de algunos componentes del biogas ya que al ser descompuestos por microorganismos proteolíticos, generan aminoácidos como las aminas, el amoníaco y el ácido sulfhídrico, en proporciones muy bajas.

Los lípidos o grasas al ser descompuestos por microorganismos lipolíticos dan como resultado ácidos grasos como el glicerol.

Por lo tanto si en un sitio de disposición final se confinan residuos ricos en carbohidratos se puede esperar una buena producción de biogas.

### II.3.7) p.II. DE LOS LIQUIDOS EN EL RELLENO SANITARIOS.

Entre los factores ambientales que influyen en la reacción biológica de la degradación de la materia orgánica, se encuentra el pH., que es el potencial de hidrógeno para medir la acidez o alcalinidad de los líquidos encontrados en los residuos sólidos municipales; la cual es debida a los ácidos acéticos y grasos, producidos en la fase ácida ocurrida durante la degradación de la materia orgánica.

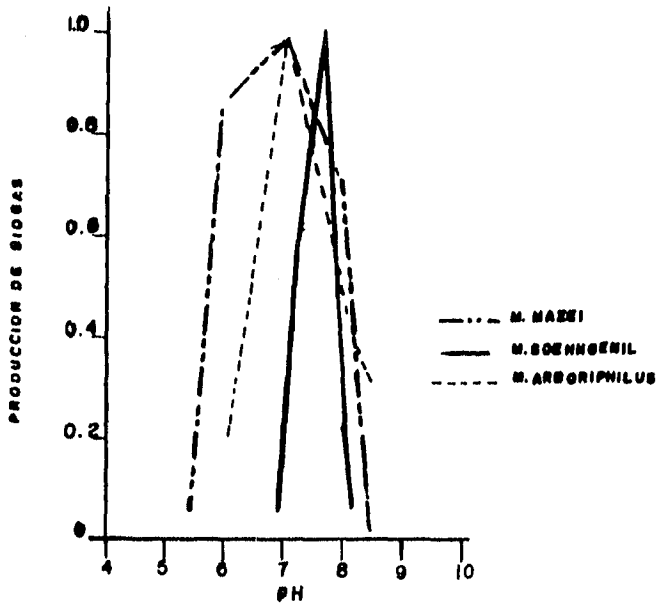
Se considera un rango de 6.7. a 7.5 <sup>16</sup> para que haya producción de biogas; si este equilibrio se pierde, la acidez predomina, las bacterias formadoras de metano se inhiben, es decir, cuando ocurre un decremento de pH aumenta la concentración de H<sup>+</sup> provocando la liberación de CO<sub>2</sub> en el gas, el cual debido a su capacidad de actuar como amortiguador, opone resistencia al cambio de pH; y si ocurre un incremento de este parámetro, se presenta el efecto contrario.

En algunos casos el pH bajo, puede corregirse con adiciones de sustancias alcalinas como agua con cal. El intervalo ideal debe ser entre 7 y 8. Véase gráfica II.3.

---

*(16) A. J. Crutcher, A. W. Van Norman, and G. T. Turchan Landfill Gas Collection and Utilization. The Canadian Geotechnical Society-Southern Ontario Section. "Solid Waste Management-Landfill Design: From Concept To Completion, March 9, 1983 p 10.*

ACIDEZ O ALCALINIDAD EN LA PRODUCCION DE BIOGAS



Georgeros Charles .Anaerobic Digestion Principles and Practice for Systems. p. 106.

GRAF. II. 3

Para tener un proceso de fermentación normal, la concentración de ácidos volátiles en base al ácido acético, debe ser inferior a 2000 ppm.; una concentración mayor inhibe notablemente la acción de microorganismos metanogénicos.

### **II.3.8) SUSTANCIAS QUE INHIBEN LA PRODUCCION DE BIOGAS.**

Existe un gran número de sustancias que pueden producir efectos tóxicos o inhibitorios en los sisemas de digestión anaerobios y aunque la magnitud de tales efectos depende de las sustancias, concentración de las mismas y tipos de microorganismos, el efecto cualitativo en todos los casos es el mismo.

A bajas concentraciones las sustancias adicionales producen efectos estimulantes a los microorganismos (aceleran su metabolismo) hasta llegar a un máximo, después del cual el efecto estimulante empieza a decrecer hasta inhibir o detener completamente la actividad biológica del sistema.

Entre los principales componentes que pueden tener efectos tóxicos en los organismos productores de metano, están: el amoníaco, los ácidos volátiles y los metales pesados. El amoníaco por lo general se forma rápidamente por la degradación de compuestos proteínicos.

El amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), es mucho más tóxico que el amonio, por lo que su nivel debe ser mantenido por debajo de los 1500 mg/l. El amonio ( $\text{NH}_4$ ) por el contrario, puede tolerarse en concentraciones de 1500 a 3000 mg/l.

Concentraciones elevadas de ácidos volátiles como el acético, propiónico y butírico pueden tener efectos tóxicos sobre las bacterias metanogénicas, aunque no se ha podido establecer con claridad si la toxicidad es atribuible directamente a los ácidos, o si la acidez es una manifestación de toxicidad.

Los metales pesados inhiben los grupos de sulfhídrico, particularmente en los casos que los metales se encuentran en forma soluble.

La presencia de sulfatos tiende a minimizar los efectos de los metales, ya que forman compuestos no tóxicos o precipitados insolubles con éstos.

Por otro lado, algunas investigaciones muestran que la toxicidad de ciertos materiales varía con la presencia de otras sustancias en el medio, provocando fenómenos antagónicos o sinérgicos. Como se muestra en las tablas II.3 y II.4.

**TABLA II.3**

**CONCENTRACION DE CATIONES QUE PRODUCEN EFECTOS ESTIMULANTES INHIBITORIOS Y TOXICOS EN LOS SISTEMAS DE DIGESTION ANAEROBIA "**

<b>CATION</b>	<b>EFFECTOS ESTIMULANTES mg/lts.</b>	<b>EFFECTOS INHIBITORIOS mg/lts.</b>	<b>NIVELES MUY TOXICOS mg/lts.</b>
Na	100-200	3500-5500	8000
k	200-400	2500-4500	12000
Ca	100-200	2500-4500	8000
Mg	75-150	1000-1500	3000

**TABLA II.4**

**EFFECTOS QUE CAUSA EL NITROGENO AMONICAL EN LOS PROCESOS ANAEROBIOS "**

<b>CONCENTRACION DE N-NH3 mg./lt</b>	<b>EFFECTOS</b>
50-200	BENEFICO
200-1000	NO PRODUCE EFECTOS ADVERSOS
1500-3000	INHIBICION DEL PROCESO A pH 8
3000	TOXICO

(17) Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, U.S.A.M 1973. "Procedimientos de Producción de Biogas y sus Usos" p. 39 y

38

(18) *Ibid* p. 41.

Por otro lado, los nitratos producen efectos sumamente tóxicos a los microorganismos formadores de metano. Se ha encontrado que basta con una concentración de 50 mg/l. de nitratos dentro del sistema para que inhiba completamente la producción de metano.

En la tabla II.5 se presentan las concentraciones máximas permisibles de otras sustancias

**TABLA II.5**  
**CONCENTRACIONES MAXIMAS PERMISIBLES**  
**DE OTRAS SUSTANCIAS "**

COMPONENTE	FORM.	CONCENTRACION
SULFATO	SO <sub>4</sub>	5000 ppm.
CLORURO DE SODIO	NaCl	40 000 ppm.
COBRE	Cu	100 mg/l.
CROMO	Cr	200 mg/l.
NIQUEL	Ni	200-500 mg/l.
CIANURO	CN	25 mg/l.

En los sitios de disposición final de residuos sólidos municipales estas sustancias pueden encontrarse en los desechos industriales, hospitalarios, etc., que muchas veces se confinan sin control.

#### **II.4) CARACTERIZACION DEL BIOGAS.**

Para la determinación cualitativa y cuantitativa del biogas en relación a sus características físicas y químicas así como la composición, propiedades y volumen generado; se pueden aplicar métodos que van de sencillos a complejos dependiendo de la operación de los equipos, tiempos de análisis y del costo.

(19) Facultad de Medicina Veterinaria y Zootécnica, U.N.A.M. 1973. "Procedimientos de Producción de Biogas y su Uso", p. 58

Algunos métodos para dichos análisis <sup>20</sup> son: los volumétricos, los de destilación fraccionada y los analíticos entre los que se encuentran los realizados mediante espectrometría y cromatografía. Siendo esta última la que generalmente se utiliza, por ser sumamente eficaz en la separación de mezclas y en la purificación. Ésta debe su nombre al hecho de que en donde se ha empleado primeramente ha sido en la separación de materias colorantes.

La técnica cromatográfica pone a contribución fenómenos diferentes y se pueden distinguir dos tipos de mecanismos cromatográficos: por adsorción y por partición.

La cromatografía por adsorción ha encontrado aplicación en los gases, ésta consiste en hacer pasar una solución de la sustancia a analizar, a través de una columna de un adsorbente o de adsorbentes convenientemente superpuestos, los cuales son sustancias pulverulentas variadas (alúmina, carbonato de calcio, cal, magnesia, carbón activado, sacarosa, almidón, resinas sintéticas, etc.); los constituyentes de la sustancia se separan por orden de adsorbabilidad decreciente en la columna y es lo que se llama "Desarrollo del Cromatograma".

Para el análisis del biogas se acude a la técnica de cromatografía y como resultado de la aplicación de ésta, se determinan más de diez componentes cuyas características físicas y químicas se presentan en seguida:

#### **II.4.1) COMPOSICION DEL BIOGAS**

La composición del biogas es variable, ya que depende entre otros aspectos, de las condiciones del sitio y de los residuos confinados como se ve más adelante; sin embargo, una composición general es la que se presenta en la tabla II.6.

---

(20) Apparatus and methods employed for volumetric gas analysis at the Institute of gas technology. H.H. Luke will an. C. Ahyaji. AGA proceedings 1951



TABLA II.6

COMPOSICION GENERAL DEL BIOGAS "

COMPONENTE	%
METANO (CH <sub>4</sub> )	45 A 65
BIOXIDO DE CARBONO (C <sub>2</sub> O)	30 A 60
ACIDO SULFHIDRICO (H <sub>2</sub> S)	0.01
NITROGENO (N)	3.7
OXIGENO (O)	1.5
ARGON (Ar)	1.5
HIDROCARBUROS AROMATICOS: ETANO (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ) PROPANO (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) MERCAPTANOS O TIOLES AMINAS	0.2

a) Metano (CH<sub>4</sub>):

Hidrocarburo gaseoso conocido como gas de los pantanos que arde con flama pálida; se desprende de las materias en putrefacci3n.

- a.1) Constituye entre el 45 al 65% del volumen total de biogas.
- a.2) Incoloro.
- a.3) Punto de fusi3n: -183 C (90.16K).
- a.4) Punto de ebullici3n: -162 C (111.16 K).
- a.5) Densidad: 0.554 g/l.
- a.6) Temperatura de Ignici3n: 540 C.
- a.7) Poder calorífico: 8,847 kcal/m<sup>3</sup>.
- a.8) Más ligero que el aire.
- a.9) Prácticamente insoluble en agua.

(21) A.J. Crutcher, A.W. and G.T. Turchan, Landfill Gas Collection and Utilization, Waterloo Ontario, March 9, 1988, p.2

- a.10) Altamente explosivo en concentraciones entre 5 y 15% por volumen de aire.
- a.11) Una chispa o destello de una fuente de calor que exceda los 593.3 °C, puede originar una explosión.
- a.12) Toxicología: Asfixiante cuando se encuentra en altas concentraciones.

**b) Bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>):**

- b.1) Constituye 30 a 60% del volumen total de biogas.
- b.2) Incoloro.
- b.3) Inodoro.
- b.4) Más pesado que el aire.
- b.5) Altamente soluble en agua (forma soluciones de ácidos débiles corrosivos).  
Es decir el bióxido de carbono en solución con el agua subterránea produce condiciones ácidas que propician la disolución de los metales pesados contaminando los mantos freáticos.
- b.6) No flamable.  
El CO<sub>2</sub> se obtiene industrialmente como subproducto de la fermentación de granos y de la fabricación de cal a partir de la piedra caliza. En el laboratorio, se produce al ser reaccionar un carbonato con un ácido.
- b.7) Toxicología: Potencialmente peligroso (una concentración de 10% de CO<sub>2</sub> en una atmósfera pura de oxígeno, puede causar un envenenamiento involuntario).

**c) Nitrógeno (N):**

Constituye un porcentaje bajo del volumen de biogas.

- c.1) Es un componente de la masa del aire en aproximadamente 75.5%.
- c.2) Incoloro e inodoro.
- c.3) Densidad respecto al aire: 0.967 g/l.
- c.4) El nitrógeno carece de actividad química a las temperaturas ordinarias, pero las temperaturas elevadas lo disocian en nitrógeno monoatómico, originando reacciones muy importantes.  
Es un componente esencial de las células animales y vegetales.

**d) Acido Sulhídrico (H<sub>2</sub>S):**

- d.1) Incoloro.
- d.2) Olor: Penetrante, desagradable, similar al huevo podrido.
- d.3) Más pesado que el aire.
- d.4) Moderadamente soluble al agua.
- d.5) Peso molecular: 34.08
- d.6) Punto de ebullición: 59.6 a 60.4 °C
- d.7) Explosividad: 4 a 44%
- d.8) Es combustible.
- d.9) Toxicología: Es venenoso, provoca elevado índice de irritación en los ojos y asfixia para quien lo inhala constantemente. En el sistema nervioso provoca vértigo bronquitis y bronconeumonía.

**e) Oxígeno: trazas (1.5%).**

- e.1) Incoloro e inoloro.
- e.2) Constituye el 21% del volumen del aire y el 88% de la masa del agua.
- e.3) Es un buen comburente.
- e.4) Importancia: Es un elemento vital para los organismos aerobios, uno de los compuestos más importantes que forma el oxígeno es el agua, indispensable para la vida y necesario para la combustión.

**f) Argón: trazas (1.5%).**

Pertenece al grupo de los gases nobles o inertes por su inactividad química.

- f.1) Constituye 0.93% del aire seco.
- f.2) Punto de ebullición: 186 °C.

**g) Etano, Propano y otros productos de digestión anaerobia de la materia orgánica.-  
trazas.**

Son los compuestos orgánicos más sencillos ya que constan sólo de carbono e hidrógeno, pertenecientes al grupo de los hidrocarburos alcanos.

- g.1) Etano  $C_2H_6$
- g.1.1) Incoloro.
- g.1.2) Punto de ebullición:  $-88.6\text{ }^\circ\text{C}$ .
- g.1.3) Punto de fusión:  $-172\text{ }^\circ\text{C}$  ( $101\text{ }^\circ\text{K}$ )
- g.1.4) Densidad:  $0.55\text{ g/l}$ .
- g.1.5) Calor de combustión:  $368\text{ Cal/Mol}$ .
- g.1.6) Insoluble en el agua.

**h) Propano  $C_3H_8$ : Hidrocarburo saturado utilizado como combustible.**

- h.1) Inoloro.
- h.2) Punto de ebullición:  $-42.0\text{ }^\circ\text{C}$  ( $231\text{ }^\circ\text{K}$ ).
- h.3) Punto de fusión:  $-187\text{ }^\circ\text{C}$  ( $86\text{ }^\circ\text{K}$ ).
- h.4) Densidad:  $0.58\text{ g/l}$ .
- h.5) Calor de combustión:  $526\text{ Cal/Mol}$ .
- h.6) Insoluble en el agua.

**i) Mercaptanos o Tioles:**

- i.1) Olor: Desagradable.
- i.2) Poco solubles en el agua.
- i.3) Toxicología: Altas concentraciones pueden causar náuseas, cefalea, inconsciencia, y baja temperatura en las extremidades.

**j) Aminas:**

- j.1) Líquidas o sólidas.
- j.2) Olor muy desagradable.
- j.3) Poco solubles al agua.
- j.4) Punto de fusión varía de  $-39$  a  $-124\text{ }^\circ\text{C}$  ( $234$  a  $149\text{ }^\circ\text{K}$ ), según el tipo de aminas.

j.5) Punto de ebullición: de  $-6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $266.5\text{ }^{\circ}\text{K}$ ) a  $104\text{ }^{\circ}\text{C}$ , según el tipo de aminas.

j.6) Toxicología: Generalmente algunas aminas son tóxicas a altas concentraciones, pueden irritar la piel humana. Su principal efecto es el intenso y ofensivo olor.

Existen también una cantidad muy grande de compuestos orgánicos no metánicos en el biogas, entre los que figuran el benceno, tetracloruro de carbono, cloroformo, dicloruro de etileno, cloruro de metileno, percloroetileno, tricloroetileno, cloruro de vinilo, cloruro de vinilideno, etc., identificados como peligrosos, en general se consideran como cancerígenos.

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la importancia de dicho biogas depende de sus propiedades, las cuales se presentan a continuación.

#### II.4.2) PROPIEDADES DEL BIOGAS.

- a) Es un gas combustible.
- b) No es soluble en agua, cuando en él predominan los alcanos.
- c) Arde con flama limpia y ligeramente azulosa.
- d) Temperatura: 50 °C aproximadamente. <sup>22</sup>.
- e) Temperatura crítica: -82 °C (191 °K).
- f) Olor: desagradable y ofensivo.
- g) Presión crítica: 42 atmósferas.
- h) Poder calorífico: 4,700 a 6,000 Kcal/m<sup>3</sup>.
- i) Factor de rapidez de flama: 11.1 (es bajo y por lo tanto hay que considerar que su flama pueda apagarse con facilidad en quemadores que no han sido correctamente diseñados).
- j) Inflamabilidad en el aire: Mezclas de 6 a 25% de biogas mezclado con aire son inflamables.
- k) Explosividad: De acuerdo a análisis de laboratorio, cuando el gas metano alcanza una concentración entre el 5 y 15%, es explosivo (debido a que el oxígeno, componente del aire en un 21% y buen carburante, al mezclarse con el metano del biogas, forma mezclas explosivas), siendo común que se presenten incendios y explosiones de alto riesgo, principalmente cuando no se cuenta con un sistema efectivo para el control. Puede causar explosiones al tener como principal componente al metano.
- l) Densidad: La densidad es también factor importante en la seguridad; sabiendo que la densidad del aire es de 1.293 g/l. y considerando que con un contenido de 35% de CO<sub>2</sub>, la densidad del biogas llega a 1.09 g/l., éste es en general más ligero que el aire y puede diluirse en él fácilmente. Sin embargo, si la proporción de CO<sub>2</sub> rebasa el 46%, el biogas se toma más denso que el aire, incrementando su límite de peligrosidad.
- m) Peso Específico: 0.86
- n) Volumen: El volumen o flujo total se puede determinar por medición de la velocidad de flujo.

En la tabla II.7, se muestran los valores típicos de la contribución porcentual de los gases generados en un sitio de disposición final de desechos sólidos, según el grado de avance del proceso de fermentación anaerobia.

---

<sup>(22)</sup> Temperatura obtenida en los pozos de biogas de San Lorenzo Tezucno, por laboratorios ABC, México D.F

TABLA II.7

VALORES TÍPICOS DE LOS COMPONENTES DE BIOGAS

COMPONENTE	REF. 1 %	REF. 2 %	REF. 3 %
METANO	47.4	40 - 70	57.66
BIOXIDO DE CARBONO	47.0	30 - 50	31.23
ACIDO SULFHIDRICO	N.D.	N.D.	5.8
NITROGENO	3.7	TRAZAS	7.62
OXIGENO	0.8	TRAZAS	3.49
ARGON	N.D.	N.D.	N.D.
HIDROGENO	0.1	N.D.	N.D.
MONOXIDO DE CARBONO	0.1	TRAZAS	N.D.
SULFURO DE H.	0.01	N.D.	N.D.
HIDROCARBUROS PARAFINICOS	0.1	N.D.	N.D.
HIDROCARBUROS AROMATICOS	0.2	>0.5	N.D.
TRAZAS DE OTROS COMPONENTES	0.5	N.D.	N.D.

1.- LANDFILL GAS MOVEMENT, CONTROL AND USOS.

2.- LANDFILL, GAS COLLETION AND UTILIZATION.

A.J. CRUTCHER, A.W. WATERLOO, ONTARIO.

3.- RESUMEN EJECUTIVO RELATIVO A LA VIABILIDAD TECNICA PARA EL APROVECHAMIENTO DE BIOGAS. EXTIRADERO DE SANTA FE MEXICO, D.F.

En la tabla II.8, se presentan algunas propiedades físicas y químicas de los principales componentes del biogas.

TABLA II.8

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS COMPONENTES DEL BIOGAS <sup>13</sup>

PROPIEDAD	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub>
% EN VOLUMEN	54-70	27-45	< 1/10	< 1/10
VALOR ENERGÉTICO kcal/lts.	9.0			1-10
RANGO EXPLOSIVO (%EN VOLUMEN CON AIRE)	5-15		4-46	2.9
DENSIDAD g./lts.	0.72	1.98	1.54	6-71
GRAVEDAD	0.55	1.55	1.2	0.07
OLOR	INODORO	INODORO	HUEVO PODRIDO	INODORO
TEMPERATURA °C		31.10	100.4	
PRESION (ATM.)	45.8	73.0	88.9	12.8

II.4.3) EFECTOS EN LA SALUD.

Por sus componentes la producción de biogas en los sitios de disposición final clausurados y en operación representa riesgos potenciales para la salud, pues analizando cada uno de ellos se observa que dicho biogas provoca en el ser humano los siguientes efectos:

<sup>133</sup> Dirección Técnica de Desechos Sólidos D.D.F. "Resumen Ejecutivo Relativo a la Viabilidad para el Aprovechamiento del Biogas en Sitios de Disposición Final de Residuos Sólidos", p. 72



a) El aire puro es un fluido compuesto de 78.08% de nitrógeno, 20.95% de oxígeno, 0.93% de argón, 0.0001% de criptón, además de contener algunas impurezas como, 0.03% de bióxido de carbono, 0.01% de nitrógeno y una proporción variable de vapor de agua.

Por ello, cuando la acumulación del biogas disminuye el oxígeno del aire al 17.3% y se inhala de manera constante provoca cefaleas, náuseas, irritaciones en la piel y ojos, dolores musculares, vértigo, bronquitis y bronconeumonía.

b) Positivamente sofocante si el oxígeno baja hasta 13%, ello porque el bióxido de carbono que es más pesado que el aire lo desplaza.

c) Si en la composición del biogas el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) rebasa el 46%, el biogas es más denso que el aire, aumentando su límite de peligrosidad.

d) En el biogas se ha detectado que existen a nivel traza una gran gama de compuestos orgánicos tóxicos, asociados a efectos carcinogénicos cuando se está constantemente expuesto a éste.

Además los componentes del biogas contribuyen al incremento de los siguientes problemas:

e) Al deterioro de la capa de ozono que cubre a la tierra, debido a que los compuestos orgánicos no metanogénicos reaccionan con los rayos ultravioleta del sol.

f) Al efecto de invernadero, que consiste en el incremento de la temperatura de la tierra.

g) A la lluvia ácida, propiciada por la presencia de ácido sulfhídrico.

Por estas razones, las precauciones que se deben tomar en el manejo del biogas son similares a las que se utilizan con cualquier gas combustible, es decir:

a) Impermeabilizar totalmente (piso, paredes y superficie) el sitio en donde se efectúe el confinamiento de los residuos sólidos, evitando migraciones hacia sitios no controlados.

b) Si el biogas se va a utilizar, se debe cuidar que los tanques y líneas de transporte de éste, deban estar libres de oxígeno, pues es un buen carburante que al unirse con el biogas forma mezclas explosivas.

- c) Realizar pruebas de hermeticidad<sup>24</sup> para detectar fugas.
- d) Cuidar que no haya flamas, brazas, cigarrillos encendidos cerca de los sistemas de extracción.
- e) Los extinguidores deben ser de CO<sub>2</sub> y polvo ABC.

---

<sup>24</sup> Becerril L. Diego Onésimo, *Manual del Instalador de Gas L.P. 4a. Edición*, pp. 162-165.

## **II.5) COMPORTAMIENTO DEL BIOGAS EN LOS SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS.**

Una vez que se lleva a cabo el sellado de los residuos sólidos, se acelera el proceso de estabilización de la materia orgánica contenida en éstos, produciéndose el biogas, el cual se mueve hacia las zonas que ofrecen menor resistencia.

Dicho movimiento es gobernado por dos fuerzas impulsoras: la de convección y la de difusión.

### ***a) Convección:***

Es debida a los gradientes de presión del biogas, éste se mueve de zonas de alta presión hacia zonas de baja presión.

### ***b) Difusión:***

Es el fenómeno físico que causa que el biogas busque una concentración uniforme en todo el volumen dentro del relleno, el movimiento se presenta desde las áreas de alta concentración hasta las de menor concentración.

Ambas fuerzas normalmente se presentan simultáneamente en los sitios de disposición final; sin embargo cuando el gas alcanza una presión por encima de 15 cm. de columna de agua, prevalece la convección y en el caso contrario predomina la difusión.

El movimiento del biogas presenta un comportamiento inestable y es importante conocer los factores que afectan su desplazamiento ya que son parámetros de medición para la ubicación de los sistemas de control, es decir los pozos de extracción y monitoreo en los sitios de disposición final de residuos sólidos.

Dichos factores son: La permeabilidad del suelo, el nivel de aguas freáticas, el material de cobertura, el clima, los conductos naturales y los artificiales.

### II.5.1) PERMEABILIDAD DEL SUELO.

La permeabilidad de un suelo es la velocidad con la que fluye el agua a través de éste, cuando se somete a un gradiente hidráulico. Figura II.a.

La permeabilidad de los suelos es uno de los valores que admiten mayores variaciones, según el tipo de material de que se trate, varía entre límites tan amplios como 10 o 100 cm./seg. en gravas limpias, hasta  $10^{-8}$  ó  $10^{-9}$  cm./seg. en arcillas homogéneas montmoriloníticas o bentoníticas.

La permeabilidad típica en arenas limpias puede ser del orden de  $10^{-2}$  -  $10^{-3}$  cm./seg. en arenas muy finas; los limos pueden tener permeabilidades tan bajas como  $10^{-5}$  -  $10^{-6}$  cm./seg. En general las arcillas tienen permeabilidades menores que  $10^{-5}$  cm./seg. Con permeabilidades menores que  $10^{-3}$ , un suelo tiende a ser impermeable; considerándose prácticamente impermeable; cuando es menor a  $10^{-7}$  cm./seg.

La permeabilidad de los suelos está influida por las siguientes características de los mismos:

La relación de vacíos entre las partículas o granos del suelo de un material, el tamaño de sus partículas referida a la granulometría del material <sup>25</sup>, la estructura de las partículas de los suelos respecto a su forma (panaloide, cilíndrica, floculada, dispersa, etc. en suelos muy finos cuando la estructura es dispersa la permeabilidad es mayor), el grado de saturación y la existencia de fisuras son también características que influyen en la permeabilidad de los suelos.

De acuerdo a lo anterior, si el suelo del sitio en donde se encuentran confinados los residuos sólidos tiene una permeabilidad mayor que  $10^{-3}$  cm./seg., el flujo del biogás migra con facilidad en sentido horizontal hacia zonas no controladas, alcanzando una distancia en sentido horizontal de aproximadamente 120 a 300 m.

---

(25) Alfonso Rico y Hermito del Castillo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres. procedimiento auxiliar para identificación de suelos en el laboratorio S.U.C.S. (versión S.O.P.)*, p. 94

PERMEABILIDAD DEL MATERIAL DE  
COBERTURA DE DESECHOS SOLIDOS

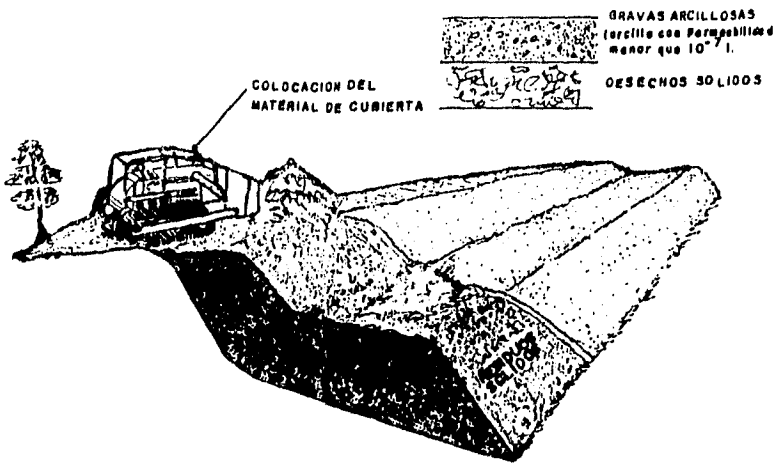


FIG. 11.0

Si la permeabilidad del suelo es menor que  $10^{-3}$  cm./seg., disminuye dicha migración.

### **II.5.2) NIVEL DE AGUAS FREATICAS.**

El manto freático encontrado en el subsuelo de los sitios en donde se genera el biogas, puede ser una barrera que impida su emigración. Como se ilustra en la figura II.b.

Lo anterior depende de los componentes propios del biogas. Es decir, si en él predominan los alcanos (metano, etano, propano, etc.), los cuales tienen la propiedad física de ser insolubles en agua, entonces el biogas adquiere dicha propiedad, por lo que el manto freático funciona como un obstáculo al paso del biogas.

Sin embargo, si en el biogas predominan sustancias solubles en el agua, como el bióxido de carbono, el ácido sulfhídrico, vapor de agua, aminas, etc., entonces el biogas emigra a través del manto freático.

Por otro lado, puesto que los alcanos son miscibles en solventes orgánicos, entonces son susceptibles a ser disueltos en los lixiviados llegando a contaminar las aguas subterráneas, permitiendo la emigración del biogas.

### **II.5.3) MATERIAL DE COBERTURA.**

La migración vertical de biogas hacia la superficie, depende principalmente del tipo de material utilizado para la cobertura de los residuos confinados, así como del espesor de la capa y el porcentaje de compactación.

La selección de dicho material se efectúa principalmente, de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), para posteriormente determinar su eficacia como material de cubierta, en la tabla II.9, se muestran las características y propiedades más importantes de cada uno de los grupos en que se subdividen los suelos, dichas propiedades son: la permeabilidad, compresibilidad, compactación y saturación.

Las funciones que debe tener el material de cubierta son básicamente las siguientes:

a) Controlar el escurrimiento pluvial, lo cual implica minimizar la infiltración y saturación de los residuos sólidos así como la disminución de la erosión.

- b) Controlar el flujo de biogas, dirigiéndolo hacia los pozos de captación.
- c) Soportar la cubierta vegetal.
- d) Minimizar la proliferación de fauna nociva.
- e) Facilitar la transitibilidad y acceso de los vehículos sobre éste.

De esta manera se puede mencionar que los mejores suelos para ser utilizados como material de cobertura son en orden decreciente: las gravas arcillosas o mezclas mal graduadas de gravas, arenas y arcilla (GC), arenas arcillosas o mezclas de arena y arcilla (SC), las gravas limosas o mezclas de grava arena y limo (GM).

Respecto al espesor de la capa del material de cubierta final, por lo general se recomiendan espesores entre 0.40 y 0.60 m.; depende de los requerimientos de la superficie, según el uso final que se le va a dar al sitio.

La compactación recomendada es de 90% de la prueba Proctor con la adición de humedad; dicha compactación se obtiene mediante el bandeo con el tractor angledozer, con un mínimo de tres pasadas y posteriormente la aplicación de carga estática con el rodillo liso en un mínimo de cuatro pasadas.

**TABLA II.9**  
**PROPIEDADES IMPORTANTES DE LOS SUELOS PARA LA COBERTURA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS<sup>28</sup>**

TIPO DE SUELO	SÍMBOLO	PERMEABILIDAD	COMPRESIBILIDAD COMPACTACION Y SATURACION	TRANSIBILIDAD	IMPEDIMENTO DE BIOGAS	RESISTENCIA AL EROSION POR LLUVIA	RESISTENCIA AL EROSION POR VIENTO	IMPEDIMENTO Y REPRODUCCION DE FAUNA	RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO	EFICIENCIA COMO MATERIAL DE CUBIERTA
Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena pocos o ningunos finos	G W	MALA	MUY BAJA	EXCELENTE	PESIMO	EXCELENTE	EXCELENTE	PESIMO	EXCELENTE	MALA
Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena pocos o ningunos finos.	G P	PESIMA	MUY BAJA	EXCELENTE	MALO	EXCELENTE	EXCELENTE	PESIMO	EXCELENTE	MALA
Gravas limosas mezclas mal graduadas de grava, arena y limos.	G M	REGULAR	MUY BAJA	MUY BUENA	REGULAR	MUY BUENA	MUY BUENA	MALO	MUY BUENA	BUENA
Gravas arcillosas mezclas mal graduadas de grava, arena y arcilla	G C	BUENA	MUY BAJA	BUENA	BUENO	MUY BUENA	BUENA	REGULAR	BUENA	EXCELENTE
Arenas bien graduadas, arenas gravosas, pocos o ningunos finos.	S W	MALA	MUY BAJA	EXCELENTE	MALO	EXCELENTE	EXCELENTE	PESIMO	EXCELENTE	REGULAR
Arenas mal graduadas, arenas gravosas, pocos o ningunos finos.	S P	PESIMA	MUY BAJA	EXCELENTE	REGULAR	EXCELENTE	EXCELENTE	PESIMO	EXCELENTE	REGULAR
Arenas limosas, mezclas de arenas y limo mal graduadas.	S M	REGULAR	BAJA	MUY BUENA	REGULAR	BUENA	MUY BUENA	MALO	EXCELENTE	REGULAR
Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla, mal graduadas.	S C	BUENA	BAJA	BUENA	BUENO	REGULAR	BUENA	BUENO	BUENA	MUY BUENA

<sup>(28)</sup> Secretaría de Ecología. Estudio referente a la elección del sitio de disposición final de Atzacán de Zaragoza. Estado de México contrato SE-93-027-01-D



#### II.5.4) CLIMA.

Las condiciones climatológicas (viento, temperatura y lluvia) son de gran importancia debido a que su variación repercute en la generación del biogas. Como se ve en la figura II.c.

Por ejemplo:

- Un terreno congelado restringe el movimiento del biogas a través del material de cubierta, debido a que el hielo disminuye los vacíos que hay entre las partículas del suelo.
- Durante la temporada de lluvias el agua que se filtra en el relleno, estimula la producción del biogas, lo cual puede deberse a que los residuos orgánicos alcanzan la humedad óptima para que las bacterias generadoras del biogas se reproduzcan con mayor rapidez.
- Cuando la temperatura ambiente del aire es alta, el incremento de la migración del biogas es mayor, esto debido a que el gas se torna más ligero que el aire al tener temperaturas más altas, facilitando su desplazamiento hacia la atmósfera.
- La acción que ejerce el viento sobre el biogas esparcido en la atmósfera, es de gran importancia ya que es el vehículo por el cual se dispersa hacia las zonas aledañas.

#### II.5.5) CONDUCTOS NATURALES.

Cuando el tipo de suelo del terreno en donde se desplanta un sitio de disposición final está compuesto por materiales como arenas, gravas, espumas volcánicas u otros materiales permeables, el movimiento del biogas hacia la periferia es mayor; así también las fisuras y espacios vacíos causados por los asentamientos diferenciales de los estratos de desechos sólidos al biodegradarse, forman conductos para la migración del biogas en sentido horizontal y vertical. Como se observa en la figura II.d.

#### II.5.6) CONDUCTOS ARTIFICIALES.

Cuando el biogas migra hacia la periferia en sentido horizontal, es posible que sea captado por líneas de infraestructura subterránea construídas por el hombre como las alcantarillas,

FIG. II.b NIVEL DE AGUAS FREATICAS

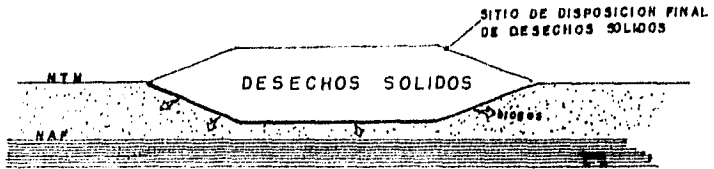


FIG. II.c CLIMA

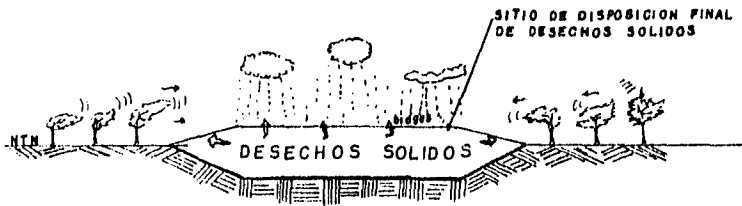


FIG. II.d CONDUCTOS NATURALES

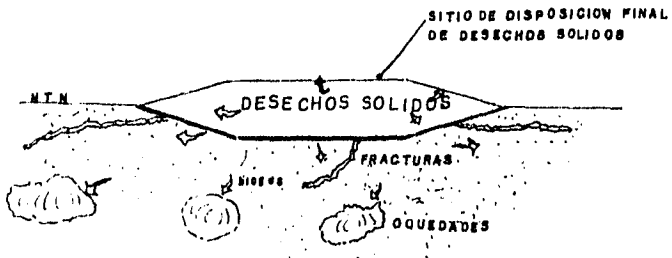
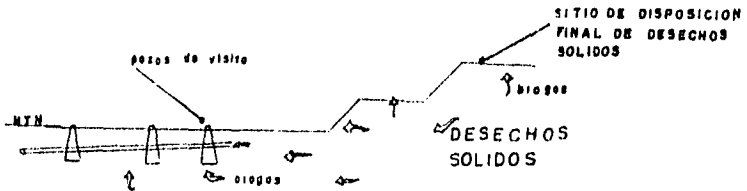


FIG. II.e CONDUCTOS ARTIFICIALES



albañales, tuberías de agua potable y pozos de agua, principalmente; convirtiendo éstas en fuentes de explosión de alto riesgo a la población. Como se puede ver en la figura II.e.

De los aspectos referentes a la generación caracterización y comportamiento del biogas en los sitios de disposición final de desechos sólidos municipales; se concluye que los componentes principales de dicho biogas, son el metano y el bióxido de carbono, además en bajas concentraciones se tienen nitrógeno, ácido sulfhídrico y otros componentes a nivel traza que son importantes por sus efectos sobre la salud humana.

Respecto a las propiedades, cabe mencionar que el biogas es un combustible con ciertas desventajas (bajo poder calorífico, etc.) en comparación con otros recursos energéticos; sin embargo no deja de ser una posibilidad para ser utilizado como tal.

Dichas propiedades también determinan el grado de peligrosidad que representa, siendo agresivo cuando se inhala continuamente o siniestro cuando se concentra en lugares cerrados.

En lo que se refiere a su comportamiento dentro del sitio en donde es generado, se observa que existe una emigración tanto vertical como horizontal que depende de las condiciones de presión y temperatura así como de las condiciones de permeabilidad del material de cobertura final de los residuos sólidos y de la geología local.

La emigración en sentido vertical no es tan grave comparada con la que se presenta en sentido horizontal, pues de esta forma el biogas llega hacia las poblaciones circunvecinas, exponiéndolas a sus efectos.

Teniendo en cuenta los aspectos generales del biogas, es importante mencionar que una manera de controlar el biogas es conociendo la producción que se espera en un sitio determinado, y con ello contar con los datos que permitan cuantificar los sistemas requeridos para su control o aprovechamiento.

En el capítulo III, se presentan algunos métodos para conocer dicha producción.

# CAPITULO III

## METODOS DE EVALUACION DE LA PRODUCCION POTENCIAL DE BIOGAS EN SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES

La cuantificación del volumen real del biogas generado en los sitios de disposición final de desechos sólidos municipales, resulta difícil de medir, ya que la producción es inestable debido a las variables que intervienen para que éste se origine, como pueden ser: la composición física y química de los desechos sólidos confinados y las condiciones físicas del sitio de disposición final (clima, humedad de la materia orgánica, pH, material de cobertura, etc.).

En la actualidad la estimación del biogas se basa en la cuantificación del metano, que como ya se mencionó en el capítulo anterior, ocupa aproximadamente el 50% del volumen total del biogas; aceptándose que el otro 50% es bióxido de carbono, ácido sulfhídrico y demás compuestos producidos por la descomposición de la materia orgánica.

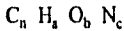
A continuación se presentan algunos métodos para el cálculo del metano, entre ellos: el estequiométrico que depende de la composición química de la materia orgánica contenida en los desechos sólidos confinados, bajo condiciones anaerobias óptimas, y los métodos cinéticos que se basan en la velocidad de degradación de cada categoría de desechos orgánicos (lenta, moderada y rápidamente degradables).

### III.1) CALCULO DEL METANO.

#### III.1.1) METODO EMPIRICO ESTEQUIOMETRICO CONSIDERANDO LA COMPOSICION QUIMICA DE LA MATERIA ORGANICA.

Al emplear este método se necesita conocer la composición química de la materia orgánica contenida en los desechos sólidos confinados en un sitio de disposición final.

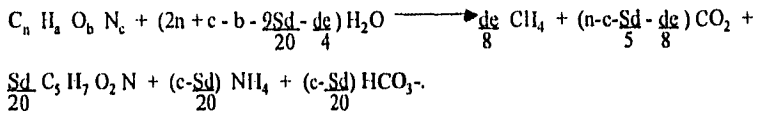
Estos desechos pueden representarse mediante la fórmula mínima:



Donde los coeficientes n, a, b, c dependen de la composición química de la materia orgánica contenida.

Dichos desechos orgánicos permanecen en la celda hasta que ocurre la siguiente reacción en condiciones anaerobias.

Fórmula III.2 <sup>27</sup>



Donde:

C= Carbono.

H= Hidrógeno.

O= Oxígeno.

N= Nitrógeno.

n, a, b, c= Coeficientes estequiométricos.

$$S = a_c \frac{1 \times 0.2 f_{oc}}{1 \times f_{oc}}$$

(27) Gunnerson Charles G. Biogas Países en Desarrollo, p. 57.

Donde:

S= Fracción de la DQO de residuo sintetizado o convertido a materia celular.

f= Tasa de decaimiento de la célula (días).

$\theta_c$ = Tiempo de retención de los sólidos (días).

$a_c$ = S max. cuando  $\theta_c = 0$ .

$$d = 4n + a - 2b - 3c$$

$$e = 1 - S$$

Donde:

e= Fracción de la DQO del residuo que se convierte en gas metano.

**Procedimiento:**

a) Conociendo el porcentaje en peso húmedo (el cual se obtiene en laboratorio) de la composición química de los desechos sólidos, se calculan los coeficientes estequiométricos (n, a, b, c) de cada componente de la formulación.

**Composición química de los residuos**

				Coef. Est.
C	X1	$\frac{X1}{\sum X} = Y1$	$\frac{Y1}{12} = Z1$	$\frac{Z1}{z \text{ (menor)}} = n$
H	X2	$\frac{X2}{\sum X} = Y2$	$\frac{Y2}{1} = Z2$	$\frac{Z2}{z \text{ (menor)}} = a$
O	X3	$\frac{X3}{\sum X} = Y3$	$\frac{Y3}{16} = Z3$	$\frac{Z3}{z \text{ (menor)}} = b$
N	X4	$\frac{X4}{\sum X} = Y4$	$\frac{Y4}{14} = Z4$	$\frac{Z4}{z \text{ (menor)}} = c$
	$\sum x$	100.0	$\sum z$	

12 = Peso Atómico del Carbono

1 = Peso Atómico del Hidrógeno.

16 = Peso Atómico del Oxígeno.

14 = Peso Atómico del Nitrógeno.

b) Se efectúa el cálculo de la fracción de sustrato  $S$  que se convierte en material celular.

Para ello se suponen los siguientes valores de la actividad biológica dentro del relleno  $a_c = 0.2$

$f = 0.02$  cuando el  $\theta_c$  tienda a infinito, obtenemos  $S = 0.04$ .

c) Utilizando este valor para propósito de cálculo, se tiene:

$$e = 1 - 0.04 = 0.96.$$

d) Sustituyendo en la fórmula III.2 dichos valores, se obtiene el número de moles de cada componente.

e) Para cuantificar ya sea en peso o volumen, se efectúan las relaciones estequiométricas de la formulación química, multiplicando el peso molecular por el número de moles de cada componente.

Donde el peso molecular:

$$P_m = P_1 (n) + P_2 (a) + P_3 (b) + P_4 (c)$$

$P_1$  = Peso Atómico del Carbono.

$P_2$  = Peso Atómico del Hidrógeno.

$P_3$  = Peso Atómico del Oxígeno.

$P_4$  = Peso Atómico del Nitrógeno.

f) Conociendo así el volumen de  $CH_4$ ,  $CO_2$ , material celular,  $NH_4^+$  y  $HCO_3^-$ , generados por peso unitario de residuo compuesto en base húmeda.

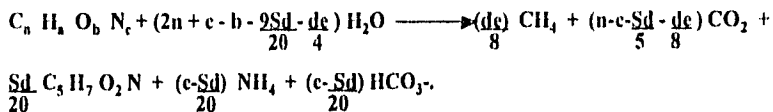
Donde 1 Kg. - mol. de cualquier gas ocupa 22.4 lts. a presión y temperatura normal<sup>28</sup>

Ejemplo:

Utilizando la fórmula empírica de la producción de metano:

---

(28) Gregory R Choppin, Bernard Jaffe, Lee Summerlin y Lynn Jackson. Química, México. D.F., p. 68 y 69.



Cuantificando el número de moles de cada uno de los componentes generados en la reacción, de la siguiente manera:

a) Conociendo el porcentaje en peso húmedo de la composición química de los desechos sólidos, se calculan los coeficientes estequiométricos:

**TABLA III.1**

**Composición química de los residuos <sup>29</sup>**

	% Peso Húmedo (conocido)	Normalizado %	Relaciones Mól.	Coef. Est.
C	28.00	51.60	4.3	99
H	3.50	6.50	6.5	149
O	22.40	41.30	2.58	59
N	0.33	0.60	0.0436	1
	54.23	100.0		

Es decir:

% Peso normalizado:

$$C = \left( \frac{28}{54.23} \right) \times 100 = 51.6$$

$$H = \left( \frac{3.5}{54.23} \right) \times 100 = 6.5$$

(29) Rafael Garibay Orozco. "Aprovechamiento de l Biogas Generado en el Extradero de San Lorenzo Tezonco". p. 93



$$O = \left( \frac{22.4}{54.23} \right) \times 100 = 41.3$$

$$N = \left( \frac{0.33}{54.23} \right) \times 100 = 0.6$$

Relaciones Molares:

$$\frac{(51.6)}{12} = 4.3$$

$$\frac{(6.5)}{1} = 6.5$$

$$\frac{(41.3)}{16} = 2.58$$

$$\frac{(0.6)}{14} = 0.0436$$

Coefficientes estequiométricos:

$$\frac{(4.3)}{0.043} = 99$$

$$\frac{(6.5)}{0.043} = 149$$

$$\frac{(2.58)}{0.043} = 159$$

$$\frac{(0.043)}{0.043} = 1$$

Por lo tanto los coeficientes estequiométricos son:

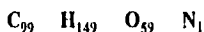
$$n = 99$$

$$a = 149$$

$$b = 59$$

$$c = 1$$

En base a los cálculos anteriores la fórmula empírica de los residuos es:



b) Se calcula la fracción de sustrato que se convierte en material celular la cual es:

$$S = a_e \frac{0.2 f_{\text{œc}}}{f_{\text{œc}}} = 0.2 \frac{(0.2 \times 0.02)}{0.02} = 0.04$$

Suponiendo los siguientes valores para la actividad biológica dentro del relleno  $a_e = 0.2$ ,  $f = 0.02$  y tomando un tiempo infinito para  $\text{œc}$  obtenemos que  $S = 0.04$ .

c) Utilizando el valor de S para propósitos de cálculo, se tiene:

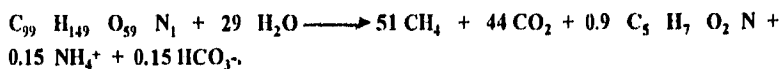
$$e = 1 - s$$

$e$  = fracción de la DQO del residuo que se convierte en gas metano.

$$\text{Entonces: } e = 0.96$$

$$d) \text{ Siendo } d = 4n + a - 2b - 3c = 4(99) + 149 - 2(59) - 3(1) = 424$$

e) Sustituyendo valores en la fórmula III.2, se tienen los siguientes resultados:



Es decir:

1 mol de materia orgánica + 29 moles de agua, confinados en un relleno sanitario en condiciones anaerobias, son transformados a 51 moles de metano + 44 moles de bióxido de carbono + 0.9 moles de materia celular + 0.15 moles de amonio + 0.15 moles de carbonato monohidrógeno o bicarbonato.

f) Transformando estos resultados a unidades de peso.

No. de moles x Peso molecular P<sub>m</sub>

Donde:

Peso molecular P<sub>m</sub> = P<sub>1</sub> (n) + P<sub>2</sub> (a) + P<sub>3</sub> (b) + P<sub>4</sub> (c).

P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub> son los pesos atómicos de cada elemento.

n, a, b, c son los coeficientes estequiométricos de cada compuesto.

Se tiene que para:

**C<sub>99</sub> H<sub>149</sub> O<sub>59</sub> N<sub>1</sub>**

P<sub>m</sub> = 12 (99) g/mol + 1(149) g/mol + 16 (59) g/mol + 14(1) g/mol = 2,295

No. moles x P<sub>m</sub> = 1 mol x 2,295 g/mol = 2,295 g.

**29 H<sub>2</sub>O**

P<sub>m</sub> = 1(2) g/mol + 16(1) g/mol = 18 g/mol

No. moles x P<sub>m</sub> = 29 mol x 18 g/mol = 522g.

**51 CH<sub>4</sub>**

P<sub>m</sub> = 12 (1) g/mol + 1(4) g/mol = 16 g/mol

No. moles x P<sub>m</sub> = 51 mol x 16 g/mol = 816g.

**44 CO<sub>2</sub>**

P<sub>m</sub> = 12 (1) g/mol + 16(2) g/mol = 44 g/mol

No. moles x P<sub>m</sub> = 44 mol x 44 g/mol = 1,936g.

**0.9 C<sub>5</sub> H<sub>7</sub> O<sub>2</sub> N (Materia Celular)**

P<sub>m</sub> = 12 (5) g/mol + 1(7) g/mol + 16 (2) g/mol + 14(1) g/mol = 113 g/mol

$$\text{No. moles} \times \text{Pm} = 0.9 \text{ mol} \times 113 \text{ g/mol} = 101.7\text{g}$$

0.15  $\text{NH}_4^+$

$$\text{Pm} = 14 (1) \text{ g/mol} + 1(4) \text{ g/mol} = 18 \text{ g/mol}$$

$$\text{No. moles} \times \text{Pm} = 0.15 \text{ mol} \times 18 \text{ g/mol} = 2.7 \text{ g.}$$

0.15  $\text{HCO}_3^-$

$$\text{Pm} = 1 (1) \text{ g/mol} + 12(1) \text{ g/mol} = 16 (3) \text{ g/mol} = 61 \text{ g/mol}$$

$$\text{No. moles} \times \text{Pm} = 0.15 \text{ mol} \times 61 \text{ g/mol} = 9.15 \text{ g.}$$

Sustituyendo los resultados en la fórmula empírica III.2.

2,295 g. (desechos orgánicos) + 522 g. agua  $\longrightarrow$  816 g. metano + 1,936 g. bióxido de carbono + 101.7g. materia celular + 2.7 g. Amonio + 9.15 g. bicarbonato.

g) Transformando a litros los dos componentes principales del biogas que son el metano y el bióxido de carbono y considerando que 1 mol de cualquier gas = 22.4 lts, a TPN (Temperatura y Presión Normales), se tiene:

$$51 \text{ mol } \text{CH}_4 (22.4 \text{ lts.}) = 1,142.4 \text{ lts.}$$

$$44 \text{ mol } \text{CO}_2 (22.4 \text{ lts.}) = 985.6 \text{ lts.}$$

h) El volumen de metano producido por peso unitario de residuo compuesto húmedo es:

$$\frac{1,142.4 \text{ lts.}}{2.295 \text{ Kg.}} \times 0.5423 = 270 \text{ lts. } \text{CH}_4$$

Kg residuos húmedos

Y el volumen de bióxido de carbono producido por peso unitario residuo compuesto húmedo es:

$$\frac{985.6 \text{ lts.}}{2.295 \text{ Kg}} \times 0.5423 = 233 \text{ lts. } \text{CO}_2$$

Kg residuo húmedo.

### III.2) METODO ESTEQUIOMETRICO CONSIDERANDO LA COMPOSICION QUIMICA DE DOS CATEGORIAS DE DESECHOS ORGANICOS.

El procedimiento es igual que el anterior, aquí se evalúan dos grupos de residuos orgánicos para estimar la producción potencial de metano, los cuales son: los residuos orgánicos no alimenticios y los residuos alimenticios.

Considerándose a los residuos orgánicos no alimenticios como el papel, los residuos de jardinería, los textiles y la madera.

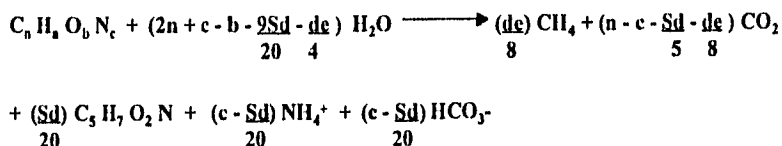
Con el propósito de calcular una fórmula empírica para esta categoría de desechos todos se consideran como papel y puesto que dicho subproducto se deriva de la madera, se puede desprender de ésta su composición.

En base seca la madera está compuesta de 40 a 50% celulosa, 30% lignita, 15 a 25% hemicelulosa y 5% otros.

La celulosa y la hemicelulosa son muy biodegradables bajo condiciones anaerobias apropiadas.

Procedimiento:

a) Utilizando la fórmula III.2 que representa la reacción de los residuos de papel en condiciones anaerobias.



b) Conociendo el porcentaje en peso húmedo (el cual se obtiene en laboratorio) de la composición química del papel, se procede a calcular los coeficientes estequiométricos n, a, b; de la fórmula del papel  $C_n H_a O_b N_c$ .

c) De acuerdo con el método anterior y utilizando nuevamente valores de  $a_c = 0.02$ ,  $f = 0.02$ ,  $S = 0.04$  y  $e = 0.96$ , se obtienen los resultados de producción de metano a partir de papel, textiles, madera y residuos de jardinería (considerados todos como papel).

d) Se calcula el número de moles de cada componente.

e) Para cuantificar ya sea en peso o volumen, se efectúan las relaciones estequiométricas de la formulación química, multiplicando el peso molecular por el número de moles de cada componente.

f) Obteniendo así el volumen de  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $NH_4^+$  y  $HCO_3^-$  a partir del papel, textil, madera y residuos de jardinería (considerados todos como papel).

g) Para los residuos alimenticios la contribución estimada de la producción de metano, se calcula igual que para los residuos no alimenticios.

h) Se efectúa la sumatoria de los resultados obtenidos en la evaluación de los residuos no alimenticios y los residuos alimenticios, obteniendo la producción total de metano.

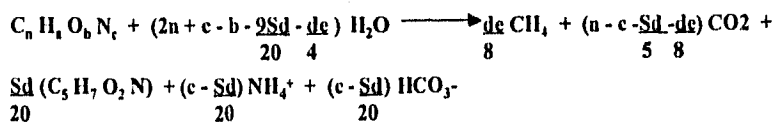
Los valores encontrados suponen condiciones anaerobias óptimas de humedad, pH y temperatura.

En este enfoque está implícita la ausencia de sustancias tóxicas o inhibitorias, las que impiden el proceso de formación de  $CH_4$ .

Ejemplo.

1) Residuos no alimenticios.

a) Utilizando la fórmula III.2:



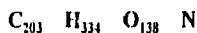
y la composición química promedio del papel, se tiene:

TABLA III.2

Composición Química Promedio del Papel <sup>30</sup>

	% Peso Húmedo	Normalizado %	Relaciones Mola	Coef. Est.
C	21.90	48.84	4.07	203
H	3.00	6.69	6.69	334
O	19.82	44.20	2.66	138
N	0.17	0.26	0.02	1
	44.85	99.98		

Por lo tanto la fórmula del papel se representa como:



b) De acuerdo con el método anterior y utilizando nuevamente valores de:  $a_c = 0.2$ ,  $f = 0.02$ ,  $S = 0.04$  y  $e = 0.96$ , se obtienen los siguientes resultados de producción de biogas a partir de papel, textiles, madera y residuos de jardinería (considerados todos como papel):

Siendo:

$$d = 4n + a - 2b - 3c = 867$$

$$(2n + c - b - \frac{9Sd}{20} - \frac{de}{4}) = 45.314$$

$$\frac{(de)}{8} = 104.04$$

$$(n - c - \frac{Sd}{5} - \frac{de}{8}) = 91.024$$

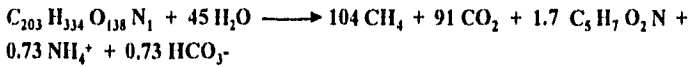
<sup>30)</sup> Rafael Garibay Orozco "Aprovechamiento del Biogas en el Extrialero de San Lorenzo Tezonco" p 98

ESTA TESIS NO DEBE  
SER DE LA BIBLIOTECA

$$\frac{(S_d) = 1.734}{20}$$

$$\frac{(c-S_d) = -0.73}{20}$$

c) Sustituyendo en la fórmula III.2.



Se obtienen las cantidades de los dos componentes principales del biogas:

$$104 \text{ mol } CH_4 \text{ por mol de } C_{203} H_{334} O_{138} N$$

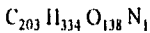
$$91 \text{ mol } CO_2 \text{ por mol de } C_{203} H_{334} O_{138} N$$

d) Transformando estos resultados a lts/Kg. de residuos de la siguiente manera:

$$\frac{\text{mol de gas} \times 22.4 \text{ lts}}{P_m \text{ de CHON}} \times \% \text{ Peso Húmedo}$$

Donde:

Peso Molecular de la materia orgánica es:



$$P_m = 12(203) \text{ g/mol} + 1(334) \text{ g/mol} + 16(138) \text{ g/mol} + 14(1) \text{ g/mol} = 4,992 \text{ g.}$$

$$\text{No. Moles} \times P_m = 1 \text{ mol} \times 4,992 \text{ g/mol} = 4.992 \text{ Kg.}$$

e) Resultando una producción potencial de:

$$104 \text{ mol } CH_4 (22.4 \text{ lts.}) = 2,329.60 \text{ lts.}$$

$$91 \text{ mol } CO_2 (22.4 \text{ lts.}) = 2,038.40 \text{ lts.}$$



El volumen de metano producido por peso unitario de residuo compuesto húmedo es:

$$[(2,329.60 \text{ lts.}) / 4.992 \text{ Kg.}] (0.4485) = 209 \text{ lts. CH}_4/\text{Kg. } \Sigma \text{ residuo húmedo.}$$

Donde:

$\Sigma z$  = residuos de jardinería + papel + textiles + madera

2) Residuos alimenticios: La contribución estimada de la producción de metano por los residuos alimenticios presentes en los residuos sólidos, se calcula igual que para los residuos no alimenticios:

Ejemplo:

Se tiene la siguiente composición química de desechos sólidos:

**TABLA III.3**

**Composición Química de Residuos Alimenticios**

	% Peso Seco	Normalizado %	Relaciones Atómicas	Coeff. Emp.
C	48.00	50.74	4.30	23
H	6.40	6.76	6.76	36
O	37.60	39.75	2.48	13
N	2.60	2.75	0.19	1
	94.60	100.00		

$$\% \text{ Peso Húmedo} = 100 - 94.6 = 5.4$$

$$\text{Fórmula empírica} = \text{C}_{23} \text{H}_{36} \text{O}_{13} \text{N}$$

$$\text{Peso Molecular} = 534 \text{ g/mol}$$

$$d = 4n + a - 2b - 3c = 99$$

$$(2n + c - b - \frac{2Sd}{20} - \frac{d_c}{4}) = 8.46$$

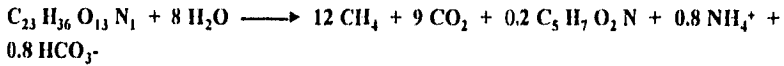
$$\frac{(d_c)}{8} = 11.88$$

$$(\frac{n - c - Sd}{5} - \frac{d_c}{8}) = 9.33$$

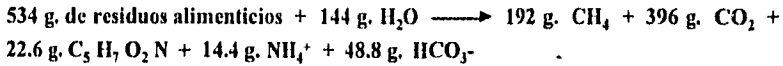
$$\frac{(Sd)}{20} = 0.2$$

$$\frac{(c - Sd)}{20} = 0.802$$

a) Sustituyendo en la fórmula III.2.



O bien:



b) Transformando a litros los dos componentes principales del biogas el metano y el bióxido de carbono:

27 lts.  $CH_4$  /Kg. de residuos alimenticios húmedos.

20 lts.  $CO_2$  /Kg. de residuos alimenticios húmedos.

Haciendo una comparación entre los resultados de los dos métodos se tiene la siguiente tabla:

TABLA III.4

METODOS	lts. CH <sub>4</sub> /Kg de residuos	lts. CO <sub>2</sub> /Kg de residuos	lts. de biogas/Kg. residuo
1 Estequiométrico a) Residuo compuesto	270	233	503
2 Estequiométrico a) Residuo de jardinería, papel, textiles y madera. b) Residuos alimenticios c) Sum. a + b	209 27 236	183 20 203	439

En estos métodos la generación de biogas se obtiene en función en la cantidad de metano, el cual se considera que ocupa aproximadamente el 50% del volumen del biogas y el otro 50% lo ocupan componentes como el bióxido de carbono, ácido sulfhídrico, etc.

De los resultados obtenidos, cabe decir que la diferencia entre la producción de metano estimada se debe a variaciones estadísticas de los datos usados en los cálculos.

Un criterio para saber que resultado elegir, se puede basar en tomar un promedio de los valores semejantes y si es posible comparar dichos valores con los resultados de monitoreo en campo del lugar en estudio.

Los valores encontrados suponen condiciones anaerobias óptimas de humedad, pH, temperatura y micronutrientes.

Obviamente esto no es real, aún así y como ya se mencionó al inicio de este capítulo, los métodos antes mencionados son empíricos por lo que los resultados dan una idea del potencial de producción de dicho gas.

### III.1.3 MODELOS CINETICOS DE LA PRODUCCION DE METANO <sup>31</sup>

Los métodos antes descritos evalúan la cantidad de biogas producida por unidad de volumen de materia orgánica en sitios de disposición final de desechos sólidos; sin embargo es necesario conocer el tiempo en que se genera dicho biogas, pues como ya se mencionó, ésta depende entre otros factores, de la velocidad de degradación de la materia orgánica. Para ello se han realizado algunos modelos matemáticos que describen la cinética de la producción anaerobia del metano, adoptándose para el biogas.

Entre dichos modelos se puede mencionar el realizado en el relleno sanitario de "Palos Verdes" California E.U.A. y el modelo recomendado por la F.P.A., del mismo país.

#### a) Modelo de "Palos Verdes":

Según el modelo, la generación de metano sucede en dos fases; para la primera etapa la producción de metano ( $dG/dt$ ) es proporcional al volumen de gas ya producido (ésto es, la producción de gas aumenta exponencialmente con el tiempo).

Durante la segunda etapa se supone que la producción depende del volumen de gas remanente a ser producido ( $-dL/dt$ ) (o sea, la producción de gas es una función exponencial que varía en forma inversa con respecto al tiempo).

El modelo puede describirse de la siguiente manera:

$$1a. \text{ Etapa: } \frac{dG}{dt} = k_1 G$$

$$2a. \text{ Etapa } \frac{dL}{dt} = -k_2 L$$

El modelo supone que la máxima producción de gas y la transición de la primera a la segunda etapa, suceden al tiempo que la mitad de la producción potencial a sido alcanzada. Así,  $G = L = (L_0/2)$ , cuando  $t = t_{\frac{1}{2}}$

---

(31) Methane generation and recovery from landfills. Emcon associates. Ann Arbor Science. Michigan, U.S.A. 1980

Al integrar la ecuación de la primera etapa se tiene:

$$G_{1i} = \frac{L_0 i}{2} \exp [-k_{1i}(t_1/2 - t)] \text{ para toda } t \leq t_1/2 \dots \dots \dots (1)$$

Con dicha ecuación se obtiene la cantidad de metano producida en cualquier tiempo t.

La ecuación de la segunda fase al ser integrada proporciona la cantidad remanente de metano por generar:

$$L_i = \frac{L_0 i}{2} \exp [-k_{2i}(t - t_1/2)], \text{ para toda } t \leq t_1/2 \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

t= tiempo

G= volumen

L= volumen de gas remanente a ser producido después del tiempo t.

k<sub>1</sub> k<sub>2</sub>= constantes en función de las tres categorías de desechos orgánicos.

t<sub>1</sub>/2= tiempo medio

L<sub>0</sub>= producción potencial total de gas.

i= subíndice relacionado con el grupo de residuos en cuestión (i= A, B, C.).

1, 2= subíndices que se refieren a cada una de las etapas.

En este modelo, los desechos orgánicos se clasifican en tres categorías: los que se descomponen rápidamente (alimentos y pastos), los que lo hace en un tiempo moderado (papel, madera y textiles) y los que tardan mucho tiempo (plástico y hule).

Para estimar el valor de k<sub>1</sub> se supone un valor de t<sub>1/2</sub> para cada una de las categorías anteriores. También se supone que G<sub>0</sub>= (L<sub>0</sub>/100) para cada categoría.

Así de la ecuación (1) se tiene:

$$k_1 = \ln \frac{G}{G_0} t \text{ y ya que } G_0 = \frac{L_0}{100} \text{ y } G = \frac{L_0}{2} \text{ cuando } t = t_1/2$$

Entonces:

$$k_1 = \frac{\ln 50}{\frac{t_1}{2}}$$

Para calcular  $k_2$  se supone, para cada categoría, valores de  $t_{100}$  (el tiempo necesario para alcanzar el 99% de la producción total del gas).

Así de la ecuación (2) se tiene:

$$k_2 = \frac{(\ln 2L)}{L_0 \left( \frac{t - t_1}{2} \right)}$$

Al sustituir  $L = \frac{L_0}{100}$  para  $t = t_{99/100}$ , obtenemos:

$$k_2 = \frac{\ln 50}{\frac{t_{99} - t_1}{2}}$$

Para conocer el proceso de la generación del metano y su grado de avance, es necesario saber la velocidad de éste, la cual se obtiene al diferenciar las ecuaciones (1) y (2) de la siguiente manera:

$$G'_{11} = \frac{dG_{11}}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{L_0 i}{2} \exp[-k_{11} \left( \frac{t_1 i}{2} - t \right)]$$

En donde  $L_0 i$  es un valor constante, por lo que:

$$\frac{dG_{11}}{dt} = \frac{L_0 i}{2} \frac{d}{dt} \exp[-k_{11} \left( \frac{t_1 i}{2} - t \right)]$$

Quedando una derivada de la forma  $\frac{d}{dt} e^u$

Entonces:

$$G'_{1i} = \frac{dG_{1i}}{dt} = \frac{K_{1i} - L_{0i}}{2} \exp[-k_{1i}(t_{1i} - t)]$$

$$L'_{2i} = \frac{dL_{2i}}{dt} = \frac{K_{2i} - L_{0i}}{2} \exp[-k_{2i}(t - t_{1i})]$$

Para representar gráficamente los valores obtenidos con dichas ecuaciones, se calculan sus logaritmos. De esta forma se tienen las siguientes formulaciones:

$$\text{Log } G'_{1i} = (\text{Log } K_{1i} - L_{0i}) - \frac{K_{1i}}{2.3} \left( \frac{t_{1i} - t}{2} \right)$$

$$\text{Log } L'_{2i} = (\text{Log } K_{2i} - L_{0i}) - \frac{k_{2i}}{2.3} (t - t_{1i})$$

Ejemplo:

Aplicando las ecuaciones (1) y (2) se tiene:

$$G_{1i} = \frac{L_{0i}}{2} \exp[-k_{2i}(t_{1i} - t)] \quad \text{para } t \leq t_{1i} \dots \dots \dots (1)$$

$$L_{2i} = \frac{L_{0i}}{2} \exp[-k_{2i}(t - t_{1i})] \quad \text{para toda } t \geq t_{1i} \dots \dots \dots (2)$$

a) Cálculo de  $L_{0i}$ :

En algunos estudios la producción de metano generado en un sitio de disposición final de residuos sólidos, se estima considerando un factor de producción de  $60 \pm 30$  lbs.  $\text{CH}_4/\text{Kg}$  de desechos sólidos ( $\text{m}^3$ . de  $\text{CH}_4/\text{ton}$ . de desechos sólidos).

Conociendo la cantidad de residuos depositados y dicho factor, se determina la cantidad total de metano a producir:

$$L_{0i} = FC \cdot r$$

F = Factor de producción ( $60 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton.}$  de desechos sólidos).

C = Cantidad de desechos sólidos depositados en el sitio durante el tiempo de vida útil (ton.).

r = Porcentaje normalizado de cada grupo de residuos (rápida, moderadamente y lentamente degradables) expresado como fracción de unidad.

Considerando los siguientes datos:

**TABLA III.5**  
**CALCULO DEL PORCENTAJE NORMALIZADO DE CADA GRUPO**  
**DE RESIDUOS**

Grupo de Residuos	Porcentaje en peso respecto al total de residuos depositados	Porcentaje normalizado de la fracción orgánica total (r)
Grupo A Rapidamente degradables	37.80	45.03
Grupo B Moderada velocidad de degradación	37.19	44.30
Grupo C Lentamente degradables	8.96	10.67
Sumatoria	83.95	100.00

Para  $F = 60 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton.}$  de desechos sólidos.

$C = 690,000 \text{ Ton}$  (dato supuesto para este ejemplo).

Del total de metano por producir, cada grupo de residuos biodegradables contribuyen con las siguientes cantidades.



**Grupo A:**

$$L_o = (60 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton. de desechos s\u00f3lidos}) (690,000 \text{ Ton}) (0.4503) = 18'642,420 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$$

**Grupo B:**

$$L_o = (60 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton. de desechos s\u00f3lidos}) (690,000 \text{ Ton}) (0.4430) = 18'340,200 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$$

**Grupo C:**

$$L_o = (60 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton. de desechos s\u00f3lidos}) (690,000 \text{ Ton}) (0.1067) = 4'417,380 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$$

b) Calculo de  $K_1$  y  $K_2$

$$k_1 = \frac{\ln 50}{\frac{t_1}{2}}$$

$$k_2 = \frac{\ln 50}{\frac{t_{99} - t_1}{100}}$$

TABLA III.6

CALCULO DE  $K_1$  Y  $K_2$

	% en peso normalizado	t 1 años supuestos	t 2 años supuestos	$k_1$ calculada	$k_2$ calculada
A Material rápidamente degradable	45.03	2	4	1.956	1.956
B Material que se degrada a mediano plazo	44.30	5	12	0.782	0.559
C Material lentamente degradable	10.67	25	60	0.156	0.112

Para  $t = 1$  año.

$$G_{1A} = 18,642,420/2 \{ \exp [-1.956(2-1)] \} = 1,318,233.32$$

$$G_{1B} = 18,340,200/2 \{ \exp [-0.782(5-1)] \} = 401,699.17$$

$$G_{1C} = 4,417,380/2 \{ \exp [-0.156(25-1)] \} = 52,256.0$$

Para  $t = 2$  años.

$$G_{2A} = 18,642,420/2 \{ \exp [-1.956(2-2)] \} = 9,321,210$$

$$G_{2B} = 18,340,200/2 \{ \exp [-0.782(5-2)] \} = 878,049.94$$

$$G_{2C} = 4,417,380/2 \{ \exp [-0.156(25-2)] \} = 61,078.19$$

Para  $t = 3$  años.

$$L_{2A} = 9,321,210 \exp [-1.956(3-2)] = 1,318,233.23$$

$$G_{IB} = 18,340,200/2 \{ \exp [-0.782(5-3)] \} = 878,049.94$$

$$G_{IC} = 4,417,380/2 \{ \exp [-0.156(25-3)] \} = 71,389.78$$

Para  $t = 4$  años.

$$L_{2A} = 9,321,210 \exp [-1.956(4-2)] = 186,428.48$$

$$G_{IB} = 18,340,200/2 \{ \exp [-0.782(5-4)] \} = 4,195,230.10$$

$$G_{IC} = 4,417,380/2 \{ \exp [-0.156(25-4)] \} = 83,442.25$$

Para  $t = 5$  años.

$$L_{2A} = 9,321,210 \exp [-1.956(5-2)] = 26,365.27$$

$$G_{IB} = 18,340,200/2 \{ \exp [-0.782(5-5)] \} = 9,170,100$$

$$G_{IC} = 4,417,380/2 \{ \exp [-0.156(25-5)] \} = 97,529.49$$

Lo cual se resume en el siguiente cuadro:

**TABLA III.7**

**RESUMEN DE RESULTADOS**

<b>años</b>	<b><math>G_A</math> m<sup>3</sup></b>	<b><math>G_B</math> m<sup>3</sup></b>	<b><math>G_C</math> m<sup>3</sup></b>	<b>Total m<sup>3</sup></b>
1	1,318,233.3	401,699.17	52,256.0	1,772,188.5
2	9,321,210.0	878,049.94	61,078.19	10,260,338.13
3	1,318,233.23	1,919,276.3	71,389.78	19,314,852.76
4	186,428.48	4,195,230.1	83,442.25	22,734,663.85
5	26,365.27	9,170,100.0	97,529.49	27,883,684.22

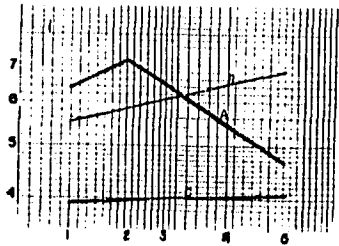
Para conocer el comportamiento de la generación del biogas a través del tiempo, se obtienen los logaritmos de las ecuaciones que representan la velocidad del proceso en la primera y segunda etapa, como en seguida se presentan:

$$\text{Log } G_{1i} = (\text{Log } \frac{K_{1i} L_{0i}}{2}) - \frac{K_{1i} t_{ij}}{2.3} + \frac{K_{1i} t}{2.3} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{Log } L'_{2i} = (\text{Log } \frac{K_{2i} L_{0i}}{2}) - \frac{k_{2i} t_{ij}}{2.3} + \frac{K_{2i} t}{2.3} \dots\dots\dots (4)$$

Sustituyendo valores en la ecuaciones (3) y (4), se obtuvieron los siguientes resultados:

t años	Log G <sub>1</sub>	Log G <sub>2</sub>	Log G <sub>3</sub>
1	6.41	5.49	3.90
2	7.26	5.83	3.97
3	6.40	6.17	4.04
4	5.55	6.51	4.11
5	4.70	6.85	4.17



En la gráfica se puede observar que la producción de metano para los residuos tipo A, se presenta a los dos años, descendiendo conforme pasa el tiempo. Para los residuos tipo B, la producción de metano es relativamente rápida, mientras que para los residuos tipo C, la producción es muy lenta.

**b) Modelo recomendado por el EPA (Environmental Protection Agency), para estimar la generación de metano.<sup>32</sup>**

En los últimos años la tasa de generación de biogas se ha medido en varios rellenos sanitarios y en lisímetros abiertos que aparentemente proporcionan una buena generación, debido a que la eficiencia en su recolección es desconocida.

Así como en lisímetros cerrados donde se pueden medir las tasas de generación de biogas y su composición, pero no se pueden duplicar las condiciones de los rellenos sanitarios en

(32) Humberto Vidales -Albarrán. Curso Internacional sobre diseño y disposición final de residuos sólidos. Generación y cuantificación de biogas. México, D.F., pp. 1-7.

lo que al clima en general se refiere y que usualmente proporcionan muy poco o ningún contenido de metano, por eso la producción de biogas generado en ellos y los valores encontrados para la tasa de producción, han sido muy variados, en un rango que fluctúa entre 0.75 a 34 litros de biogas por kilogramo de residuos húmedos por año.

Sin embargo hay investigadores que llegan a valores teóricos llamados de última productividad, tan altos como 450 lts./kg., y valores medidos en laboratorio de 260 lts./kg.

Esto obedece a los factores ya mencionados en el punto II.3 que afectan dicha producción como son: la composición de los residuos, la temperatura, el pH y la cantidad y calidad de nutrientes como el nitrógeno, fósforo y potasio contenidos en los desechos sólidos, y finalmente la presencia de algunos inhibidores dentro del relleno.

Es conocido que su tasa de producción varía con el tiempo por lo que el método estequiométrico requiere de ayuda interviniendo la cinética de la reacción y también es conocido que la producción continúa por varias décadas, por lo que se hace difícil predecir la cantidad de gas generado.

Hay investigadores que dan vidas medias a los desechos rápidamente putrecibles, como los provenientes de desperdicios de comida, basura de jardín, etc., entre seis meses y un año; para los desechos sólidos refractarios (materiales que resisten bien a la acción de agentes químicos o físicos), se les asigna una vida media teórica infinita.

Para conseguir lo anterior E.P.A. recomienda un modelo muy simple de aplicar y que parece predecir con suficiente aproximación a la realidad la cantidad de biogas generado en los rellenos sanitarios.

La generación total de metano del sitio toma en cuenta la masa de residuos sólidos recibidos anualmente aceptando la misma tasa anual en el tiempo de operación del relleno, sin embargo si se conocen las entradas de dichos residuos con el tiempo puede establecerse un promedio anual y con estos valores, variando anualmente, correr el modelo.

El modelo se representa con la siguiente formulación:

$$Q = LoR [ \exp(-kc) - \exp(-kt) ]$$

Donde:

Q = Tasa de generación de metano con el tiempo  $m^3/año$ .

Lo = Capacidad potencial de los residuos de generar metano,  $m^3/ton$ .

R = Tasa de aceptación promedio de basura durante la vida activa del relleno  $ton/año$ .

k = Tasa de generación de metano, se supone constante,  $lts/año$ .

c = Tiempo desde la clausura del relleno (años) .

t = Tiempo desde el inicio de la colocación de los residuos en el relleno (años).

En la formulación no se ha incluido ningún término de vida media o porcentaje de desechos rápida, o moderadamente putrecible, pero es evidente que los valores de Lo y k los toman en cuenta.

El modelo acepta un tiempo de retraso durante el cual las condiciones anaeróbicas se establecen para climas semi-áridos con baja precipitación y alta evaporación, puede aceptarse un año como tiempo de retraso, para las condiciones de otros climas no incluidos los áridos, con alta precipitación, alta temperatura y cualquier condición de evaporación; este tiempo tal vez no deba concederse.

E.P.A. indica que en ausencia de información se puede usar  $Lo = 230 m^3/ton$  y  $k = 0.02 lts/año$ , sin embargo los últimos recomendados por E.P.A. son:

TABLA III.9

VALORES DE Lo Y K RECOMENDADOS POR E.P.A.

	Climas semi-áridos	Otros climas
Lo	90 $m^3/ton$	175 $m^3/ton$
k	0.05 $l/año$	0.05 $l/año$

Se sugiere aplicar este modelo al medio mexicano siguiendo algunos criterios como los siguientes:

La composición de los residuos sólidos generados en México, tiene un alto contenido de desperdicios de comida, pero no muy alto contenido de residuos de jardín, como es el caso donde este modelo surgió.

El agua de lluvia que se infiltra en rellenos mexicanos clausurados o en operación, es muy alta debido a que pocos tienen cubierta final o diaria, o la tienen escasa.

No existe en el medio mexicano un período de tiempo prolongado de contacto del agua de deshielo ocasionada por la nieve con la cubierta del relleno.

Si bien los valores del asoleamiento en México son similares a los de Estados Unidos, las temperaturas de invierno son más benignas y proporcionan la generación de biogas.

En seguida se presenta en ejemplo de este método, para los tipos de climas semiárido, así como para otros tipos de climas.

Ejemplo:

Aplicando el modelo  $Q = LoR [ \exp(-kc) - \exp(-kt) ]$

Donde:

$Lo = 90 \text{ m}^3/\text{Ton.}$  (dato recomendado por la E.P.A. para clima semiárido)

$k = 0.05 \text{ l/año.}$  (dato recomendado por la E.P.A.)

$R = 690.000 \text{ Ton.}$

$c = 0 \text{ años}$

$t = 5 \text{ años}$

Sustituyendo en el modelo.

Para 5 años se tiene:

$$Q = (90 \text{ m}^3/\text{Ton}) (690,000 \text{ Ton.}) [ e^{(-0.05 \times 0)} - e^{(-0.05 \times 5)} ] = 13.66 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

Ahora considerando  $Lo = 175 \text{ m}^3/\text{Ton.}$  (recomendado por la EPA para otros tipos de climas), con los mismos valores de  $k, R, t, c$ ; se tiene:

Para 5 años:

$$Q = (175 \text{ m}^3/\text{Ton}) (690,000 \text{ Ton.}) [e^{(-0.05 \times 0)} - e^{(-0.05 \times 5)}] = 26.56 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año.}$$

A continuación se hace una comparación entre los resultados de los dos métodos cinéticos.

TABLA III.10

Modelo de "Palos Verdes" generación de metano a los 5 años	Modelos de la EPA generación de metano a los 5 años
27'883,684.22 m <sub>3</sub>	Para cualquier clima 26'560,000 m <sub>3</sub>

Haciendo una comparación entre los resultados de ambos métodos se observa que hay una diferencia del 4.98% aproximadamente, por lo tanto se puede tomar un promedio de ambos valores.

De lo antes presentado se considera pertinente hacer las siguientes observaciones:

La producción de biogas verdaderamente aprovechable con un porcentaje alto de metano puede considerarse cuando el bióxido de carbono y el metano no varíen significativamente con el tiempo.

En ese momento con los cálculos de producción acumulada, utilizando algún método y conociendo los porcentajes en volumen de ambos gases constitutivos del biogas, puede determinarse un cierto volumen esperado de este último.

En el siguiente capítulo se presentan algunos sistemas para controlar la migración del biogas generado en los sitios de disposición final de desechos sólidos municipales.



# CAPITULO IV

## SISTEMAS PARA EL CONTROL DEL BIOGAS

El control del biogas generado en un sitio de disposición final de residuos sólidos municipales, consiste en detectar, medir y evaluar, entre otros parámetros: el volumen producido, la migración, la composición y las propiedades de éste.

Lo anterior con el fin de determinar la calidad del biogas (en función del metano que contiene), a través de análisis cuantitativos y cualitativos que coadyuven a evaluar la factibilidad de su aprovechamiento, así como para el establecimiento de medidas que permitan minimizar los impactos negativos al ambiente.

El control del biogas en un sitio de disposición final de desechos sólidos, puede ser tan sencillo o tan complejo, dependiendo del equipamiento de éste, como se observa en la figura IV.1, es decir, si el sitio es realmente un relleno sanitario con la infraestructura requerida para cumplir con las condiciones establecidas para estas obras, el control del biogas generalmente es más eficiente, ya que las medidas para dicho control se establecen desde que se realiza el proyecto de la obra, no así en un sitio cuya operación no ha sido controlada, como pueden ser los tiraderos clandestinos a cielo abierto.

Entre algunas medidas para el control del biogas generado en un sitio de disposición final de desechos sólidos municipales, se pueden mencionar: la impermeabilización del sitio y la construcción de sistemas de extracción natural o mecánica de dicho energético, lo cual depende del manejo que se le va a dar, es decir si va a ser utilizado, desalojado o incinerado.

Estos sistemas se definen en seguida:

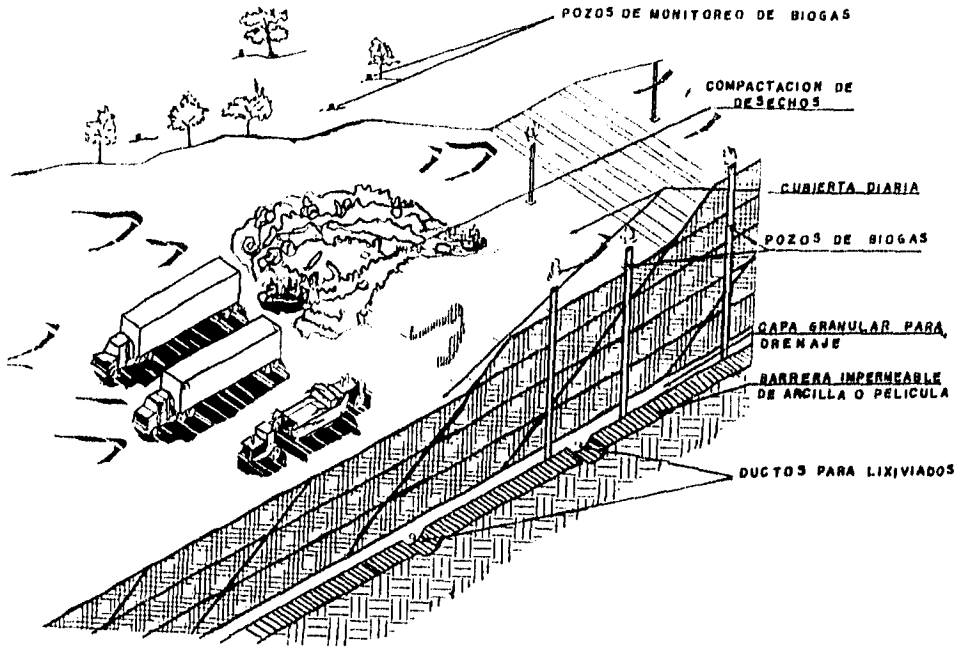


FIG. IV.1 EQUIPAMIENTO DE UN SITIO DE DISPOSICION FINAL DE DESECHOS SOLIDOS

#### **a) Impermeabilización del sitio.**

La impermeabilización del sitio de disposición final, es una medida complementaria a los sistemas de extracción para efectuar el control del biogas.

Consiste en aislar con algún material impermeable una región de terreno, con el fin de evitar la filtración de cualquier fluido líquido o gaseoso, del interior de la región hacia el exterior y viceversa.

En sitios de disposición final de desechos sólidos, dichos fluidos son los lixiviados y el biogas, que como ya se mencionó son los productos finales que resultan de la descomposición de la materia orgánica contenida en los desechos sólidos que se confinan.

En el caso del biogas, es importante la impermeabilización del sitio en donde se genera, para disminuir al máximo las fugas, así como para obtener una mayor captación de éste.

Dicha impermeabilización, puede efectuarse con materiales naturales o con artificiales, de los cuales en seguida se presentan algunos aspectos importantes.

##### **a.1) Impermeabilización con material natural.**

La impermeabilización con material natural como se ilustra en la figura IV.2, involucra el cumplimiento de varios requisitos, en el propio material y en el proceso de colocación, es decir; para la selección del material, existen dos opciones: en la primera se puede emplear un material fino plástico, como las arcillas de baja compresibilidad (CL) cuya permeabilidad debe ser menor a  $10^{-7}$  cm/seg., y protegerse contra erosión y secado mediante una capa de al menos 0.20 m. de grava-arena bien graduada, que a la vez sirva para el drenaje del lixiviado.

La segunda opción consiste en emplear un material que combine en la medida de lo posible todas las propiedades deseables como las gravas arenarcillosas o las gravas arcillosas. El contenido de arcilla debe ser suficientemente alto y uniforme.

En la colocación del material, se debe tener un especial cuidado en el espesor de la capa impermeable, el cual se recomienda que sea mayor a 0.50 m. de tal manera que prevenga cualquier filtración al subsuelo por lo menos durante 50 años.

IMPERMEABILIZACION NATURAL DE SITIOS DE  
DISPOSICION FINAL DE DESECHOS SOLIDOS

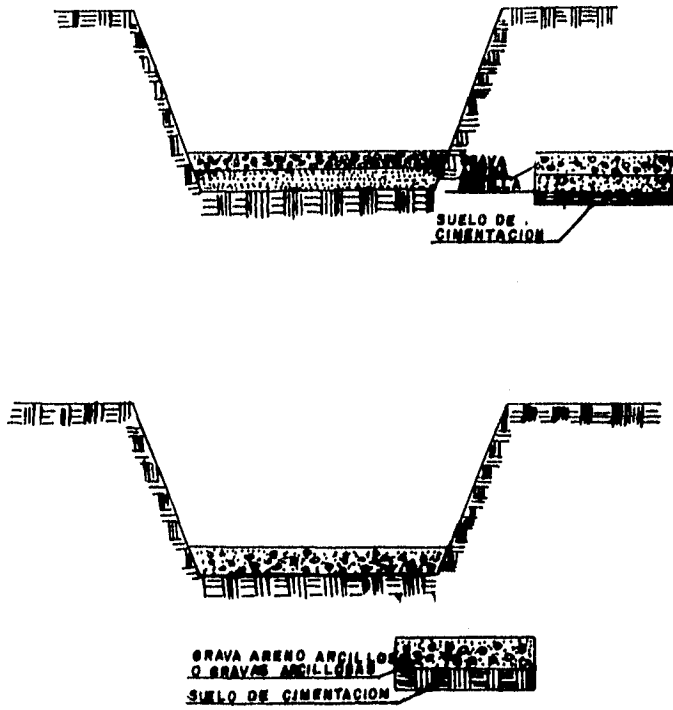


FIG. IV.2

Las capas se compactan en espesores de 0.15 m., utilizando equipo ligero como el tractor agrícola, pues los equipos tradicionales de compactación (rodillo liso o pata de cabra) suelen atascarse.

En la tabla IV.1 , se presentan las propiedades físicas de los suelos utilizados para la impermeabilización.

#### **a.2) Impermeabilización con material artificial a base de geosintéticos.**

En la figura IV.3 se muestra una forma de impermeabilización artificial.

Antes de describir dicha actividad, se presentan las características de los materiales geosintéticos más utilizados en las obras de ingeniería:

Los materiales geosintéticos pueden funcionar para la separación, refuerzo, filtración, drenaje, protección e impermeabilización de los suelos.

La familia de los geosintéticos está compuesta por geotextiles, geomembranas, georredes, geocompuestos, etc.

#### **Geotextiles.**

Son textiles de fibras sintéticas (generalmente de polipropileno o poliéster), porosas, tejidas o no tejidas y punzonadas, permiten una fácil circulación de agua y aire a través y a lo largo de sí mismas, pero con diferentes permeabilidades.

Por su textura rugosa, en algunos casos se utilizan para evitar el deslizamiento de las geomembranas cuando son colocadas sobre pendientes importantes.

No se recomienda soldar o cocer los tramos, ya que dicha unión es susceptible a fallar debido a la tensión provocada por los asentamientos de los desechos sólidos cuando se biodegradan.

Por ello su colocación en una superficie horizontal, se debe efectuar juntando libremente los extremos de cada tramo.

TABLA IV. I

PROPIEDADES FISICAS IMPORTANTES DE LOS SUELOS EN  
RELACION CON SU USO PARA IMPERMEABILIZACION \*\*

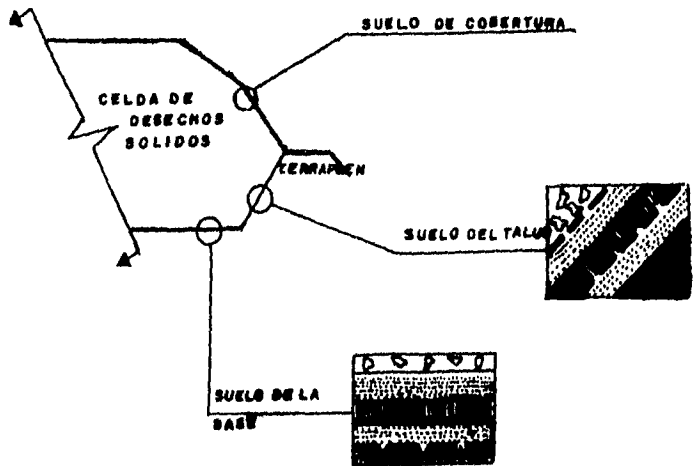
NOMBRE TIPICO DE LOS SUELOS (SUS)	SIMB. GRUPO	PROPIEDADES DE LOS SUELOS *			USO COMO REVESTIMIENTO **	
		PERME.	RESIST. AL CORTE	POSO VOL. COMP.	RESIST. A LA FROSTUR	RESIST. DE SUELOS COMP.
GRAVAS Y MEZCLAS DE ARENA Y GRAVA, BIEN GRADUADA, POCO O NADA DE LIMO	GW	14	16	15	2	-
GRAVAS Y MEZCLAS DE ARENA Y GRAVA, UNIFORMES, POCO O NADA DE LIMO	GP	16	14	8	3	-
GRAVA LIMOSA, MEZCLAS UNIFORMES DE GRAVA, ARENA Y LIMO	GA	12	10	12	5	6
GRAVA ARCHILOSA, MEZCLAS UNIFORMES DE GRAVA, ARENA Y ARCHILA	GA	6	8	11	4	2
GRAVA DE CEMENTANTE DE ARENA ARCHILA	GW-GC	8	13	16	1	1
ARENA Y ARENA CON GRAVA, BIEN GRADUADA, POCO O NADA DE LIMO	AW	13	15	13	8	-
ARENA UNIFORME, ARENA CON GRAVA POCO O NADA DE LIMO	AP	15	11	7	9	-
ARENA LIMOSA, MEZCLAS UNIFORMES DE ARENA Y ARCHILA	AM	11	9	10	10	7
ARENA ARCHILOSA, MEZCLAS UNIFORMES DE ARENA Y ARCHILA	AM	5	7	9	7	4
ARENA DE CEMENTANTE ARCHILOSO	AW-AC	7	12	14	6	3
LIMOS INORGANICOS Y ARENA MUY FINA, POLVO DE ROCA, ARENAS FINAS LIMOSAS O ARCHILOSAS CON LIGERA PLASTICIDAD	ML	10	5	5	-	8 EROSION CRITICA
ARCHILA INORGANICA DE BAJA A MEDIANA PLASTICIDAD, ARCHILA CON GRAVA, ARCHILA ARENOSA, ARCHILA LIMOSA, ARCHILA POCO PLASTICA	CL	3	6	6	11	5
LIMOS ORGANICOS Y ARCHILAS ORGANICAS LIMOSAS DE BAJA PLASTICIDAD	OL	4	2	3	-	9 EROSION CRITICA
LIMO INORGANICO, SUELOS FINOS ARENOSOS O LIMOSOS MICACEOS O DIATOMACEOS LIMOS PLASTICOS	MH	9	3	2	-	-
ARCHILA INORGANICA DE ALTA PLASTICIDAD	CH	1	4	4	12	CAMBIO VERDAL CRITICO
ARCHILA ORGANICA DE MEDIANA A ALTA PLASTICIDAD	OH	2	1	1	-	-
TIERRA Y OTROS SUELOS ALJABANIT ORGANICOS	PI	-	-	-	-	-

\* Los números clasifican los suelos de acuerdo con las propiedades físicas mencionadas de menor a mayor permeabilidad, retención y peso volumétrico.

\*\* Los números indican la calidad relativa del tipo de suelo para el uso considerable.

(3) GABRIEL, ALVAREZ Y RAUL, ESQUIVEL, IMPERMEABILIZACION DE LAGUNAS ARTIFICIALES, S.A.M.S., MEXICO, D.F. p 19

IMPERMEABILIZACION DE SITIOS DE  
DISPOSICION FINAL DE DESECHOS SOLIDOS









-  DESECHOS SOLIDOS
-  GEORRED
-  SUELO DRENANTE
-  GEOTEXTIL
-  SUELO DE CIERRE O DE CIMENTACION
-  GEOMEMBRANA

FIG . IV . 3

Cuando la superficie es inclinada o vertical se puede fijar con algún anclaje mecánico como se observa en la figura IV.4.

#### Georedes.

Están formados por una red de plásticos con aberturas muy grandes, se utilizan para separar (ocasionalmente) y para reforzar (generalmente).

#### Geomallas.

Están formados por una extrusión continua de costillas de polímeros, con ángulos agudos. Cuando estas costillas se encuentran separadas, se forman aberturas relativamente grandes, configurando una malla. Su principal función es la de drenaje.

#### Geocompuestos.

Consisten en la combinación de dos o más geosintéticos: geotextil y geored; geored y geomembrana; geotextil, geored y geomembrana; o cualquier combinación de los anteriores; con tubos, cables de acero, anclas, etc.

Se utilizan para filtrar, drenar, proteger e impermeabilizar. Garantizan una superficie de trabajo plana, limpia y continua al cubrir irregularidades en la superficie del suelo.

#### Geomembranas.

En los siguientes puntos se presentan algunos aspectos relevantes de este tipo de geosintéticos, ya que por su manejo y utilización son los que requieren mayor estudio. “

#### **- Generalidades:**

Son materiales muy delgados en forma de sábanas de hule o de plástico. Estan hechas a partir de resinas obtenidas como producto de una reacción química llamada polimerización, en el mercado se pueden encontrar membranas de Polietileno (PE), Polivinilo de cloruro (PVC), Polietileno clorinado (CPE), Hule butilo, Neopreno, Hypalon, etc.



# ANCLAJE MECANICO EN TALUD

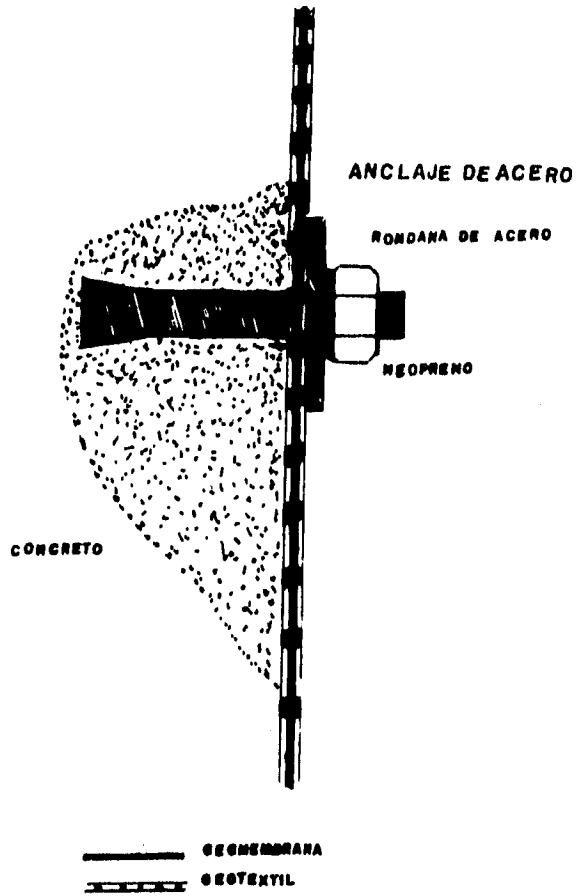


FIG. IV. 4

Son utilizados principalmente para impermeabilizar depósitos que contengan líquidos o sólidos.

La mayoría de las geomembranas son de color negro, debido al negro de humo que se le añade para combatir los defectos nocivos de los rayos ultravioleta del sol.

Estas pueden ser colocadas solas o en combinación con otros materiales ya sean naturales (como arena, arcilla, bentonita, etc.), o sintéticos (como georedes o geotextiles), con el fin de reforzarlas y protegerlas tanto de pinchaduras como de los esfuerzos por tensión.

De la misma forma las geomembranas han sido usadas verticalmente, forrando barreras interceptoras de flujo, haciendo las veces de pantallas impermeables.

**- Selección del tipo de geomembranas:**

La selección del tipo de geomembranas debe tomar en cuenta muchos factores dependientes de la obra en particular. En la tabla IV.2, se presenta una lista de los principales criterios de selección en orden decreciente de importancia.

TABLA IV.2

CRITERIOS DE SELECCION PARA REVESTIMIENTOS SINTETICOS "

- 1.- ALTA RESISTENCIA A LA TENSION, FLEXIBILIDAD Y ELONGACION SIN FALLA.
- 2.- RESISTENCIA A LA ABRASION, AL PUNZONAMIENTO Y A LOS EFECTOS DE AGUA DE DESECHO.
- 3.- BUENA RESISTENCIA AL INTEMPERISMO; EL FABRICANTE GARANTIZA LARGA VIDA.
- 4.- INMUNIDAD AL ATAQUE DE BACTERIAS Y HONGOS.
- 5.- DENSIDAD MAYOR QUE 1.
- 6.- COLOR: NEGRO PARA RESISTIR RAYOS ULTRAVIOLETA.
- 7.- ESPESOR MINIO 20 MILS. (0.4 mm.)
- 8.- COMPOSICION UNIFORME Y AUSENCIA DE DEFECTOS FISICOS.
- 9.- RESISTENCIA A VARIACIONES DE TEMPERATURA Y A CONDICIONES AMBIENTALES.
- 10.- FACIL REPARACION.
- 11.- ECONOMIA.

134) RAFAEL AUVINET Y RAUL ESQUIVEL, IMPERMEABILIZACION DE LAGUNAS ARTIFICIALES. S.N.M.S., MEXICO.

D.F. p. 24

En la tabla IV.3, se comparan las propiedades de los materiales sintéticos de uso más común.

TABLA IV. 3  
PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE USO COMUN PARA REVESTIMIENTO \*

	HYPALON								
DENSIDAD	0.92-0.94	0.94-0.96	1.2-1.3	1.35-1.39	0.9-0.91	1.08-1.4	0.92-1.25	0.91-1.25	
RESIST. A TENSION psi (KG/cm <sup>2</sup> )	1300-2300 90-175	2400-4800 170-340	3500-10000 245-700	1800 MIN 125 MIN	4000-32000 280-2250	9000-1100 630-775	1000-4000 70-280	1000-3500 70-290	1000-2000 70-140
ELONGACION, %	200-800	10-650	60-200	375-575	40-400	250-550			
DUREZA SHORE "A"							15-90	20-100	55-95
INTERVALO DE TEMP. DE TRABAJO F C	-70 A 180 -55 A 80	-70 A 240 -55 A 115	-60 A 200 -50 A 90	-40 A 200 -40 A 50	-60 A 220 -50 A 105	-60 A 380 -50 A 170	-50 A 325 -45 A 180	-70-250 -55-120	-45 A 250 -45 A 120
RESIST. A LOS ACIDOS	P-B	B	B-E	B-E	B-E	P			B
RESIST. A LAS BASES	B-E	B-E	B-E	B-E	B-E	E			B-E
RESIST. A SOLVENTES OXIGENADOS	P-B	P-B	B	P					B
RESIST. A SOLVENTES AROMATICOS Y HALOGENOS	R	R	B	P	B	B	P	P	R
RESIST. A SOLVENTES ALIFATICOS (DEL PETROLEO)	P-R	R	B	B	B	E	P	P	B
PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA POR MILLS	3-14	1.8-2.2	3-14	0.04-0.044	0.25-1	0.09-1.0	0.15		2.0
INTemperización	P	P	B	E	P	R	B	R	E

P= POBRE R= REGULAR B= BUENO E= EXCELENTE  
METODOS ASTM EMPLEADOS PARA DETERMINAR LAS DISTINTAS PROPIEDADES  
DENSIDAD D751, RESISTENCIA LA TENSION, D97-61T, ELONGACION D412-61T O D882,  
DUREZA SHORE "A", D676-59T, PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA, E96-66.

(35) GABRIEL AUVNET Y RAUL ESQUIVEL, IMPERMEABILIZACION DE LAGUNAS ARTIFICIALES, S.M.M.S. MEXICO, D.F., p. 25

#### - Instalación.

Las geomembranas así como los demás geosintéticos se adquieren en rollos, siendo su colocación sobre la superficie a impermeabilizar, manual o mecánica.

La instalación de las geomembranas, es la etapa en donde es importante el control de calidad, pues aún cuando se fabrican y se entregan perfectas, pueden fallar debido a las siguientes razones: cualquier método de unión de la geomembrana en obra, es susceptible a error, terreno no estable, viento, clima y temperatura; la calidad de la obra de mano en la colocación, está siempre sujeta al error humano y la presencia de fuentes de pinchadura ya sea en el equipo de instalación o en la obra en sí.

Las técnicas más comunes para las uniones en obra son las que se describen en los siguientes puntos:

\* **Unión con adhesivos:** Las dos superficies de geomembranas son traslapadas y unidas con un adhesivo químico o con cintas adhesivas. Como se observa en la figura IV.5 (a).

Generalmente cuando se utilizan adhesivos se emplea un sistema de dos componentes químicos aunque éste requiere una mezcla cuidadosa.

Esta forma de unión se aplica frecuentemente a las membranas de polietileno.

\* **Unión con aire caliente:** Consiste en aplicar aire o gas a una temperatura alta sobre las dos piezas de geomembranas, hasta que se unen, momento en el cual se aplica presión para crear una unión homogénea entre ambas. El tiempo y la presión deben ser cuidadosamente controlados para evitar el daño provocado por el calor. Esto se muestra en la figura IV.5 (b).

Este método no puede aplicarse a membranas gruesas (por ejemplo de más de 1 mm.).

\* **Unión con solvente:** Para esta unión, el material de revestimiento es disuelto con un solvente, que ablanda y une las superficies del revestimiento. Esta técnica es usada tanto en planta como en la obra, en particular para membranas de P.V.C. Esta unión se observa en la figura IV.5 (c).

\* **Unión con soldadura por extrusión o soldaduras de costuras dobles:** Consiste en la inyección del mismo polímero entre las placas solapadas que son precalentadas con aire caliente. Dichas soldaduras deben tener un ancho mayor o igual a 0.04 m., las sendas de cada soldadura deben ser mayores o iguales a 0.07 m.. Ver figura IV.5 (d).

Esta forma de unión, crea dos zonas de costura para los paneles solapados, dejando un canal intermedio, utilizado para la prueba de presión de aire. En la figura IV.4 (e), se ilustra.

Este último método de unión de las geomembranas in-situ, es el más recomendable por obtener una costura homogénea.

La evaluación de la integridad de las uniones en obra por medio de pruebas no destructivas y destructivas, es parte del control de la instalación de las geomembranas en campo.

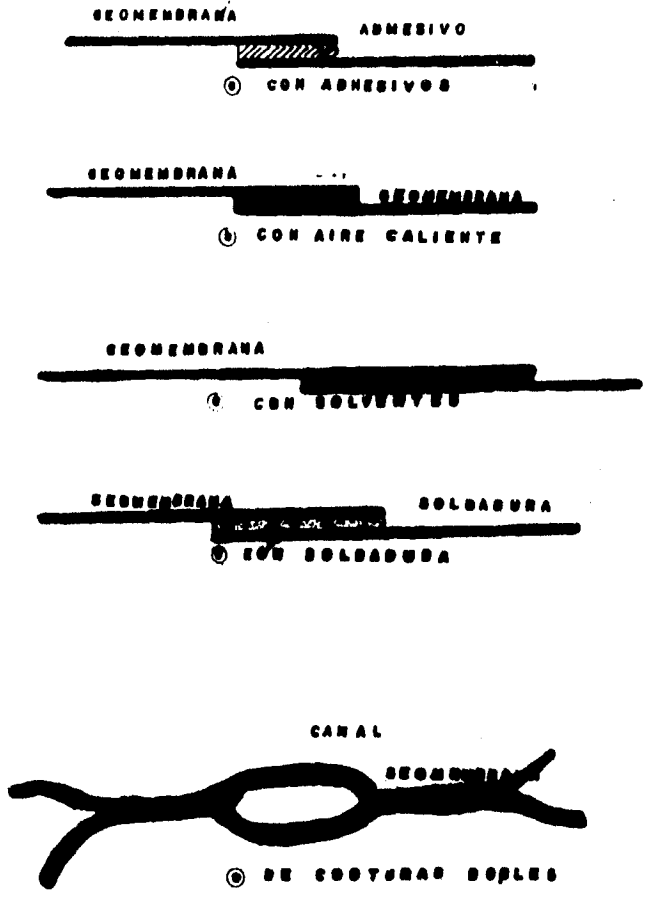
Las pruebas no destructivas se aplican a las uniones por extrusión o de costuras dobles, consisten en verificar el sellado de los empalmes, aplicando aire a presión dentro del canal que se forma en dicha unión, si después de cierto tiempo hay un decremento en tal presión (la cual se mide con un manómetro), se comprueba que hay fugas a lo largo de la unión y se procede a detectar y reparar tales anomalías.

Dicha prueba sólo muestra la impermeabilidad de las costuras, lo cual no es suficiente para garantizar un buen control de calidad de la instalación.

Las pruebas destructivas, consisten en desprender tramos de costuras o uniones con el fin de analizarlos en laboratorio en donde además de verificar el sellado, se prueba la resistencia al corte y a la separación.

No obstante las pruebas de campo para evaluar las uniones de los paneles de geomembranas, ésto no ha dejado de representar un problema, pues cualquier falla, disminuye la funcionalidad de las geomembranas; por ello los técnicos especialistas, recomiendan que se realicen la mayor cantidad de uniones en planta donde existen las condiciones óptimas para hacer este trabajo, las cuales no se tienen en campo.

FIG. IV.5 UNION DE GEOMEMBRANAS



Como ya se mencionó, la forma complementaria a la impermeabilización para efectuar el control del biogas en un sitio de disposición final de desechos sólidos, es mediante sistemas de extracción de biogas.

**b) Sistemas de extracción del biogas.**

Dichos sistemas se clasifican por su funcionamiento en canales de material permeable, pozos de operación pasiva y activa. Los cuales se describen de manera particular en los apartados correspondientes al control de biogas en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto.



#### IV. 1) CONTROL DE BIOGAS EN RELLENOS SANITARIOS.

En la tabla IV.4 se presentan las actividades requeridas por dicho control.

El control de biogas en rellenos sanitarios puede realizarse mediante la impermeabilización del sitio y a través de la construcción de sistemas de extracción.

Dichas acciones se pueden efectuar de la siguiente manera:

**TABLA IV.4**  
**SISTEMAS PARA EL CONTROL DE BIOGAS**

<b>SISTEMAS PARA EL CONTROL DE BIOGAS EN RELLENOS SANITARIOS</b>	<b>IMPERMEABILIZACION</b>	a) NATURAL b) ARTIFICIAL
	<b>VENTEO</b>	a) ZANJAS DE MATERIAL PERMEABLE b) VENTILAS DE MATERIAL PERMEABLE c) CAPTACION SUPERFICIAL d) POZOS DE OPERACION ACTIVA e) POZOS DE OPERACION PASIVA
	<b>INCINERACION</b>	a) QUEMADORES LOCALES SOBRE POZOS DE OPERACION ACTIVA O PASIVA
	<b>APROVECHAMIENTO</b>	a) POZOS DE OPERACION ACTIVA b) RED DE CAPTACION c) SISTEMA DE TRATAMIENTO
	<b>MONITOREO</b>	a) POZOS DE MONITOREO

#### **IV. 1.1.) IMPERMEABILIZACION DE UN RELLENO SANITARIO.**

Después de haber seleccionado el sitio para un relleno sanitario se llevan a cabo trabajos previos a la impermeabilización:

##### **a) Trabajos previos.**

###### *a.1) Preparación del piso del terreno:*

Cuando sea necesario, se debe realizar el desmonte, el despalme, en seguida la conformación, la compactación y la nivelación del terreno, dando pendientes de 3 a 5%. Para garantizar una superficie de contacto resistente y amortiguable, se puede colocar una capa base de al menos 0.20 m. de material impermeable que puede ser arena arcillosa, compactada al 90% de la prueba proctor estándar, lo cual normalmente se obtiene dando nueve pasadas con un compactador pata de cabra. Ver figura IV.6.

##### **b) Impermeabilización del piso.**

*b.1) Si se utiliza materia natural, se coloca una capa de arcilla mayor de 0.50 m. de espesor, compactada con maquinaria ligera (trator agrícola), en seguida una capa de al menos 0.20 m. de espesor de grava-arena bien graduada y finalmente una capa de 0.30 m. de arcilla compactada. Como se ve en la figura IV.7.*

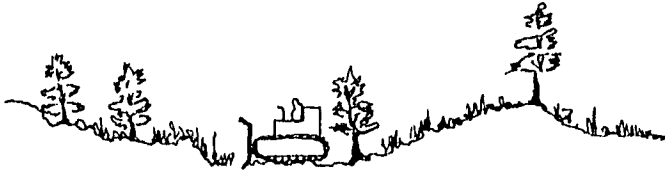
La desventaja de utilizar materiales naturales para la impermeabilización, es que no se pueden utilizar en las paredes del sitio cuando éste es una depresión (por ejemplo un socavón).

*b.2) Si la impermeabilización se pretende hacer con geosintéticos el procedimiento puede ser el siguiente:*

En orden ascendente se colocan las capas de geotextil, geomembrana y geotextil; formando algo a manera de sandwich, y una última capa de arena, como se observa en la sección, sirve para proteger a los geosintéticos de pinchaduras por objetos punzocortantes presionados por la maquinaria durante la operación. Ver figura IV.8.

El procedimiento para la instalación, se presenta de manera general en los siguientes puntos:

TRABAJOS PREVIOS A LA IMPERMEABILIZACION



DESMONTE



DESPALME Y NIVELACION



MEJORAMIENTO DE LA BASE

FIG . IV. 6

IMPERMEABILIZACION NATURAL DEL PISO



FIG. IV. 7

IMPERMEABILIZACION ARTIFICIAL DEL PISO

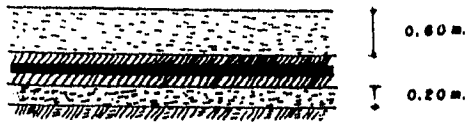
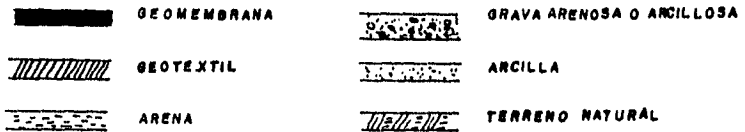


FIG. IV. 8



- Una vez preparado el piso con un colchón de 0.20 m. de arcilla compactada, se tiende el geotextil con el fin de darle mayor protección a la geomembrana (que en seguida se coloca) de posibles pinchaduras, así como para desalojar a los gases que se formen en el interior del relleno, evitando con ello el abolsamiento de la geomembrana.

- Posteriormente se coloca la geomembrana plástica cuya función principal es la de impermeabilizar como ya se mencionó.

Se recomienda que dicha geomembrana pueda adaptarse perfectamente al contorno del terreno, ésta puede ser de poliestireno o P.V.C.; además debe carecer de estrias, asperezas, perforaciones, burbujas, o cualquier otro elemento extraño que afecte las propiedades de la misma.

Las uniones de los paneles se pueden realizar mediante soldadura con extrusión con solapado.

- Se coloca la siguiente capa de geotextil, con el propósito también de proteger a la geomembrana de posibles pinchaduras provocados por materiales con ángulos cortantes que surgen al degradarse y asentarse los desechos sólidos.

- Finalmente, se tiende una capa de 0.60 m de arena limpia que además de proteger a los geosintéticos, sirva para drenar a los lixiviados.

- Si es posible, se unen previamente los tramos de la geomembrana hasta alcanzar las dimensiones requeridas.

Para asegurar la estabilidad de los materiales sintéticos (geotextil y geomembranas), sobre el piso del sitio, se pueden construir zanjas perimetrales de 0.60 m. x 0.60 m., en donde se anclan dichos geosintéticos, rellenando éstas con el material producto de la excavación de las mismas. Como se ilustra en la figura IV.9

#### **c) Impermeabilización de las paredes de sitio.**

En algunas ocasiones los sitios elegidos para construir rellenos sanitarios se encuentran en depresiones limitados por paredes naturales de material permeable, con fracturas que permiten la filtración horizontal del biogas, por ello es necesario colocar una pantalla

ANCLADO DE GEOSINTETICOS EN LA BASE

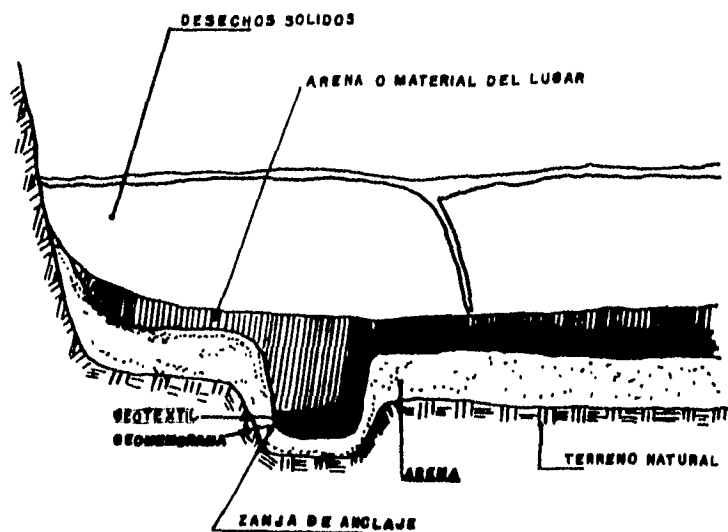


FIG. IV.9

aislante que mitigue dicha emigración horizontal hacia zonas no controladas. Como se muestra en la figura IV.10.

Esta impermeabilización puede ser a través de geosintéticos (geotextil, geomembrana y geotextil por ejemplo).

El procedimiento de instalación, puede efectuarse como se menciona en los siguientes puntos:

- Conocida las dimensiones de las paredes del sitio, se procede al desmonte cuando sea necesario, así como a quitar rocas salientes.

- Se colocan en las paredes o taludes, los materiales (geotextil, geomembrana, geotextil), fijándolos con anclajes mecánicos a cada 5.0 m., como el mostrado en la figura IV.4, dejando 1.0m. de sobra, a fin de poderse unir con el siguiente tramo.

Finalmente se anclan dichos geosintéticos en su extremo superior en zanjas previamente excavadas en la corona del talud. Como se observa en la figura IV.11.

#### **d) Impermeabilización de la superficie de la última celda.**

La superficie de la última celda se debe impermeabilizar para disminuir la cantidad de agua que se infiltra por la precipitación pluvial, así como para mitigar las emigraciones incontroladas de biogas.

La impermeabilización se puede llevar a cabo con material natural como el tepetate, colocando una capa de material de cubierta de 0.60 m. de espesor, compactada al 90% respecto a la prueba Proctor estandar.

Sin embargo cabe decir que el espesor de esta última capa está en función del uso final que se le pretende dar al sitio, es decir si va a ser un área jardinada, la capa de material se diseña en base al tipo de árboles y plantas que se van a colocar; de tal forma que la raíz no alcance a los desechos sólidos.

Si el sitio se va a ocupar para la construcción de canchas o estacionamientos, el espesor se basa en la estabilidad que requiera el piso, etc.. Véase figura IV.12.

IMPERMEABILIZACION EN LAS PAREDES  
DEL SITIO

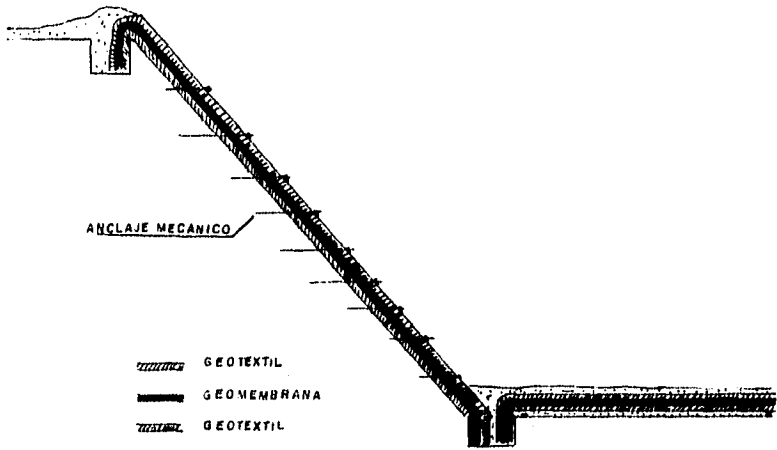
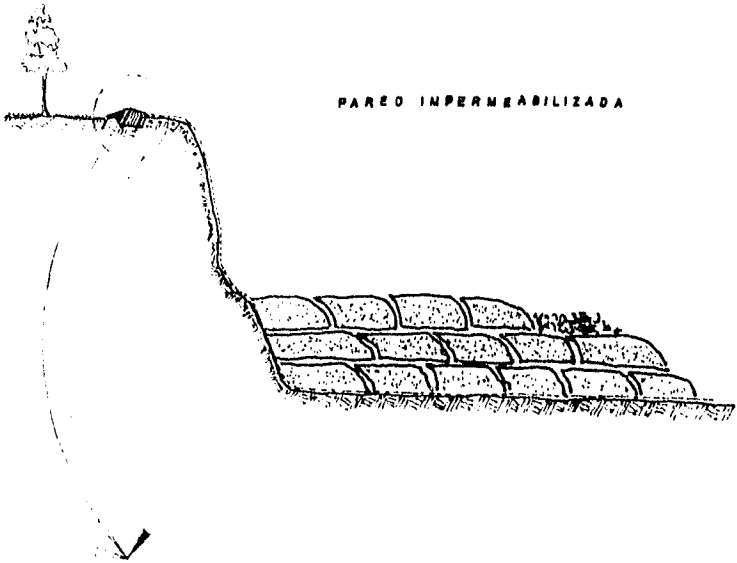


FIG. IV. 10



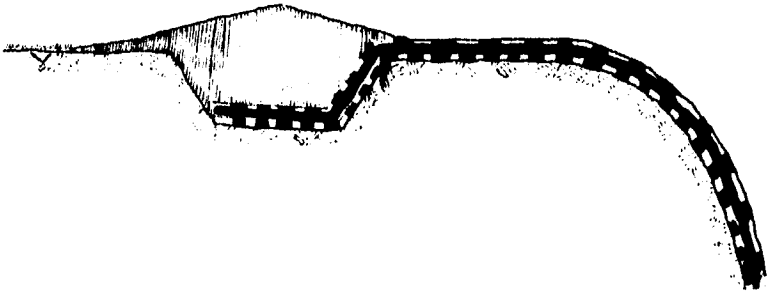
FIG IV.11 ANCLADO DE GEOSINTETICOS  
EN PAREDES



PAREO IMPERMEABILIZADA

MATERIAL DEL SITIO

GEOSINTETICOS



COBERTURA DE LA SUPERFICIE

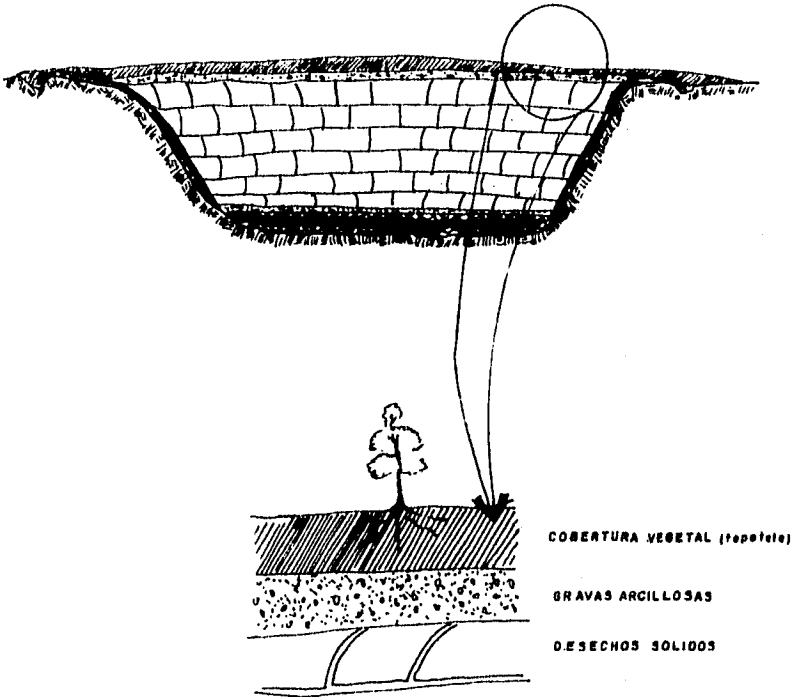


FIG. IV.12

Respecto a la utilización de materiales sintéticos, en este caso no es muy recomendable, pues debido a su eficiencia, tiende a sellar y por lo tanto la entrada de líquidos es muy baja o nula, lo que no es conveniente, pues como ya se mencionó en el inciso II.3.3, los desechos sólidos orgánicos confinados requieren de una cantidad de humedad (60 a 80% respecto a su peso) para biodegradarse, por lo que es necesario que reciban humedad, la cual se proporciona desde el exterior mediante la filtración del agua de lluvia.

Finalizando la impermeabilización del fondo del relleno sanitario, y las paredes, se procede a efectuar el confinamiento de los residuos sólidos mediante algún método de operación.

Como ya se mencionó, además de dicha impermeabilización, es necesario construir sistemas para la extracción del biogas ya sea para su uso, venteo o incineración, tanto en rellenos sanitarios como en tiraderos a cielo abierto.

Las características de dichos sistemas se especifican en los siguientes puntos:

#### **IV.1.2) SISTEMAS PARA EL VENTEO DEL BIOGAS EN RELLENOS SANITARIOS.**

Generalmente son conductos o pozos de dimensiones variables, habilitados con tubos y material permeable. Estos sistemas son construídos en toda el área del sitio de disposición final, a través de los estratos de residuos donde se genera el biogas; se utilizan para la extracción natural y desalojo hacia la atmósfera de dicho gas, disminuyendo su concentración en un lugar determinado y por lo tanto los riesgos que trae consigo.

Este control es recomendable entre otras condiciones, cuando no existen poblaciones cercanas al sitio (aprox. a 100 m.), o bien cuando el piso en donde se efectúa el confinamiento de los residuos sólidos esté impermeabilizado.

Los sistemas para el desalojo del biogas pueden ser obras muy sencillas como las que se describen en seguida:

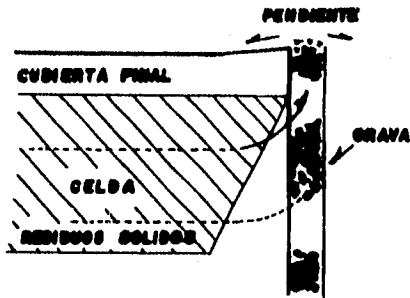
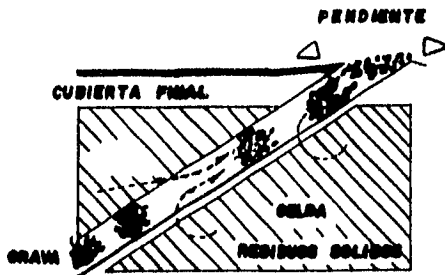


FIG IV.13.C ANALES DE MATERIAL PERMEABLE



#### **a) Canales de material permeable.**

Canales de 0.60 x 0.60 m.<sup>(36)</sup> aproximadamente, rellenos de grava o material permeable, como el tezontle, construídos en forma diagonal entre las celdas donde fluyen los gases, como se ve en la figura IV.13.

##### **a.1) Ventajas:**

- Su construcción es muy económica y sencilla ya que sólo se requiere colocar el material de manera simultánea a la disposición de los desechos, formando el canal hasta el nivel de la última celda.

##### **a.2) Desventajas:**

- Su construcción es para sitios que se controlan desde su inicio.
- El desalojo del biogas es a cielo abierto, aumentando la contaminación del ambiente, además de ser una fuente de ignición.
- Se requiere de una estricta supervisión en la construcción de dichos canales, de tal manera que no se pierda su continuidad durante la operación de la maquinaria pesada (empuje, compactación y cobertura de los desechos sólidos).
- El material que forma los canales es fácilmente arrastrado por el agua en época de lluvias, deformándose totalmente.

Debido a sus desventajas, no se ha adoptado de manera definitiva esta forma de desalojar el biogas.

#### **b) Ventilias de material permeable.**

Son estructuras que se desplantan desde el nivel de piso, utilizando como ademe una malla de alambre de gallinero, formando un cubo de 0.60 x 1.0 m.<sup>37</sup> en su base, el cuales relleno con material permeable, hasta llegar a la superficie de la última celda donde es adaptado un tubo de P.V.C., para el desalojo del biogas a la atmósfera. Como se muestra en la figura IV.14.

<sup>(36)</sup> SEDUE Manual de Rellenos Sanitarios, México, D.F., P.144

<sup>(37)</sup> Ibid. p.143

Para el ademe también pueden utilizarse materiales de desecho que ingresan al sitio de disposición final; por ejemplo tambos de 200 lts., ranurados en sus paredes, los cuales se van montando en forma vertical de acuerdo al nivel de la celda; o bien llantas inservibles.

#### **b.1) Ventajas:**

- Es muy económico pues el material utilizado para el ademe es de bajo o nulo costo como las llantas de desecho o los tambos.
- El sistema permite desalojar buena cantidad de biogas hacia el exterior.
- Su construcción es muy sencilla.

#### **b.2) Desventajas:**

- Igual que el anterior, sólo se aplica cuando se tiene el control del sitio de disposición final desde que se inicia, es decir que sea un relleno sanitario, donde se efectúan los trabajos de preparación previos al desplante.
- El desalojo del biogas es a cielo abierto.
- Se requiere de una estricta supervisión en la construcción de estas estructuras ya que son destruidas durante la operación de la maquinaria (empuje, compactación y cobertura de los de desechos sólidos).

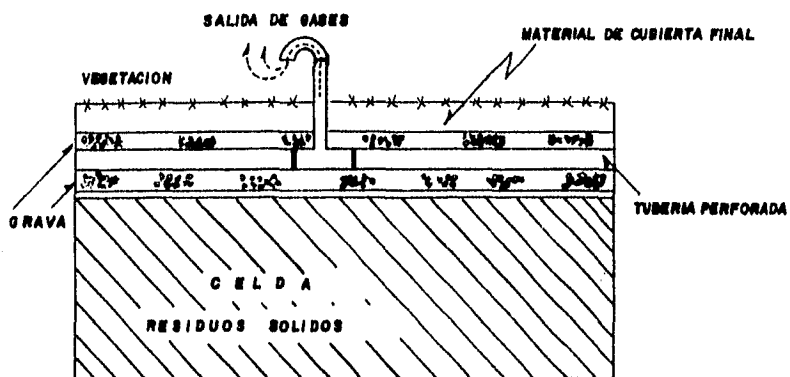
#### **c) Sistemas de captación superficial.**

Son líneas de tubos de P.V.C. de 8" (0.20 m) a 10" (0.25 m.) " de diámetro, perforados en sus paredes y tendidos en la última celda, éstos se acoplan a un tubo vertical el cual sale a la superficie con el fin de desalojar el gas captado. Como se ilustra en la figura IV.15.

#### **c.1) Ventajas:**

- Su construcción resulta fácil, ya que sólo se requiere tender en la superficie de la última celda una o dos líneas de ductos de diámetros entre 8" (0.20m.) y 10" (0.25m.), previamente perforados.
- Igual que los anteriores, su construcción es económica.

**SISTEMA DE CAPTACION SUPERFICIAL**



**FIG. IV. 15**



### **c.2) Desventajas:**

- No se logra captar el biogas generado en las celdas inferiores, provocando la migración horizontal de éste hacia zonas aledañas.
- Los ductos pueden ser destruidos por la maquinaria y vehículos que transitan.

Las modalidades antes mencionadas no cuentan con la eficiencia requerida para el desalojo del biogas, por ésto se han tomado sistemas utilizados en otros países (principalmente de Estados Unidos), los cuales se han adaptado de acuerdo a las condiciones de los sitios de disposición final de nuestro país.

Como ya se mencionó, existe el riesgo inminente de la inflamabilidad del gas metano y adicionalmente la presencia de componentes volátiles responsables directos de los olores desagradables de impacto severo a la salud, por lo que se ha adicionado un quemador a cada pozo que permite la oxidación de dichos compuestos volátiles y la eliminación de olores desagradables.

Estos sistemas son principalmente:

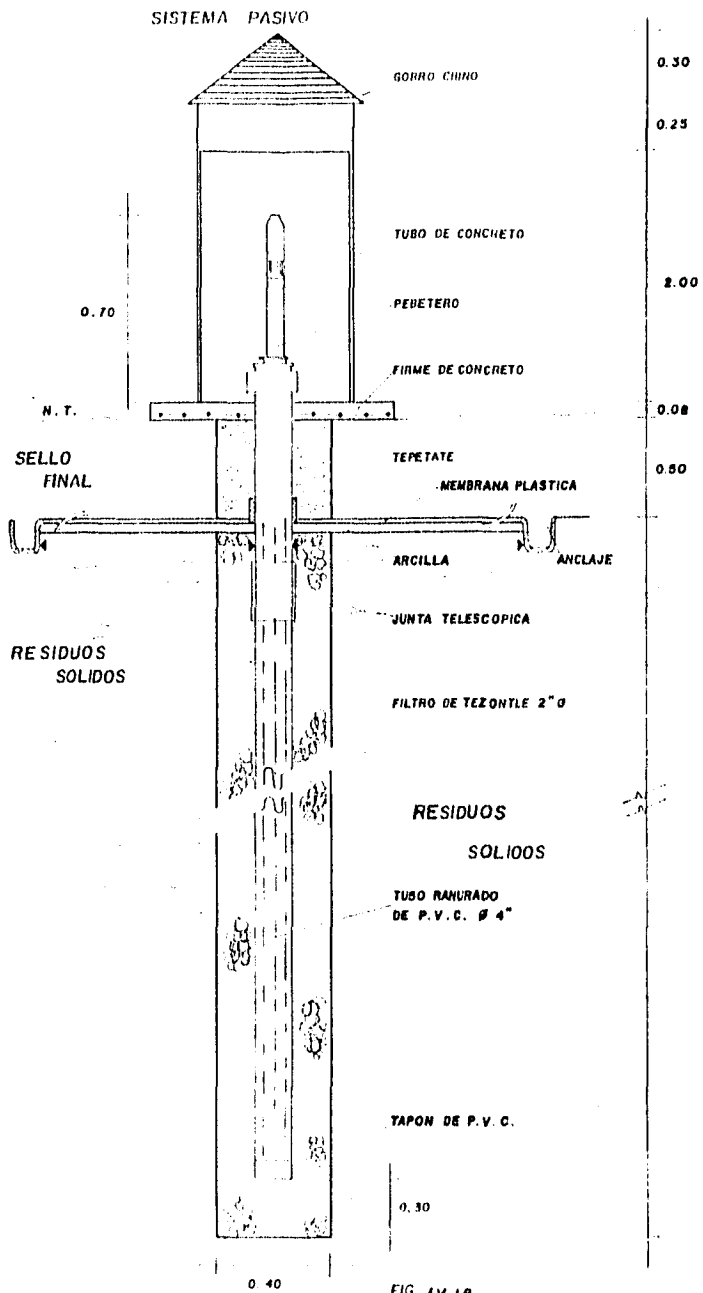
### **d) Pozos de operación pasiva.**

La extracción del biogas se realiza de manera natural, funcionan debido a las dos fuerzas que gobiernan su movimiento, es decir a la difusión y a los gradientes de presión.

Son pozos verticales de 0.40 a 0.60 m de diámetro,<sup>39</sup> perforados desde el nivel superficial de la última celda, hasta el nivel del fondo del sitio de disposición final; dichos pozos son equipados con material permeable (tezontle) y ductos ranurados de P.V.C., cuya función es captar el biogas generado entre los estratos que conforman las celdas.

En la parte superior del pozo se coloca un quemador para la incineración del biogas; este sistema se protege ya sea con una jaula metálica montada sobre un registro de tabique o cualquier otro tipo de estructura que lo proteja, como se menciona más adelante en el punto denominado sistemas para la incineración del biogas. Ver figura IV.16.

(39) Dirección Técnica de Desechos Sólidos D.D.F., México, D.F., "Estándar para la Construcción de Pozos de Extracción de Biogas", p. 6.



SISTEMA PASIVO PARA LA COMBUSTION DEL BIOGAS

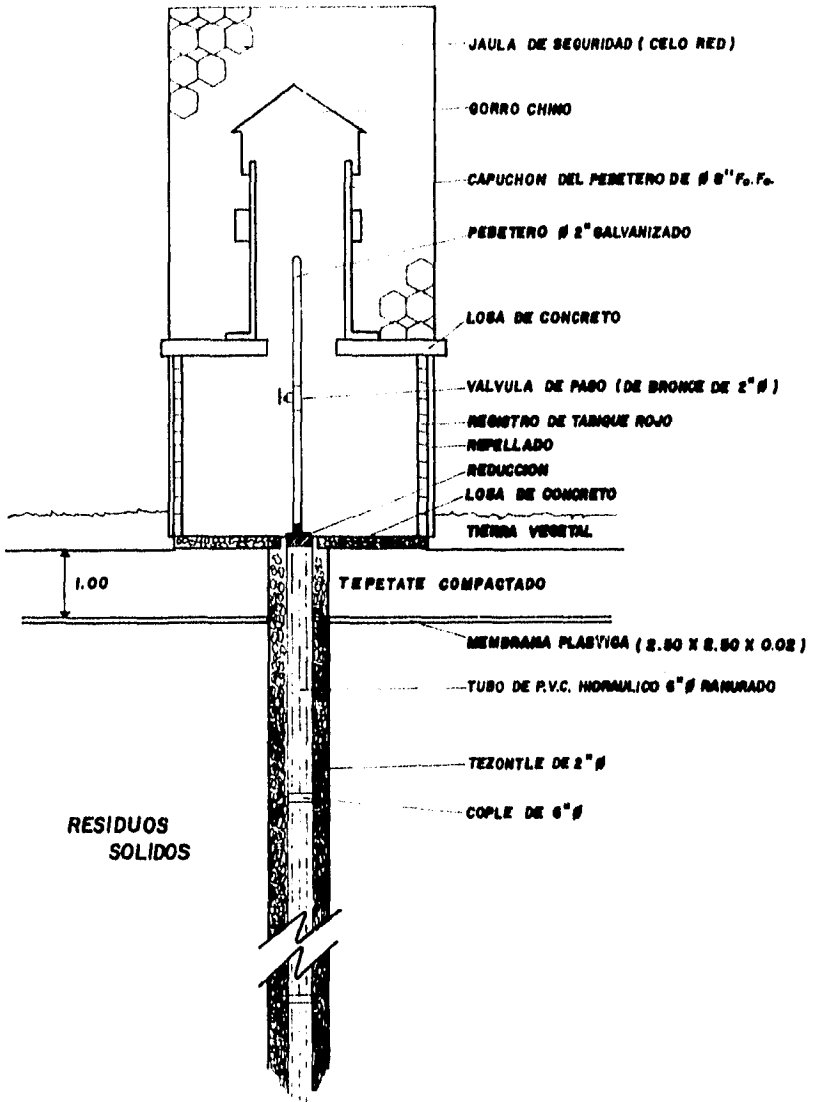


FIG. IV 16

#### **d.1) Ventajas:**

- Se logra captar una buena cantidad de biogas.
- Su construcción es fácil una vez que se ha logrado conformar el sello final del sitio.
- El mantenimiento de dichos pozos es sencillo.

#### **d.2) Desventajas:**

- El sistema pasivo, no garantiza una eficiencia total debido a que la presión del biogas es muy baja dentro de los estratos de residuos, haciendo que la velocidad del flujo sea muy variada dentro de los dispositivos de venteo y combustión.
- La incineración del biogas es interrumpida, ya que la flama del mechero tiende a apagarse por la variación en la presión del flujo, por lo que se debe revisar de manera constante que la flama se mantenga encendida, para evitar que el biogas se acumule en algún sitio cerrado provocando explosiones de alto riesgo.
- Su construcción requiere de una estricta y constante supervisión técnica durante todo el tiempo que demore, pues cuando no es bien construido e impermeabilizado dicho sistema; se presentan problemas de incendios, grandes asentamientos y fugas del biogas; provocando que la estructura de protección (normalmente un registro de tabique) se fracture y termine destruída.
- Se requiere de la realización de estudios geofísicos y topográficos, previos a su construcción incrementando su costo.
- La perforación y habilitación de los pozos deben ser realizados por técnicos con experiencia en operación de sitios de disposición final de desechos sólidos.

#### **d.3) Ejecución de la obra.**

La construcción del sistema por lo general se efectúa en los sitios de disposición final cuya vida útil ha llegado a su término, o bien en las zonas ya clausuradas, ya que la deficiente supervisión en las maniobras constantes que realiza la maquinaria pesada durante la operación del sitio, según el método que se esté utilizando (zanja, área o una combinación), afectan directamente a la infraestructura, destruyéndola.

Además el último nivel de las celdas debe estar definido para establecer las condiciones de la composición y volumen de los desechos sólidos depositados; datos utilizados entre otras aplicaciones, para la ubicación y dimensionamiento de la profundidad de los pozos.

Para la ejecución de dicha obra se deben realizar estudios previos a la construcción del sistema.

#### **d.3.1) Estudios previos.**

Comprenden los siguientes puntos:

- Reconocimiento físico del sitio por parte del personal técnico encargado para realizar un diagnóstico que incluya ubicación del sitio, accesos, descripción de problemas que impidan la construcción (estos pueden ser sociales, políticos, técnicos, etc.), dicha información permite tomar medidas preventivas antes de iniciar los trabajos; evitando conflictos que repercutan en el atraso y costo de la obra.
- Estudios de topografía, comprende la planimetría y altimetría de la zona clausurada para efectuar el proyecto en donde se especifican la ubicación de los sistemas de control de biogas.
- Estudios geofísicos para la investigación del espesor de los estratos que conforman los desechos sólidos confinados desde la superficie hasta el nivel el fondo, las fracturas, oquedades y estratigrafía del subsuelo. Con los resultados que se obtienen en estos estudios y los antes mencionados, se realiza el proyecto de elausura del sitio en donde entre otros aspectos, se especifican los sistemas para la extracción del biogas.

#### **d.3.2) Construcción del sistema.**

En base a las especificaciones técnicas, se procede a efectuar la construcción de los pozos, utilizando el siguiente equipo y material:

- Equipo de Topografía: Nivel, tránsito, estadales, plomada, longímetro, flexómetro, estacas, marro, etc.
- Perforadora montada sobre orugas con barrena helicoidal tricónica auxiliada mediante un compresor para la extracción del material, en ningún momento se debe utilizar agua para este fin ya que disminuye la capacidad de carga de los taludes provocando derrumbes.
- Planta generadora de energía eléctrica para el compresor utilizado en la extracción del material.
- Taladro.
- Pala manual.
- Carretilla.

- Tubería de P.V.C. hidráulico de 4" (0.10 m.) de diámetro.
- Válvulas, coples, tapones de 4" (0.10 m.) de diámetro, etc. de P.V.C. según el material que se esté utilizando.
- Material granular entre 2" (0.05 m.) de diámetro de condiciones permeables, puede ser tezontle o gravas bien graduadas. Dicho material se debe colocar en el espacio anular formado entre las paredes del pozo y el tubo captador, para evitar que el azolve del pozo se filtre y obstruya las perforaciones de éste.

#### **d.3.3) Perforación de los pozos:**

- La brigada de topografía debe ubicar en campo los puntos en donde se tengan que perforar los pozos de acuerdo al proyecto; indicando con señales visibles el lugar exacto.
- Se inicia la perforación de cada pozo con el equipo adecuado, el cual es elegido con la eficiencia necesaria para perforar sobre desechos sólidos.
- Las dimensiones de la perforación se especifican en el proyecto; sin embargo se recomienda que ésta alcance una profundidad de 75% del espesor total del estrato de desechos sólidos, con el objeto de captar la mayor cantidad de biogas.
- Terminado el pozo, se retira el material producto de la perforación con un traxcavo, o si se lleva a cabo en forma manual, con bieldo.
- Simultáneamente a la perforación se habilitan los tubos captadores del biogas.

#### **d.3.4) Habilitación de la Tubería. Se ilustra en la figura IV.17.**

- Se procede a barrenar la tubería, los barrenos se hacen de 0.10 m. de largo por 0.005 m. de ancho colocados en configuración "tresbolillo" sobre la superficie del tubo de P.V.C.
- Se arman los tubos captadores, uniendo si es necesario dos o más tramos con coples (las uniones deben quedar herméticamente selladas para evitar fugas), hasta alcanzar la longitud que debe ser igual a la profundidad total del pozo menos 0.30 m. que quedan libres entre el extremo inferior del tubo y la base de la perforación.
- Dichos tubos captadores una vez alcanzada su longitud, se deben sellar en sus extremos inferiores con tapones de P.V.C., para evitar la entrada de material que obstruya las ranuras y por lo tanto la captación del biogas.
- Con el fin de mitigar los daños de la estructura de protección, debido a los asentamientos provocados por la disminución del volumen de los desechos durante su degradación, se coloca una junta telescópica, entre el tubo captador, la cual funciona como un telescopio.

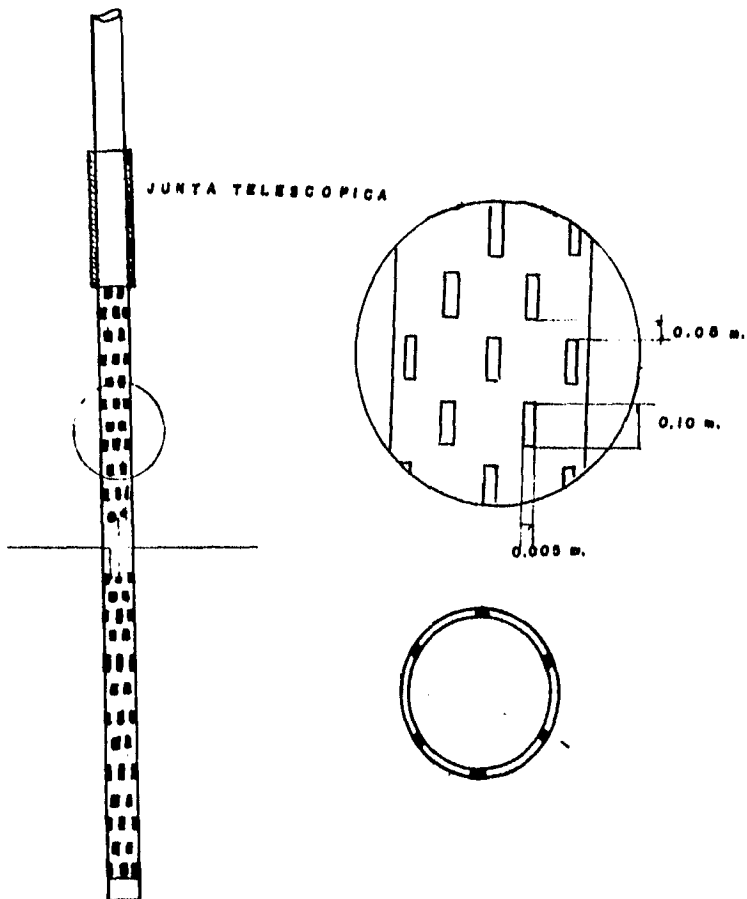
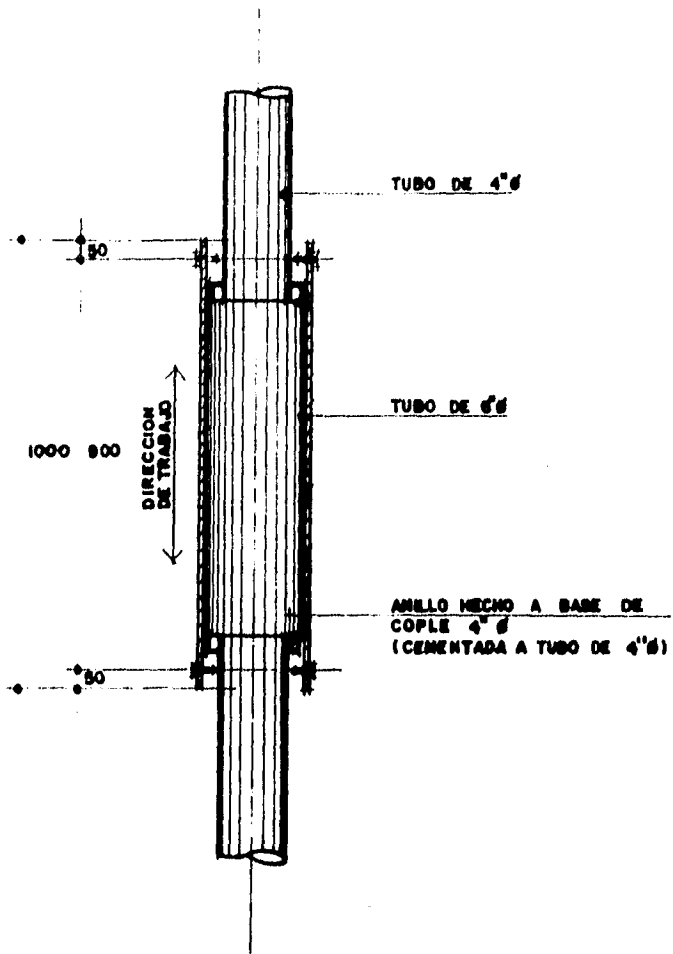


FIG. IV. 17. TUBO PARA EXTRACCION DE BIOGAS



## DETALLE JUNTA TELESCOPICA

FIG. IV. 18



La junta telescópica (figura IV.18), es un tramo de tubo de P.V.C. de 6" (0.15 m.), de diámetro por 1.0 m de longitud, que unido mediante reducciones y lubricantes al tubo captador, permiten que los asentamientos presentados entre la estructura y el estrato de desechos sólidos sea simultáneo.

#### **d.3.5) Equipamiento de los pozos.**

El equipamiento de los pozos debe llevarse a cabo en forma inmediata una vez que su perforación ha sido concluida, ya que de esta manera se evita el azolvamiento por los constantes derrumbes que suelen presentarse, teniendo que reperforarse dichos pozos, lo cual implica un incremento en su costo, además por sus dimensiones representan un grave peligro a quienes transitan por correr el riesgo de caer dentro.

- Se coloca dentro del pozo el material granular permeable hasta el nivel especificado, checando los niveles de manera constante.
- Se introduce el tubo captador previamente habilitado, para ello se puede utilizar la pluma de la máquina perforadora.
- En el extremo superior del tubo captador se une un pebetero.
- Se coloca en el espacio anular entre el pozo y el tubo captador el material granular hasta un nivel especificado, continuando con material impermeable como la arcilla hasta llegar al nivel -0.50 m. respecto al nivel superficial de terreno.
- En dicho nivel (-0.50), se coloca una membrana de polietileno de 3.0 x 3.0 m. anclada en una zanja perimetral de 0.40 de ancho x 0.40m. de altura, impermeabilizando el área perimetral del pozo para evitar la migración del biogas hacia la superficie.
- Encima de la membrana, se coloca una capa de 0.50 m. de arcilla compactando con un pisón de mano o si es posible con un rodillo liso.
- Colocados el tubo captador y el pebetero, se levanta en el perímetro de éstos una estructura de protección (registro y jaula), que además sirve de apoyo al capuchón del pebetero.

La estructura de protección puede ser de cualquier forma geométrica y de preferencia construido con material refractario.

Esta estructura se puede adaptar con un tubo de concreto (colector de aguas residuales), de 2.44 m de diámetro x 2.0 m. de altura, colocado en forma vertical sobre cada pozo, también puede ser un registro de tabique sobre el cual se coloca una jaula metálica (colored) para evitar el acceso de personas no autorizadas.

El registro de tabique, (figura IV.19), se contruye de acuerdo a los siguientes puntos:

- Se desplanta una losa de cimentación de concreto armado de 2.0 x 2.0 x 0.30 m. de espesor.
- Sobre ésta se levanta un registro de 2.0 x 1.20 x 0.90 m. de altura, con muros de tabique de 0.14 m. de espesor, reforzando con castillo de 0.30 x 0.30 m. en las cuatro esquinas, donde se coloca una tapa de concreto  $F'c = 150 \text{ Kg./cm}^2$  armado con malla electrosoldada 6 x 6 - 10/10, con un orificio central en donde se aloja el pebetero con su capuchón.
- Se monta sobre el registro una jaula de celored de 1.20 x 1.20 m., de calibre 12, la cual protege al quemador y evita el acceso de personas no autorizadas.
- Se realizan de manera opcional los acabados como es el repellido y la pintura sobre dicha estructura.

El pebetero se describe en el apartado correspondiente a los sistemas de incineración de biogas.

Es importante enfatizar que las uniones que se hagan a lo largo de todo el tubo captador, deben estar herméticamente selladas para evitar fugas de biogas que al encenderse destruyan la estructura.

#### **d.3.6) Mantenimiento de los pozos de operación pasiva.**

En el mantenimiento de cualquiera de los sistemas, es importante considerar las siguientes actividades.

- Detección y reparación de fugas en toda la instalación (ductos, válvulas, etc.).
- Renivelación de los pozos de biogas, ya que éstos tienden a hundirse debido a los asentamientos generados por la degradación de los residuos sólidos, no obstante contar con una junta telescópica.
- Reconstrucción de los registros que son destruidos por los vehículos o maquinaria pesada.
- Desazolvar de manera constante (por lo menos cada mes) los ductos captadores del biogas; utilizando un malacate o algún sistema de succión.

# PROTECCION DE CELO - RED

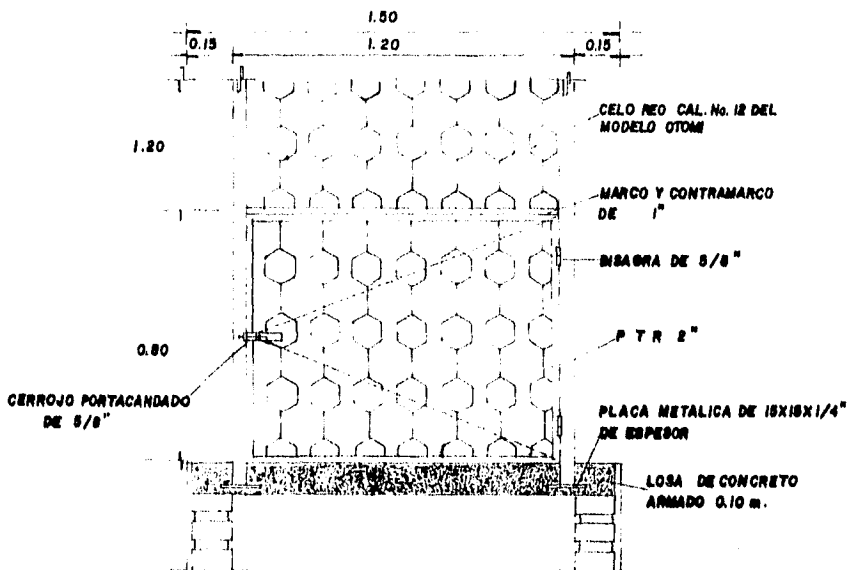


FIG. IV. 19

- Cuando los registros o protecciones son de algún material metálico, se recomienda mantenerlos con pintura para evitar la corrosión provocada por la humedad y el ácido sulfhídrico del biogas.
- Cuando el biogas se incinera, se debe vigilar de manera constante que la flama del pebetero se mantenga encendida.

#### **e) Sistemas de extracción activa.**

Son pozos perforados a través de los estratos que conforman los residuos sólidos, dichos pozos son habilitados y equipados con un sistema de bombeo para extraer el biogas a la atmósfera o hacia un quemador para su incineración. El sistema se ilustra en la figura IV.20.

La construcción de los pozos tiene las mismas características que los pozos pasivos, excepto que el espesor del material de sello es mayor (de 0.50 m en el sistema pasivo a 1.0 m. en el activo) y la parte ranurada o perforada del tubo para la captación se encuentra a un nivel más profundo respecto a la superficie.

El tubo captador de cada pozo se conecta hacia un mecanismo de extracción, el cual controla la migración del biogas mediante una presión negativa conduciéndolo hacia el quemador para su combustión o hacia una red de captación.

#### **e.1) Ventajas:**

- Esta forma de extracción es ideal para el establecimiento de un sistema de aprovechamiento del biogas, principalmente como una fuente de energía.
- Es recomendable para el control de gases en un sitio de disposición final además de ser una de las mejores opciones cuando se tienen problemas de migración hacia las zonas colindantes.

#### **e.2) Desventajas.**

- Su construcción representa un costo excesivo, aproximadamente más del 100% del costo del sistema pasivo, debido al equipo mecánico adicional para la extracción.
- Requiere de una estricta y constante supervisión técnica durante todo el tiempo que demore su construcción ya que cuando dicho sistema no es bien construido e

SISTEMA ACTIVO

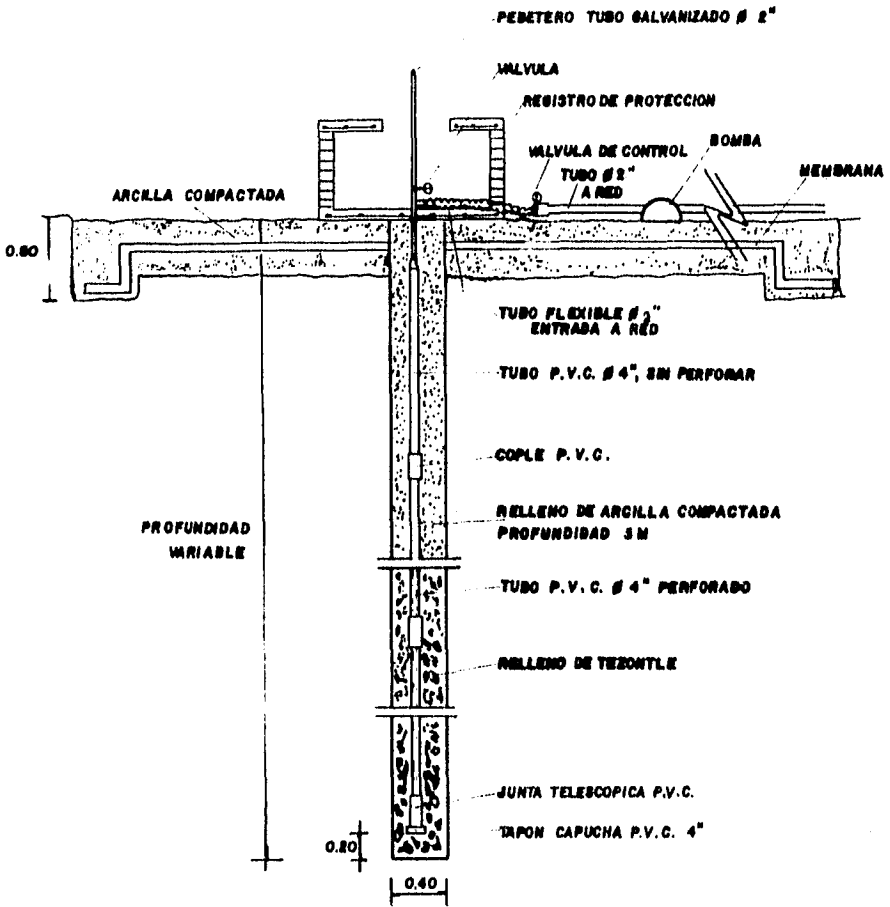


FIG. IV. 20

impermeabilizado, se presentan problemas de incendios, grandes asentamientos y fugas de biogas, provocando que la estructura se fracture y termine totalmente destruída.

- En base al punto anterior, se debe contar con experiencia técnica para efectuar los trabajos de perforación y equipamiento de dichos pozos.

- Todas las actividades que impliquen su construcción (estudios previos, perforación y equipamiento de los pozos), generalmente se efectúan una vez clausurada cada celda.

- Para su construcción se debe contar con estudios previos de geofísica y topografía; lo cual incrementa su costo.

### **e.3) Ejecución de la obra:**

La obra debe considerar: estudios previos a la construcción del sistema.

#### **e.3.1) Estudios previos.**

Son los mismos que se mencionan en el sistema pasivo.

#### **e.3.2.) Construcción de los pozos de operación activa.**

El equipo, herramientas y materiales para la obra civil, es semejante al descrito en el sistema pasivo; respecto al equipo utilizado para la extracción forzada del biogas, éste puede ser un sistema de bombeo para presiones bajas el cual se debe seleccionar en base al gasto (lts./hora.) un ejemplo es la bomba de vacío de pistón. accionada por un motor el cual tiene que ser alimentado en la mayoría de los casos por una planta de energía.

Los materiales para la obra civil de este sistema son los mismos que en el sistema pasivo.

Para la instalación mecánica se requieren:

Sistema de bombeo o soplador, motor para accionar el sistema de extracción, planta de energía eléctrica, válvulas de control, etc.

#### **- Perforación de los pozos.**

El proceso para la perforación de los pozos de operación activa, es igual que para los pozos de operación pasiva.

- **Habilitación de la tubería.** Se ilustró en la figura IV.19.

La habilitación de la tubería para la captación del biogas se puede llevar a cabo de acuerdo a los siguientes puntos:

- El ranurado de la tubería se inicia después de dejar un tramo liso dos veces mayor que en el sistema pasivo y a un nivel más profundo respecto a la superficie, además de que en este caso se acopla una entrada para la conexión del mecanismo de extracción.
- El tubo captador de cada pozo se une en su extremo superior mediante una línea de conexión (puede ser un tubo flexible) hacia un mecanismo de extracción, el cual controla la migración del biogas mediante una presión negativa conduciéndolo hacia el quemador para su combustión o hacia una red de captación.

- **Equipamiento de los pozos.**

- El equipamiento de los pozos tienen las mismas características que los pozos pasivos, excepto que el espesor del material de sello es mayor (de 0.50 m. en el sistema pasivo a 1.0 m. en el activo).

Esta diferencia obedece a la necesidad de evitar la entrada de aire al sistema, debido a que está bajo presión.

### **e.3.3) Mantenimiento de los pozos de operación activa.**

Se deben considerar los mismos puntos mencionados para el sistema pasivo; adicionando el mantenimiento que requiere el equipo mecánico de extracción (equipo de bombeo, válvulas, conexiones, etc.).

### **f) Sistema Activo-Pasivo.**

El sistema activo-pasivo es un conjunto de tres pozos equidistantes e interconectados para la extracción del biogas generado en una zona del sitio de disposición final de desechos sólidos; estos pozos pueden estar conectados a una red de captación para conducir al biogas hacia alguna planta de tratamiento y posterior aprovechamiento o bien para su combustión en un quemador o sólo para ser venteadado. (Un esquema se vé en la figura IV.21.

SISTEMA ACTIVO — PASIVO

6.00

6.00

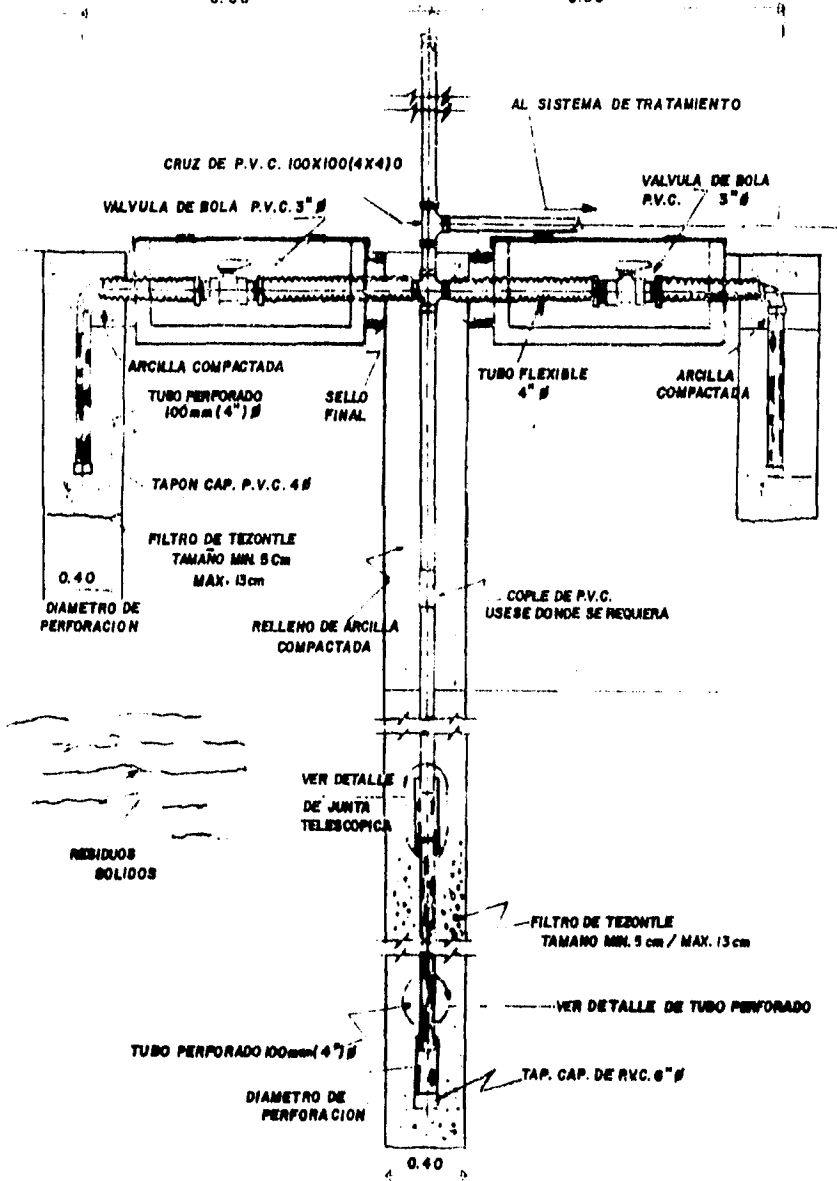


FIG. IV. 21



### **f.1) Ventajas:**

- Se logra el control del biogas con mayor eficiencia.
- El sistema puede trabajar de manera activa o pasiva según se requiera.
- Es una de las mejores opciones cuando se tienen problemas de migración en sentido horizontal hacia las áreas colindantes.
- Es ideal para el establecimiento de un sistema de aprovechamiento del biogas.

### **f.2) Desventajas.**

- El costo de su construcción respecto a las opciones antes mencionadas es el más elevado.
- Al igual que en el caso del sistema activo, su proyecto requiere de estudios y trabajos previos de topografía y geofísica, lo cual incrementa su costo.
- Su construcción también debe supervisarse de manera estricta por personal técnico especializado.
- Una vez terminada la obra, se debe dar el mantenimiento constante de toda la instalación.
- Así como los pozos antes descritos, la construcción de este sistema, generalmente se ha efectuado una vez clausurada totalmente la obra y no antes, debido a que son destruidos durante las maniobras de la maquinaria, por ello se requiere una estricta supervisión en la operación del sitio.

### **f.3) Ejecución de la obra:**

La construcción de los sistemas de operación activa-pasiva implica los siguientes conceptos: estudios previos y construcción de los pozos.

#### **f.3.2) Construcción de los pozos.**

##### **- Equipo.**

El equipo que se utiliza para la obra civil es igual al descrito en el sistema pasivo; respecto al equipo utilizado para la extracción forzada del biogas, éste puede ser semejante al mencionado en el sistema activo, es decir un sistema de bombeo para

presiones bajas como la bomba de vacío de pistón líquido accionada por un motor, alimentado en la mayoría de los casos por una planta de energía.

#### **- Materiales.**

Los materiales para la obra civil de este sistema son los mismos que en sistema pasivo.

Para la instalación mecánica: sistema de bombeo o soplador, motor para accionar el sistema de extracción, planta de energía eléctrica, válvulas de control, etc.

#### **- Perforación de los pozos.**

· Se repiten las actividades mencionadas en el sistema pasivo, con la diferencia de que en esta ocasión se construyen tres pozos alineados y separados de manera equidistante (aproximadamente 6.0 m) y de profundidades diferentes.

· Se perforan los tres pozos con un diámetro de 0.40 m. cada uno; el pozo central a una profundidad igual al 75% del espesor del estrato de residuos confinados y los dos pozos de los extremos a una profundidad aproximada de 1/2 de la profundidad del pozo central.

#### **- Habilitación de la tubería.**

Las actividades correspondientes a este concepto se repiten de igual manera que las descritas en el sistema pasivo.

· La longitud de los tubos captadores se miden a partir del nivel del terreno natural hasta alcanzar la longitud que debe ser igual a la profundidad total del pozo menos 0.30 m. que quedan libres entre el extremo inferior del tubo y la base de la perforación.

#### **- Equipamiento de los pozos.**

El equipamiento de los tres pozos también se debe hacer inmediatamente después que su perforación ha sido concluida, dicha actividad es semejante al descrito en el sistema pasivo, con la diferencia que en este caso se equipan de manera simultánea los tres pozos, interconectándose mediante un ducto del mismo diámetro para lo cual se utilizan coples, codos, etc.; dejando una preparación en este ducto para la conexión de una red de conducción.

- Se coloca dentro de los tres pozos el material granular permeable hasta el nivel especificado.
- Se introducen los tres ductos, habilitados como se menciona en el sistema pasivo, concluyendo el equipamiento de los pozos.
- Se interconectan los pozos a través de una zanja de 0.50 m. de altura por 0.60 m. de ancho, en donde se coloca un ducto colector para que capte el gas de los tres pozos, este ducto se instala, mediante codos, coples, tees, etc., y en él se colocan válvulas para controlar la salida del biogas.
- Realizada la conexión de los pozos, se cubre la superficie, colocando una capa de 0.30 m. de espesor de material arcilloso, en seguida para impermeabilizar la zona de los pozos se coloca una membrana de polietileno de alta densidad anclada en una zanja perimetral de 0.40 m. de ancho x 0.40 m. de profundidad.
- Para terminar de cubrir la zanja se tiende una capa de tepetate hasta el nivel superficial, compactando con un pisón de mano; concluyendo de este manera la habilitación del sistema.

Si el gas captado se va a incinerar, se coloca un pebetero en el pozo central; si se va a utilizar, se conecta el pozo hacia una red para conducirlo a su tratamiento y posterior aprovechamiento.

- Terminado de construir el sistema, se coloca una estructura que lo proteja, la cual se describió en el sistema pasivo.

Se realiza de manera opcional la aplicación de pintura y el repellado sobre dicha estructura.

#### **g) Sistemas para la incineración del biogas en rellenos sanitarios.**

Antes de mencionar el tipo de quemadores que pueden utilizarse para la combustión eficiente del biogas en los sitios de disposición final de desechos sólidos, cabe decir que actualmente en México, los quemadores que se han utilizado para tal fin, constan de un mechero construído con un tubo galvanizado de 1 1/2" (0.04 m) a 2" (0.05 m) de diámetro, protegido con un capuchón de forma cilíndrica de aproximadamente 10" (0.26 m.) de diámetro.

Estos mecheros son básicamente tubos abiertos sin ningún dispositivo para segurar el mantenimiento constante de la flama, además de que carecen de los accesorios de control

y protección; son afectados por los vientos, por lo que no se pueden considerar como infalibles ni eficaces para la combustión del biogas, pero son expeditos y económicos para la eliminación de grandes volúmenes de éste. Se colocan sobre cada uno de los pozos. La figura IV.22. muestra este tipo de quemador.

Como se mencionó, estos quemadores han resultado poco eficientes, debido a que carecen de los accesorios necesarios para elevar y mantener adecuadamente la temperatura de la mezcla aire-gas para que pueda llevarse a cabo la oxidación de los desechos combustibles gaseosos.

Dichos accesorios o mecanismos necesarios para llevar a cabo una combustión completa y adecuada a las necesidades específicas del proceso (tales como rango de operación, estabilidad, forma adecuada de la flama), se agrupan en los tres conjuntos generales siguientes:

*g.1) Conjunto de combustión:* Comprende el equipo necesario para efectuar la operación de combustión pura, e incluye al propio quemador, mezclador aire-gas, ventilador, válvulas de ajuste y reguladores de presión.

*g.2) Conjunto de control:* Comprende las válvulas e instrumentos de medición; como requisito del mismo ya que debe mantener la relación aire-gas constante en todo el rango de operación.

*g.3) Conjunto de protección:* Es una parte vital en todo sistema de combustión, está constituido por válvulas de seguridad, pilotos, válvulas de paso.

Los quemadores puede clasificarse en abiertos y sellados.

Los primeros mezclan parcialmente el aire y el gas en su sistema de mezclado, por lo que requieren de un suministro de aire secundario que usualmente se toma del ambiente en los alrededores de la flama para tener la combustión completa.

Los segundos son de tiro forzado y no requieren de suministro de aire secundario.

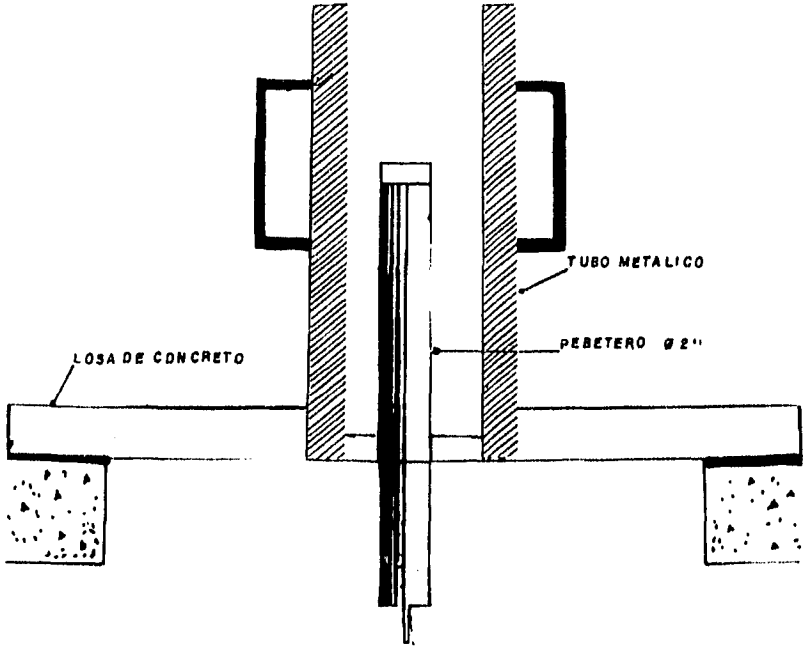


FIG. IV. 22

TABLA IV.5

RECOMENDACIONES SOBRE DIAMETROS DE  
TUBERIAS DE CONDUCCION DE BIOGAS \*

FLUJO m <sup>3</sup> /h	25 m.	50 m.	100 m.	> 150 m.
16	1/2"	primeros 25 m.: 3/4" resto : 1/2"	3/4"	3/4"
24	1/2"	3/4"	3/4"	primeros 100m.: 1" resto:3/4"
32	3/4"	1"	3/4"	primeros 100m.: 1" resto:3/4"
48	3/4"	3/4"	primeros 75m.: 1" resto: 3/4"	1"
64	3/4"	1"	primeros 50m.: 1 1/2" resto: 1"	primeros 100m.: 1 1/2" resto: 1".

(40) ANN K. DHUSCA. DESIGNING BIOGAS DISTRIBUTION SYSTEM BIONERGY. RENEWS 2.1983

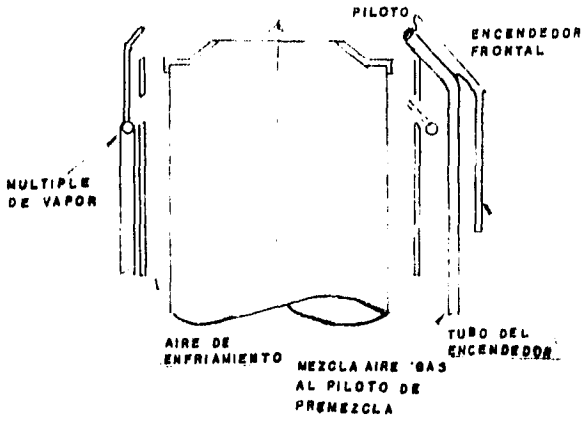


FIG. 1V. 23

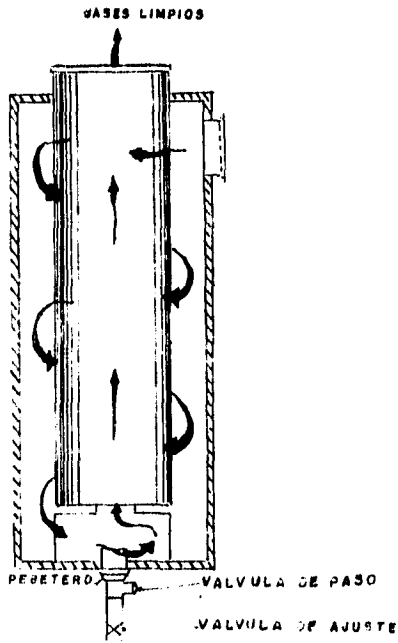


FIG. 1V. 24

En las figuras IV.23 y IV.24 se presentan algunos esquemas de quemadores y pebeteros para la incineración del biogas generado en un sitio de disposición final de desechos sólidos.

#### **h) Sistemas para el aprovechamiento del biogas en rellenos sanitarios.**

El sistema tiene como objetivos disminuir los impactos negativos hacia el ambiente y preparar al biogas para su utilización.

Dicho sistema consta de: pozos de extracción activa o activa-pasiva, red de conducción, equipo de tratamiento y distribución el cual depende del tipo de aprovechamiento.

##### **h.1) Pozos de extracción activa o activa-pasiva.**

Dichos pozos ya han sido descritos, sin embargo cabe repetir que debido a la forma de extracción, estos sistemas logran extraer un mayor volumen de biogas.

##### **h.2) Sistemas de Conducción del biogas.**

Los pozos son unidos a una red de conducción, que consisten en un arreglo de ductos de P.V.C. o de acero inoxidable, el cual se conecta a un sistema de succión mecánica, donde la extracción del biogas se efectúa con la ayuda de un soplador o sistema de bombeo, el cual es colocado a un nivel más alto que la red, con el fin de facilitar que el condensado drene en sentido contrario al flujo del biogas, conduciendo al mismo hacia el sistema de tratamiento y posterior utilización. Como se muestra en la figura IV.25.

Las dimensiones de la red dependen del flujo de gas que se desea transportar y de la distancia por recorrer.

En la tabla IV.5, se presentan los diámetros de tuberías de acero inoxidable recomendados, según las dos condiciones (distancia y flujo) de diseño.



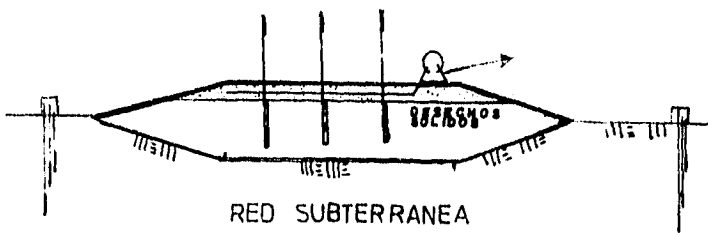
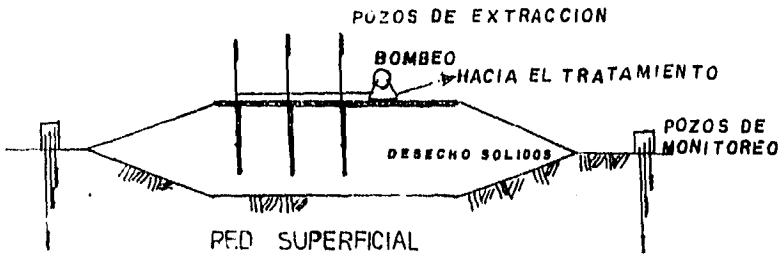
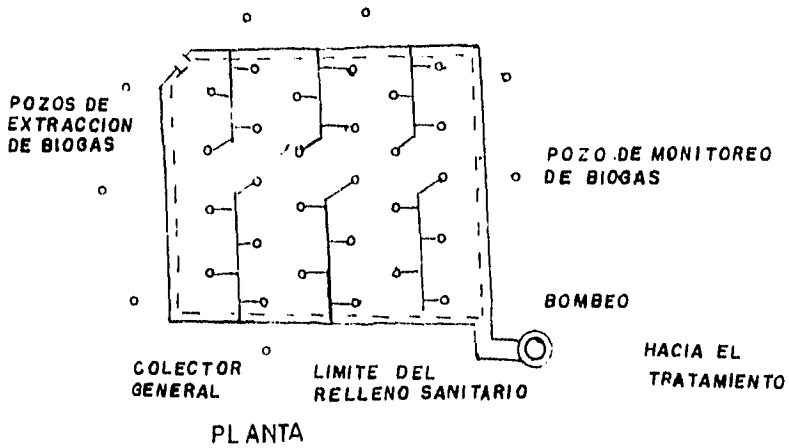


FIG. IV.25 RED DE CONDUCCION

Sin embargo, cabe decir que la tubería más recomendada en proyectos de aprovechamiento de biogas ha sido la de P.V.C. de 2" (0.05 m.) de diámetro, por su bajo costo y resistencia a la corrosión.

La instalación de la red puede colocarse subterránea o superficial:

**h.2.1)** El sistema subterráneo, consiste básicamente en tender la tubería en una zanja (de profundidad mínima a 0.60m. ") la cual se rellena con arena.

Dicha instalación subterránea tiene la ventaja de disminuir el riesgo de ser dañada por acciones de vandalismo, a pesar de dificultar su mantenimiento.

**h.2.2)** La red superficial consiste en colocar sobre el nivel de terreno natural la instalación, y tiene la ventaja de facilitar el mantenimiento y la detección de fugas; sin embargo el uso propuesto para el sitio se ve limitado.

El sentido de la red ya sea subterránea o superficial, debe ir de los puntos bajos a los puntos de mayor altura para favorecer el flujo natural y reducir la potencia necesaria para la extracción del biogas; ésto facilita el adecuado drenaje y la conducción de los condensados en el interior de la red de captación.

Se debe dar gran importancia a la conexión entre el pozo de extracción y la red principal de conducción de biogas, ya que el ensamble de estos dos componentes debe atenuar los efectos de los asentamientos diferenciales en la conexión del pozo de extracción y la red, así como contar con los dispositivos adecuados para la toma de muestras del biogas extraído y la adaptación de sistemas de monitoreo.

### **h.3) Equipamiento mecánico para el tratamiento del biogas.**

Este punto se trata en el capítulo V, denominado "Alternativas de aprovechamiento del biogas".

---

(41) Becerril Diego Orestes. *Manual del Instalador de Gas L.P.*: p.33.

#### **IV.2) CONTROL DEL BIOGAS EN TIRADEROS A CIELO ABIERTO.**

Generalmente los tiraderos a cielo abierto en donde se depositan de forma incontrolada grandes volúmenes de todo tipo de desechos, se inician de manera clandestina en lugares como barrancas, minas abandonadas, etc., impactando de manera alarmante al medio físico por las emanaciones como el biogas el cual emigra en sentido horizontal y vertical.

Las acciones que generalmente se efectúan para el control del biogas en tiraderos a cielo abierto, se mencionan en los proyectos correspondientes a la clausura del sitio.

Este consiste entre otras actividades en especificar la forma de llevar a cabo el saneamiento superficial, que consiste en conformar, compactar y cubrir los desechos existentes; así como a equiparlo con sistemas para mitigar la emigración de líquidos y biogas.

En estos sitios la estimación del volumen de biogas que se genera, es difícil de calcular, debido a que gran parte de la fracción orgánica contenida en los desechos sólidos se ha estabilizado; y por otro lado, casi siempre se desconocen los antecedentes del sitio como: la edad del tiradero, el tipo de residuos depositados, el tipo de suelo de la región (en referencia a la permeabilidad), las fracturas y oquedades, principalmente.

Entre algunas medidas que generalmente se aplican para el control de biogas en tiraderos a cielo abierto, están la impermeabilización del sitio y la construcción de sistemas de extracción natural o por bombeo de dicho biogas, lo cual depende del manejo que se le va a dar.

Por lo anterior se ha considerado que los sistemas que se deben construir para el control del biogas en tiraderos en proceso de clausura, son los que se presentan en la tabla IV.6.

TABLA IV.6

<b>SISTEMAS PARA EL CONTROL DE BIOGAS EN TIRADERO A CIELO ABIERTO</b>	<b>IMPERMEABILIZACION</b>	a) NATURAL b) ARTIFICIAL
	<b>VENTEO</b>	a) POZOS DE OPERACION ACTIVA b) POZOS DE OPERACION PASIVA
	<b>INCINERACION</b>	a) QUEMADORES LOCALES
	<b>APROVECHAMIENTO</b>	a) POZOS DE OPERACION ACTIVA b) RED DE CAPTACION c) SISTEMA DE TRATAMIENTO
	<b>MONITOREO</b>	a) POZOS DE MONITOREO

**IV.2.1) IMPERMEABILIZACION DE UN TIRADERO A CIELO ABIERTO.**

Generalmente es muy difícil impermeabilizar el piso de estos sitios por encontrarse totalmente cubierto con los enormes volúmenes de residuos ya confinados; sin embargo en algunos casos es posible llevar a cabo ésta en los taludes o paredes de las barrancas donde existe el tiradero, disminuyendo la emigración horizontal.

Dicha impermeabilización se realiza normalmente con materiales sintéticos, llevando a cabo el desmonte y el desalojo de materiales punzocortantes (rocas) cuando sea posible, evitando que los materiales sintéticos se dañen.

Como ya se mencionó, el anclado del geotextil en los taludes o en las paredes del sitio, se debe efectuar colocando anclajes mecánicos a cada 5.0 m., dejándose 1.0 m. de sobra, a fin de poderse unir con el siguiente tramo. Haciendo lo mismo con la geomembrana.

Como ya se mencionó, además de dicha impermeabilización, es necesario construir sistemas para la extracción del biogas.

Las características de éstos sistemas se especifican en los siguientes puntos

#### **IV.2.2) SISTEMAS PARA EL VENDEO DEL BIOGAS.**

Cabe mencionar que en los tiraderos que se han clausurado en México, la extracción del biogas se realiza de manera natural, a través de sistemas de operación pasiva, lo cual no es recomendable, debido a que dicho sistema sólo desaloja el biogas que se logra introducir en el ducto del sistema, presentándose grandes fugas hacia zonas no controladas. Por tal motivo se recomienda que éstos sistemas sean de extracción forzada como los sistemas activos, o activos-pasivos, obteniendo una mayor captación, disminuyendo el volumen de biogas que emigra en sentido horizontal.

#### **IV.2.3) SISTEMAS PARA LA INCINERACION DEL BIOGAS.**

Las características que deben tener estos sistemas ya han sido descritas, sin embargo cabe enfatizar que actualmente los quemadores constan de un mechero formado por un tubo de 2" (0.05 m.) de diámetro y una válvula de paso para el control de la salida del biogas; éstos son colocados en el extremo superior de cada pozo.

#### **IV.2.4) SISTEMAS PARA EL TRATAMIENTO DEL BIOGAS EN TIRADEROS A CIELO ABIERTO.**

Son los mismos que se describen para los rellenos sanitarios.

#### **IV.3) UBICACION DE LOS POZOS DE BIOGAS EN SITIOS DE DISPOSICION FINAL (RELLENOS SANITARIOS O TIRADEROS A CIELO ABIERTO).**

Para determinar la ubicación de los pozos de extracción del biogas en los sitios de disposición final de residuos sólidos, pueden considerarse los criterios que a continuación se mencionan:

##### **IV.3.1) CRITERIO PRACTICO.**

El criterio práctico se basa principalmente en la inspección física realizada en campo, considerando los siguientes puntos:

- a) Las dimensiones del sitio de disposición final.

- b) El espesor de los estratos de residuos sólidos que componen las celdas, ya que con este dato se determina la profundidad de cada pozo.
- c) El tipo de desechos sólidos confinados en la zona, es decir si son orgánicos en un porcentaje mayor o igual que los inorgánicos, la producción de biogas es mayor como ya antes se ha explicado.
- d) El tiempo o edad de los desechos sólidos desde que fueron confinados en el sitio de disposición final, este dato es muy importante pues la producción de metano se efectúa después de un año y medio de haberse confinado los desechos sólidos, generándose aproximadamente durante 10 años, en este tiempo es cuando se debe controlar.
- e) La infraestructura existente en el sitio (son los caminos, cunetas, cárcamos de bombeo de lixiviados y casetas de control) pues debido al desarrollo de la obra en general, se tiene que contruir ésta antes que los pozos de biogas.
- f) La ubicación de la zona habitacional, ya que en ocasiones ésta se encuentra en los límites del sitio de disposición final, siendo altamente riesgoso colocar pozos cerca, por representar una fuente de ignición causante de posibles siniestros.
- g) La configuración del área terminada; este punto se refiere a las plataformas y taludes que conforman el sitio de disposición final una vez que ha sido clausurado; ya que los pozos sólo pueden ubicarse en las plataformas, debido a que su construcción sobre los taludes resulta muy difícil por los posibles deslizamientos ya que por lo general tienen pendiente 3:1 y una compactación muy baja (solo la que recibe con la oruga del bulldozer).
- h) Los resultados del monitoreo de toda el área, principalmente en las grietas naturales, ya que es donde se encuentran fuertes emanaciones de biogas.

Dichas grietas se forman sobre la superficie por los asentamientos de los residuos sólidos, por la presión del biogas y por la erosión causada por la lluvia y el viento cuando la compactación es baja. Estas grietas muchas veces indican el lugar exacto para la ubicación de los pozos; ahorrando cálculos y estudios previos.

i) La compactación del material de cobertura de los residuos sólidos es uno de los factores más importantes en la emigración del biogas, ésta dependen del tipo de material.

#### **IV.3.2) CRITERIO TEORICO.**

Dicho criterio se basa en el concepto de radio de influencia el cual es útil y conveniente para establecer el espaciamiento entre los pozos así como para estimar tasas de flujo potenciales.

El radio de influencia define una distancia radial a partir de un pozo dentro del cual todo el biogas es captado por éste; se supone que no puede llegar a dicho pozo el biogas generado fuera de esa distancia (estaría fuera de su radio de influencia).

Este concepto es ficticio, ya que no todo el biogas que se produce dentro del radio de influencia puede ser captado, pues además de presentarse migraciones hacia la atmósfera, cierta cantidad de biogas puede llegar a otro pozo a pesar de que se halle fuera de su zona de influencia. Sin embargo los errores inherentes a estas dos simplificaciones tienden a cancelarse y comúnmente pueden obtenerse estimaciones aceptables del flujo.

El radio de influencia de los pozos, normalmente dependen del porcentaje de la compactación, del tipo de desechos sólidos, de la profundidad del pozo y del flujo de salida del biogas.

También hay que considerar que dentro de los estratos de desechos sólidos no existe una uniformidad en cuanto a las características de éstos, así como de su acomodo. Esto origina que el cálculo para determinar la ubicación de los pozos sea difícil de llevar a cabo.

En la actualidad recomienda colocar de 2 a 6 pozos de operación pasiva por hectárea; sin embargo, se tiene un segundo criterio para determinar el número de los mismos y consiste en ubicar un pozo por cada 7,500 m<sup>3</sup>. de desechos sólidos.

Para el cálculo del radio de influencia de los pozos de biogas, se toman en cuenta los criterios anteriores y se determinan de manera analítica.

De acuerdo con la ecuación que representa la relación entre el flujo de biogas, las características de los residuos sólidos y el sistema de extracción, se tiene que:

$$R \text{ (RADIO DE INFLUENCIA)} = \left[ \frac{Q_w C}{k 3.1416 T P_v H} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$Q_w$  = Flujo de biogas a través del pozo.

$H$  = Profundidad promedio del pozo.

- PV = Peso volumétrico de los residuos.
- T = Tasa de producción de metano.
- C = Fracción de concentración de metano.
- K = Constante de transformación de unidades:  $1.157 \times 10^{-8}$ .

El radio de influencia de los pozos de extracción de biogas, se determina con pruebas de campo, este tipo de prueba se realiza en un período de 48 horas en diferentes días.

Para realizar los estudios de campo, es necesario construir un pozo de extracción con dispositivos colocados a distancias regulares del mismo, para la medición de presión y calidad del biogas. En la figura IV.26., se ilustra la configuración de los dispositivos para la realización de este tipo de prueba.

El pozo de prueba se debe perforar de 80 a 90% de espesor de los residuos sólidos y una vez construidos, se bombea el biogas por lo menos 48 horas y se realiza el monitoreo de la presión diariamente.

La presión negativa es más alta en los puntos cercanos al pozo y disminuye conforme se aleja del mismo.

El radio de influencia se determina cuando a cierta distancia se tiene una presión cercana a cero.

Cuando no es posible efectuar las pruebas antes mencionadas, se recomienda un radio de influencia de por lo menos 45 m., tomando en consideración el traslape de 27%.

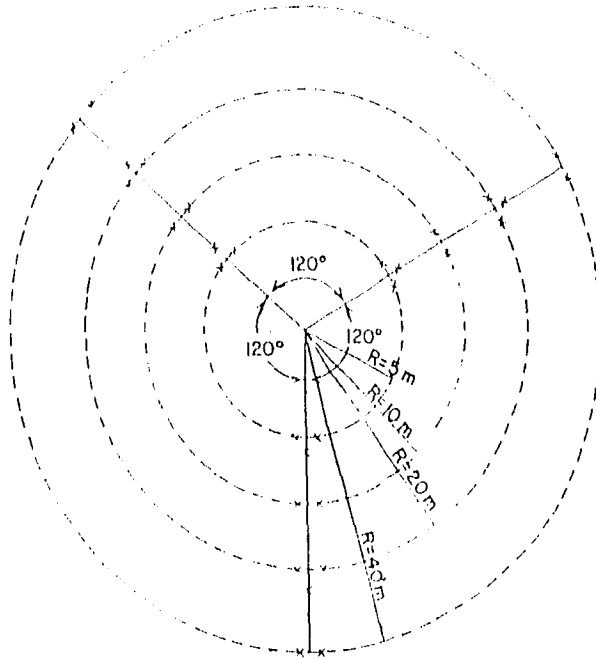
El espacio de los pozos de extracción, es la parte medular para lograr un control y /o aprovechamiento del biogas en los sitios de disposición final; por lo que los pozos se colocan de tal manera que sus zonas de influencia se traslapen y se asegure la extracción total.

Por lo anterior el espaciado de los pozos de extracción está dado por:

$$d = \frac{(2.2a)}{100} R$$



PRUEBAS PARA LA DETERMINACION DEL RADIO DE INFLUENCIA



SIMBOLOGIA

D = PROFUNDIDAD

R = RADIO AL PUNTO DE PRUEBA

XX = PÓZOS DE MONITOREO CON TRES PUNTOS DE MUESTREO (0.2 D, 0.5 D y 0.8 D)

X = PÓZOS DE MONITOREO CON DOS PUNTOS DE MUESTREO (0.2 D y 0.8 D)

FIG IV. 26

Donde:

R = Radio de influencia del pozo de extracción.

a = El traslape requerido.

d = Espacio entre pozo y pozo.

Otro sistema no menos importante es el utilizado para el monitoreo del biogas que emigra hacia la periferia del sitio en donde se genera.

#### **IV.4) SISTEMAS PARA EL MONITOREO DEL BIOGAS FUERA DEL SITIO DE DISPOSICION FINAL (RELLENO SANITARIO O TIRADERO A CIELO ABIERTO).**

No obstante el control que se lleva a cabo dentro de los sitios de disposición final mediante los sistemas pasivos o activos de extracción; un alto porcentaje de biogas logra emigrar horizontalmente hacia la periferia del sitio, alcanzando grandes distancias según la permeabilidad del suelo, acumulándose algunas veces en cavernas, oquedades, alcantarillas, etc., resultando de alto riesgo a los pobladores.

Por estos riesgos se ha considerado pertinente diseñar un sistemas para monitorear la periferia de los sitios de disposición final de desechos sólidos, como se ilustra en la figura IV.27, y prevenir siniestros; resultando los pozos de monitoreo cuyas especificaciones se presentan a continuación.

Los sistemas para el monitoreo del biogas fuera del sitio de disposición final, son pozos de dimensiones menores respecto a los sistemas de extracción pasiva y activa; los cuales constan de tres monitores colocados en tres niveles diferentes del subsuelo; cuyo objetivo es detectar la emigración del biogas fuera del sitio en donde se genera; principalmente si existen zonas conurbadas cercanas. En la figura IV.28, se muestra el modelo de un pozo de monitoreo.

##### **IV.4.1) EJECUCION DE LA OBRA:**

Previamente a la construcción de los pozos de monitoreo, se requieren realizar las siguientes actividades:

###### **a) Estudios previos.**

- a.1) Reconocimiento físico del sitio por personal técnico.
- a.2) Realización de estudios de topografía que comprende la planimetría y altimetría.
- a.3) Estudios de geofísica, implica la investigación de los siguientes datos: espesor de los estratos de los desechos sólidos confinados desde la superficie hasta el nivel de piso, las fracturas, oquedades y estratigrafía del subsuelo, el nivel de aguas freáticas y permeabilidad del material del subsuelo.

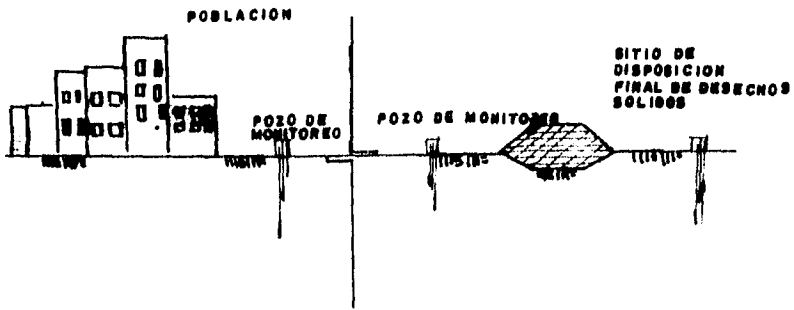
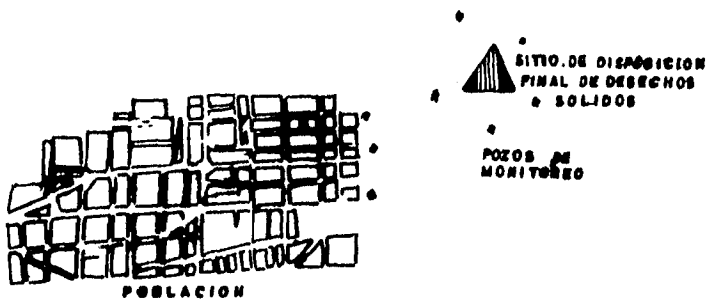


FIG IV.27. UBICACION DE LOS POZOS DE MONITOREO DE BIOGAS



## **b) Construcción:**

El procedimiento constructivo de los pozos de monitoreo se divide en las siguientes actividades: perforación del pozo, habilitación de la tubería y equipamiento del pozo.

Para dichos trabajos se requiere el siguiente equipo y material.

### Equipo y herramienta para la perforación y equipamiento de los pozos de monitoreo:

- Perforadora tricónica helicoidal de 6" (0.15m.) de diámetro.
- Compresor para la extracción del material producto de la perforación. No es recomendable utilizar agua para la extracción del material, debido a la dificultad que implica el equipamiento del pozo cuando se inunda.
- Herramienta de albañilería: revolvedora, carretilla, palas, plomada, botes, cimbra para la base del registro, cuchara, flexómetro, etc.

### Material utilizado:

El material utilizado para el equipamiento de los pozos de monitoreo es:

- Concreto F'c 150 Kg./cm<sup>2</sup>. con las siguientes proporciones 1:4:6 para el sello o tapón.
- Material impermeable tezontle o grava de 3/4" (0.02 m.) de diámetro.
- Tubería de P.V.C. de 2" (0.05 m) de diámetro.
- Tubería de P.V.C. de 3" (0.07 m) de diámetro.
- Válvulas de P.V.C. de 2" (0.05 m) de diámetro.
- Registro cilíndrico metálico de 0.30 m. de diámetro y 1.0 m. de longitud, construido sobre diseño por no ser comercial.

### *b.1) Perforación de los pozos.*

b.1.1) Ubicados los puntos en donde se planea construir los pozos de monitoreo, en base a la geofísica, topografía y la urbanización de la zona; se procede a efectuar la perforación de los pozos.

b.1.2) Los pozos se perforan de 0.15m. de diámetro y a una profundidad igual al espesor de los estratos de desechos sólidos confinados o hasta el nivel en donde se detectaron las oquedades o fracturas.

b.1.3) Durante el proceso de perforación si es necesario, se adema el pozo cuando tienda a derrumbarse, utilizando ademe metálico recuperable y nunca con alguna sustancia como el lodo bentónico u otro material que impermeabilice las paredes y obstruya el flujo de los gases.

#### *b.2) Habilitación de los dispositivos de monitoreo.*

Los dispositivos de monitoreo están formados cada uno por una pichancha que es un tramo de tubo P.V.C. de 1.0 m. de longitud por 3" (0.076 m.) de diámetro unido a otro de 2" (0.05 m.) de diámetro y longitud igual a la del pozo; en el extremo superior de este dispositivo se coloca una válvula de paso para el control de la salida del biogas. En la figura IV.29, se ilustra un tubo habilitado.

La preparación se efectúa de la siguiente forma:

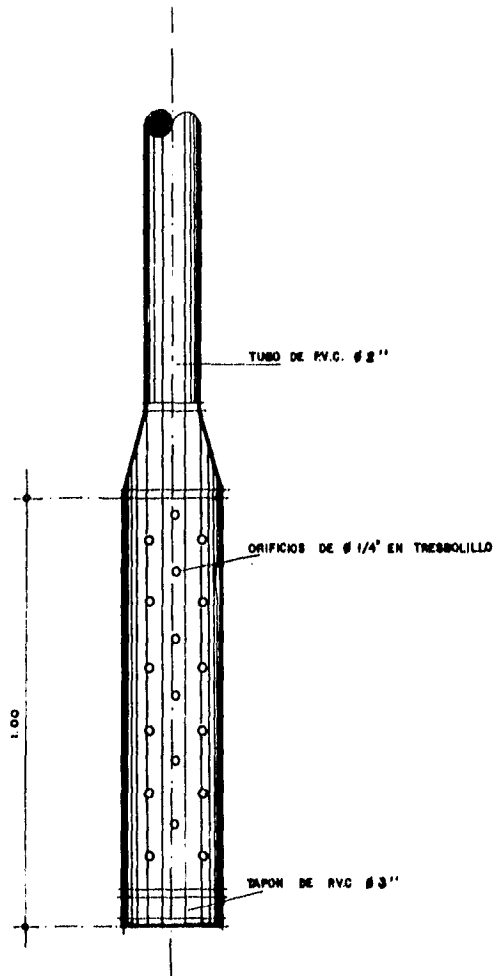
b.2.1) Simultáneamente a las actividades de perforación de los pozos, se barrenan las pichanchas de cada dispositivo; los barrenos deben ser de aproximadamente 1/4" (0.006 m.) colocados en configuración "tresbolillo".

b.2.2) Se arman los dispositivos para monitoreo, uniendo las pichanchas con los ductos, utilizando reducciones y coples del mismo material (P.V.C.).

#### *b.3) Equipamiento del pozo.*

Los pozos se equipan con tres dispositivos (tubos de P.V.C. de 2" ó 0.05 m de diámetro y longitud variable) y material permeable (tezontle); en el extremo inferior de cada dispositivo se conecta una pichacha de 1.0 m. de longitud por 3" (0.076 m.) de diámetro, perforada en configuración "tresbolillo". Ubicando cada dispositivo en tres cámaras diferentes del subsuelo (entre 15 ó 20 m. para el nivel inferior, aunque esta medida depende de la ubicación de las oquedades si existen, o del espesor de los desechos confinados: entre 8 y 10 m. para el segundo nivel y para el tercer nivel entre 4 y 5 m.); con el fin de monitorear las zonas donde se considere que hay flujo de biogas, en base a los resultados de geofísica.

Finalmente en el extremo superior de cada dispositivo se coloca una válvula de paso para el control de la salida del biogas.



**SISTEMA DE MONITOREO PARA BIOGAS (CONEXIONES)**

**FIG. IV, 29**



Dicha estructura se protege por un registro metálico (de fierro fundido o acero) de 0.30 m. de diámetro y 1.0 m. de longitud, como el que se ve en la figura IV.30.

Dichas actividades se realizan de la siguiente forma:

b.3.1) Se verifica que el pozo esté en condiciones para sea equipado, es decir, que tenga las dimensiones especificadas, que no se encuentre azolvado, inundado u obstruido.

b.3.2) Se coloca en la base del pozo una plantilla de 1.0 m. de espesor de material de filtro (tezontle o grava).

b.3.3) Se introduce el primer tubo monitor es decir el de mayor longitud.

b.3.4) Se coloca a volteo una capa de 0.30 m. de tezontle entre el espacio anular del dispositivo y el pozo.

b.3.5) Se coloca el concreto el cual forma un bloque de 0.30 m., que sirve para separar la cámara inferior de las siguientes.

b.3.6) Se introduce el segundo tubo monitor (el cual verifica las condiciones del biogas de la cámara del estrato medio).

- Se repiten los puntos (b.3.4) y (b.3.5).

b.3.7) Se introduce el tercer tubo monitor (sirve para verificar las condiciones de la cámara del nivel cercano a la superficie).

b.3.8) Se repiten las actividades mencionadas en los puntos (b.3.4.) y (b.3.5).

b.3.9) Colocados los tres monitores a tres niveles diferentes, se sella el pozo con concreto en la parte superficial, sobresaliendo los extremos de cada monitor en los cuales se instala una válvula para el control del muestreo.

b.3.10) Para la protección de los dispositivos de monitoreo, se coloca un registro de acero o fierro fundido, anclado en una base de concreto.

#### **IV.4.2) CRITERIOS PARA LA UBICACION DE POZOS DE MONITOREO.**

La ubicación de los pozos de monitoreo de biogas, depende básicamente de las características físicas del subsuelo, en relación principalmente a la existencia de cavernas y oquedades, así como a la permeabilidad del subsuelo en la zona perimetral de los sitios de disposición final.

Para conocer estos datos es necesaria la realización de estudios previos de geofísica.

a) Una vez obtenidos los resultados geofísicos y la ubicación de los futuros pozos de monitoreo, se realiza tomando los puntos en los cuales existan alteraciones de

REGISTRO DE PROTECCION

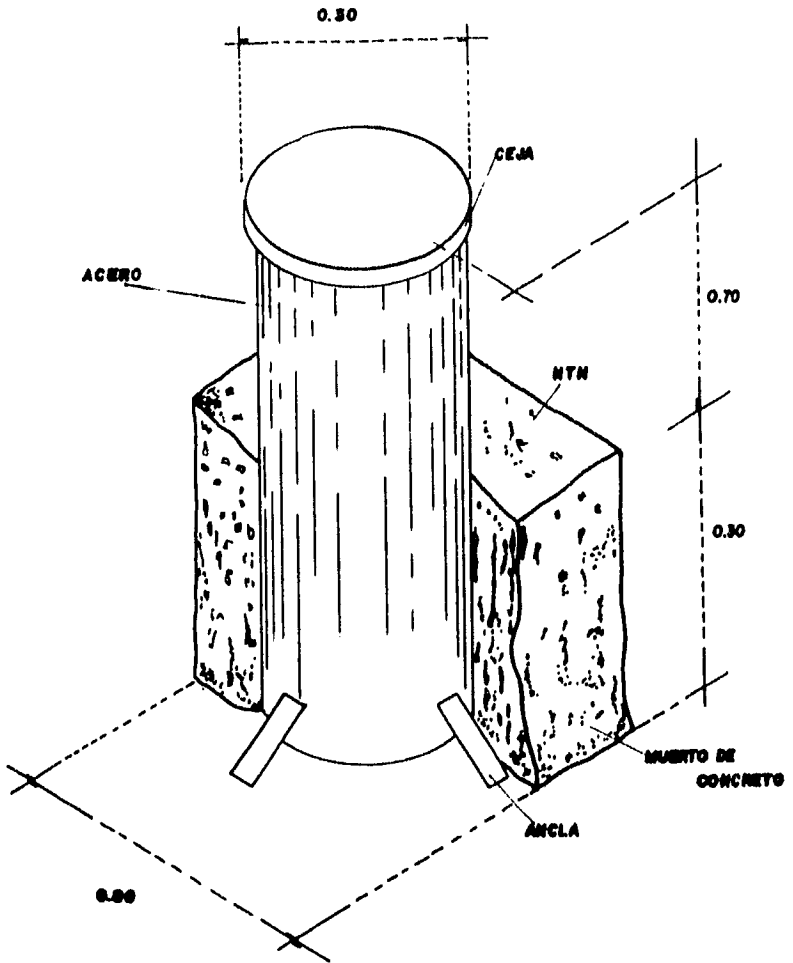


FIG. IV. 30

importancia, que ofrezcan menor resistencia al movimiento del biogas (fracturas, oquedades, suelo altamente permeable, etc.).

b) Otro factor importante que se debe considerar para la ubicación de los pozos de monitoreo, es la factibilidad en cuanto a los accesos que requiere la maquinaria pesada y demás equipo de perforación; pues muchas veces la ubicación de dichos pozos se hace en sitios escabrosos, pantanosos, etc., que necesitan una preparación previa.

#### **IV.5) RECOMENDACIONES A CONSIDERAR EN LA CONSTRUCCION DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE BIOGAS.**

De los puntos tratados en este capítulo, así como por la experiencia adquirida en campo, se ha considerado necesario formular las siguientes recomendaciones, básicamente preventivas:

##### **IV.5.1) RECOMENDACIONES.**

a) Que el personal encargado de la construcción de los sistemas, se proteja utilizando mascarillas con filtro de carbón activado, para evitar la inhalación de los gases que se desprenden durante la perforación de los pozos. Además debe estar estrictamente prohibido entrar en los pozos ya perforados, por la falta de oxígeno.

b) Que se coloquen señales preventivas de 0.60 x 0.60 m. de lámina con las leyendas "Peligro Excavación Profunda" y "No Fumar", equidistantes a la perforación.

c) Que no se utilicen perforadoras de percusión, ya que una chispa puede ocasionar algún siniestro ya que se trabaja sobre zonas impregnadas de biogas.

d) En la perforación de los pozos no se debe utilizar lodo bentónico o algún otro material de ademe que pudiera sellar las paredes del pozo, impidiendo el flujo del biogas.

e) Debido a que las estructuras de protección de los pozos de extracción actualmente usadas (registros de tabique o tubos de concreto de grandes dimensiones), han resultado poco eficientes, por su alto costo y baja durabilidad; se propone sustituir ésta por una estructura metálica en forma de campana la cual canaliza al biogas hacia un pebetero para su incineración. Esta campana puede contar con una preparación para conectarse a una red o bien para instalar algún mecanismo de extracción forzada, en la figura IV.31, se ilustra dicha estructura.

Su construcción es técnicamente sencilla, se abate el costo de esta estructura en los conceptos de material y obra de mano respecto al registro de tabique actualmente utilizado, no se presentan emigraciones y fugas verticales por fracturas, puede ser reutilizable una vez concluida la generación de biogas en el sitio.

SISTEMA PROPUESTO

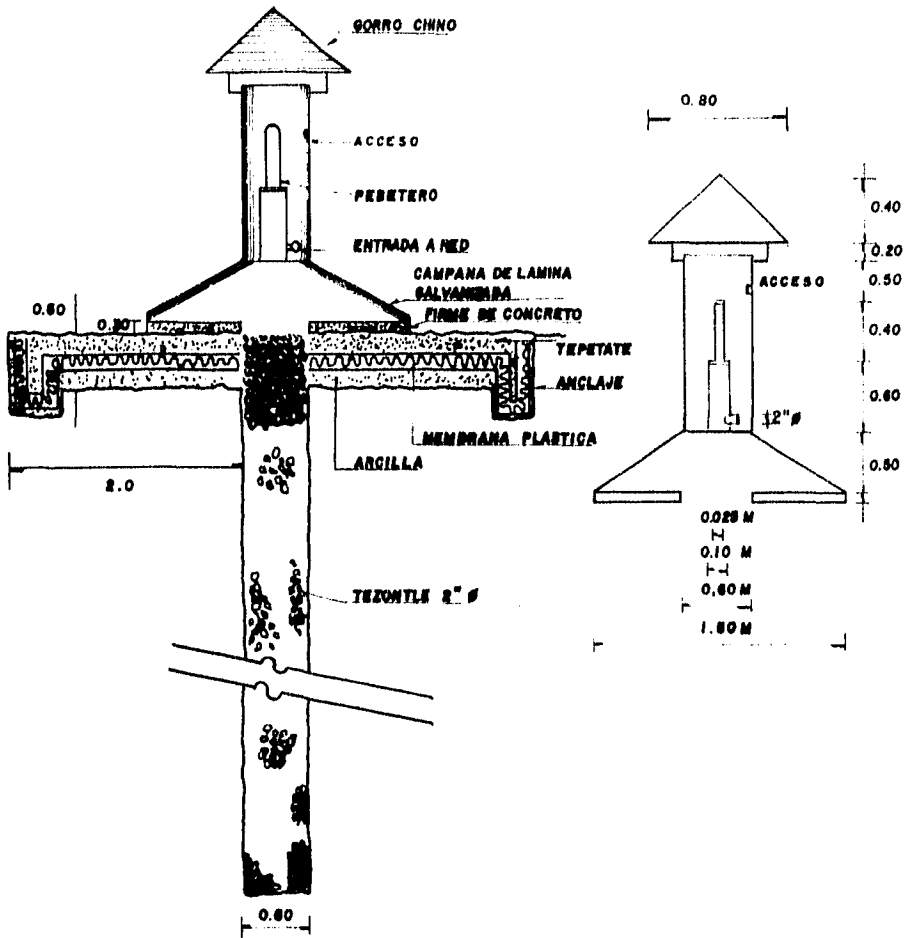


FIG. IV.31

Dicha campana de extracción se debe fabricar sobre diseño, ya que no existe en el mercado. Para su colocación se prepara el piso de la misma manera que para la colocación de los registros de tabique.

l) Que efectivamente se efectúe la impermeabilización en los rellenos sanitarios, ya que son sitios que se controlan desde su arranque.

#### **IV.5.2) OBSERVACIONES.**

a) Actualmente el diseño de los sistemas de extracción no se realiza mediante cálculos específicos, no obstante los métodos señalados para la estimación del volumen del biogas; por lo que sus dimensiones se definen en base a las experiencias obtenidas durante la operación de los sitios de disposición final.

Esta razón es debida a que la producción del biogas corresponde a un proceso transitorio dependiente de un sinnúmero de condiciones como las características de los desechos sólidos, las condiciones ambientales y la eficiencia del proceso biológico; haciendo difícil establecer relaciones que permitan obtener un diseño racional del sistema.

b) La eficiencia de los sistemas para la extracción del biogas ya sean pasivos o activos, depende de las condiciones del sitio de disposición final en donde se construyen, es decir, si el sitio ha sido controlado desde que se inicia, o surgió como un tiradero clandestino.

c) La impermeabilización debe evitar la emigración del biogas hacia zonas no controladas, de esta manera el movimiento se presenta en sentido vertical, captándose a través de cualquier sistema una mayor cantidad de dicho energético.

d) De acuerdo a experiencias de países extranjeros, la utilización de materiales sintéticos, para la impermeabilización de rellenos sanitarios han dado buenos resultados. Desafortunadamente en México son pocos los sitios de disposición final de desechos sólidos que efectivamente han sido controlados desde su inicio, predominando los tiraderos a cielo abierto en proceso de saneamiento o bien sitios con un control deficiente, presentándose en gran medida la emigración desordenada del biogas, por lo que cualquier sistema de extracción no logra una eficiencia total.

e) Los sistemas para el control del biogas pasivos o activos así como los pozos para el monitoreo externo, son obras muy sencillas que sin embargo requieren de la experiencia de técnicos en la operación de sitios de disposición final, ya que el comportamiento de los desechos sólidos no es comparable con ningún tipo de suelo sano y es ahí en donde los técnicos fallan al tratar de manejarlos como tales.

f) Si bien es cierto que el biogas es de alto riesgo por su composición y propiedades, es también un recurso energético que puede utilizarse en diversas formas si se trata de manera adecuada.

En el siguiente capítulo se presentan algunas alternativas para su aprovechamiento.

# CAPITULO V

## ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS

El biogas que se produce en los sitios de disposición final de desechos sólidos, es un recurso energético con características especiales que lo hacen adecuado para su posible uso como combustible, para la producción de metanol o alcohol industrial, etc., dependiendo de las restricciones técnicas, económicas o sociales del área en donde se pretenda utilizar.

Algunas alternativas en las que puede ser aprovechado, son las siguientes:

- a) Como combustible doméstico o industrial
- b) Para la generación de la energía eléctrica
- c) Como combustible de vehículos
- d) Para la producción de metanol

Para la utilización del biogas en cada una de dichas alternativas, se requiere que éste pase por un proceso que se inicia con la extracción y captación, para en seguida ser tratado y distribuido.

Anteriormente se describieron los sistemas utilizados para la extracción y captación del biogas; en este capítulo se presentan algunos procesos para efectuar el tratamiento de dicho energético, basados en esquemas que corresponden a aplicaciones realizadas por algunos países interesados en el aprovechamiento de este recurso, entre los cuales se pueden mencionar a Brasil y Estados Unidos, el primero representativo de los países en vías de desarrollo y el segundo a los países desarrollados.



## V.1) TRATAMIENTO DEL BIOGAS.

El biogas por su origen contiene ciertos porcentajes de gases y ácidos que le impiden ser un energético totalmente aprovechable, al disminuir su poder calorífico en un 50% aproximadamente respecto al metano, el cual como ya se mencionó, es uno de sus componentes principales; por ello la eliminación de dichos compuestos generalmente se hace artificialmente con el equipo necesario, que depende del uso que se le pretende dar a dicho energético.

Existen diferentes alternativas de tratamiento, de las que es posible definir las siguientes tres etapas generales: eliminación de condensados, transporte de gas y eliminación de ácido sulfhídrico.

### a) Eliminación de condensados.

Debido a que el sitio de disposición final en muchas ocasiones se encuentra saturado, además de tener una temperatura máxima de 60°C durante la extracción del biogas, se presenta una importante acumulación de condensados líquidos en la red de conducción, siendo necesario su control para evitar la inundación, obstrucción o pérdidas de carga del sistema; para tal efecto puede utilizarse un dren hidráulico, lo que resulta más económico, o bien, un tanque de separación de condensados, el cual proporciona una mejor eliminación de dichos condensados de arrastre en la corriente.

El dren hidráulico tiene un funcionamiento parecido al de un manómetro en U, en el cual el mismo líquido actúa como sello y no permite la salida del biogas; dicho instrumento tiene la ventaja de contar con un sistema práctico de desalojo de condensados cuando se rebasa cierto nivel de líquidos (dentro de la trampa). Esta trampa de condensados se debe colocar en los puntos más bajos de la red de conducción; ya que hacia ese punto fluirán por gravedad dichos condensados.

Si la opción es el tanque de separación, este puede ubicarse antes del conducto de transporte de gas o después de la eliminación del ácido sulfhídrico.

#### **b) Transporte de gas.**

Esta etapa proporciona el factor presión-velocidad al biogas mediante el empleo de un soplador algún sistema de bombeo, el cual de manera complementaria es fuente de la energía de succión asociada a la extracción del biogas.

#### **c) Eliminación de ácido sulfhídrico: (H<sub>2</sub>S).**

Consiste en una reducción del contenido de ácido sulfhídrico en el gas hasta niveles adecuados de concentración (se toleran hasta 6 p.p.m.). El sistema se conforma por dos recipientes que contienen óxido de hierro y viruta de madera, de función alterna y en paralelo (esto es, cuando uno está en operación otro se encuentra en regeneración), así como un dispositivo para el drenaje de condensados remanentes que se eliminan de manera complementaria en este proceso. Este sistema es de fácil operación y poca labor de mantenimiento.

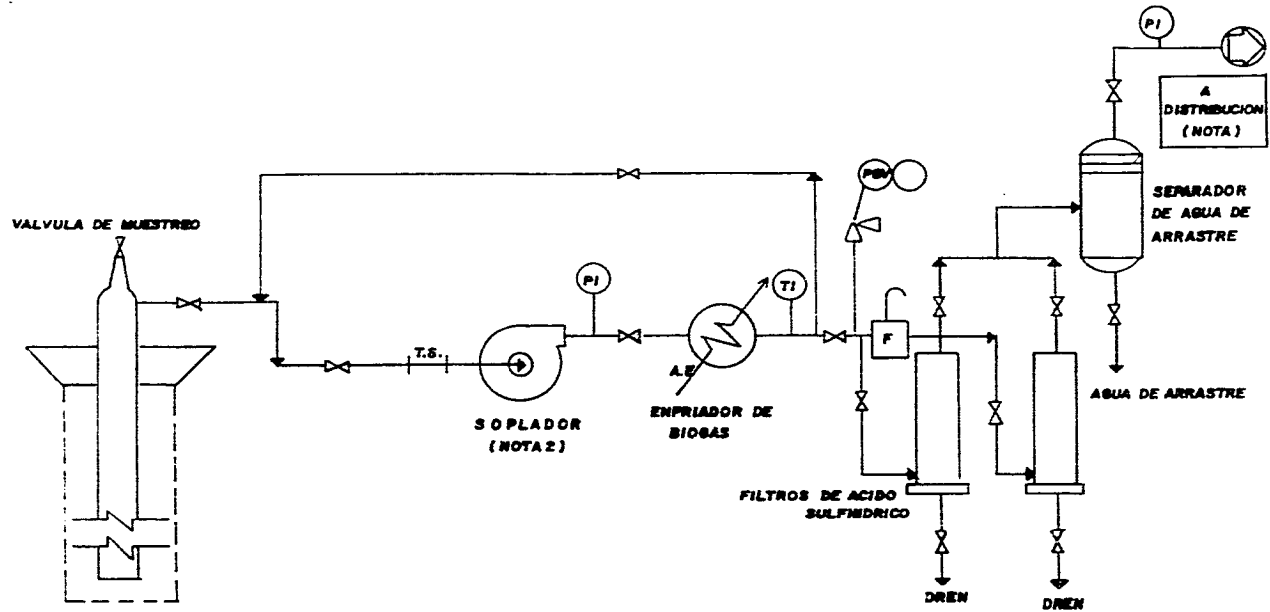
Estas alternativas se ilustran en los siguientes esquemas:

La alternativa A, esquema V.1, corresponde a un proyecto de aprovechamiento de biogas desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos de América.

La alternativa B, esquema V.2 (en experimentación), es una parte constitutiva de una planta de aprovechamiento de biogas como combustible para vehículos, existente en Rio de Janeiro, Brasil a cargo de la Compañía Municipal de Limpieza Urbana (COMLURB).

La alternativa C, esquema V.3, es una forma de tratamiento de biogas desarrollado por American Petroleum Institute, de Estados Unidos de América.

ALTERNATIVA A

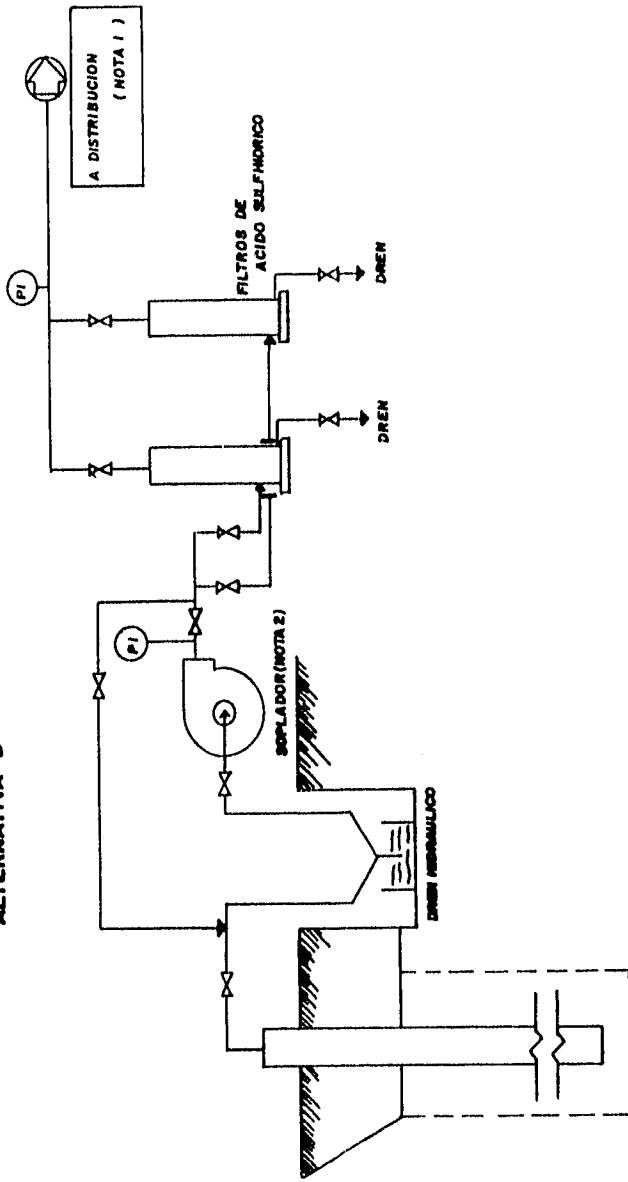


NOTAS

- 1 LA LINEA DE DISTRIBUCION CUENTA CON DECLIVES PARA LA ELIMINACION DE CONDENSADOS FORMADOS EN LA LINEA POR EFECTO DEL GRADIENTE DE TEMPERATURA EXISTENTE ENTRE EL GAS Y EL SUELO.
- 2 DEBE CONTAR CON LA INSTRUMENTACION DE SEGURIDAD APROPIADA

FUENTE: U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. WASHINGTON. D. C.

ALTERNATIVA B



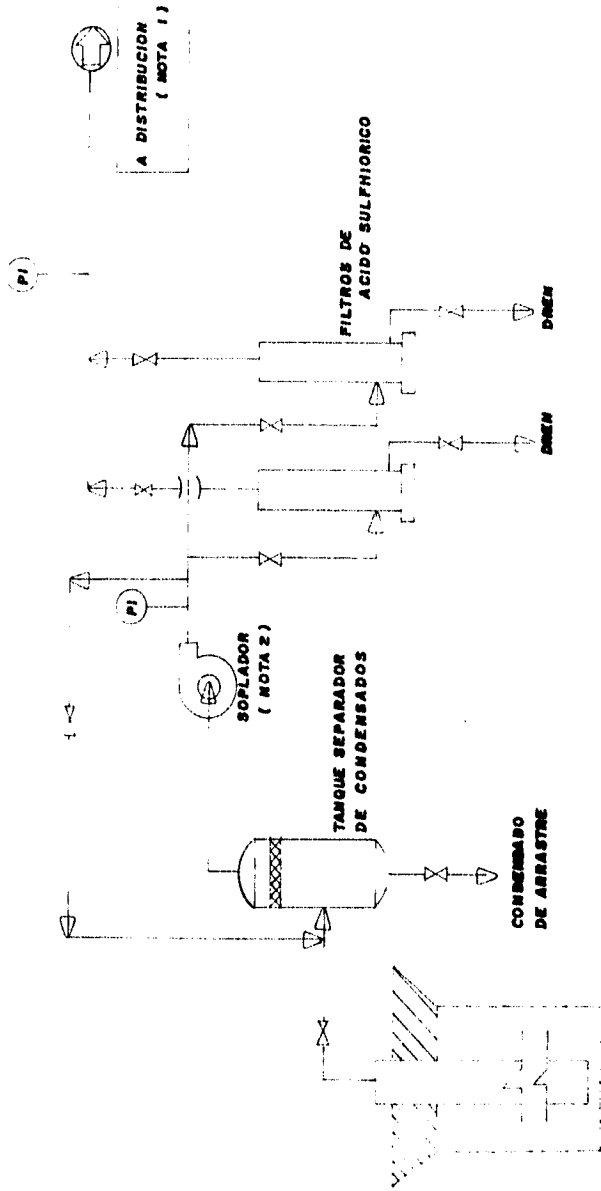
NOTAS

- 1 LA LINEA DE DISTRIBUCION CONTARA CON DECLIVES PARA LA ELIMINACION DE CONDENSADOS DE ARRASTRE QUE ESTEN PRESENTES EN LA LINEA
- 2 DEBE CONTAR CON LA INSTRUMENTACION DE SEGURIDAD APROPIADA

FUENTE: COMLURB, RIO DE JANEIRO, BRASIL.

ESQ.V.2

ALTERNATIVA C



NOTAS

- 1 LA LINEA DE DISTRIBUCION CONTARA CON DECLIVES Y DRENES PARA LA ELIMINACION DE CONDENSADOS FORMADOS POR EL GRADIENTE DE TEMPERATURA
- 2 DEBE CONTAR CON LA INSTRUMENTACION DE SEGURIDAD APROPIADA

FUENTE: NRG Nu Fuel

## **V.2) APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS.**

Algunas de las ventajas de un uso particular pueden no serlo de un país a otro o incluso en el mismo país, entre una región y otra, dependiendo de factores como el lugar en donde se va a utilizar, de las condiciones técnicas, económicas y de la infraestructura disponible.

A continuación en la tabla V.1, se describen las alternativas para el aprovechamiento del biogas, mencionando las ventajas, desventajas y el sistema requerido en cada caso.

### **V.2.1.) COMBUSTIBLE DOMESTICO O INDUSTRIAL**

Dentro de la distribución para uso como combustible se tienen tres posibilidades a considerar:

#### **a) Domiciliarla directa.**

Consiste en la extracción a través de una batería de pozos, procediendo al tratamiento y distribución directa a residencias cercanas al sitio de disposición final. En el esquema V.4 se ilustra el proceso de tratamiento.

##### **a.1) Ventajas:**

- El biogas utilizado como combustible es una posibilidad satisfactoria para su uso como sustituto del gas doméstico, pues el período de producción económicamente factible es entre 10 y 15 años.
- El costo de producción es relativamente bajo comparado con otros combustibles.

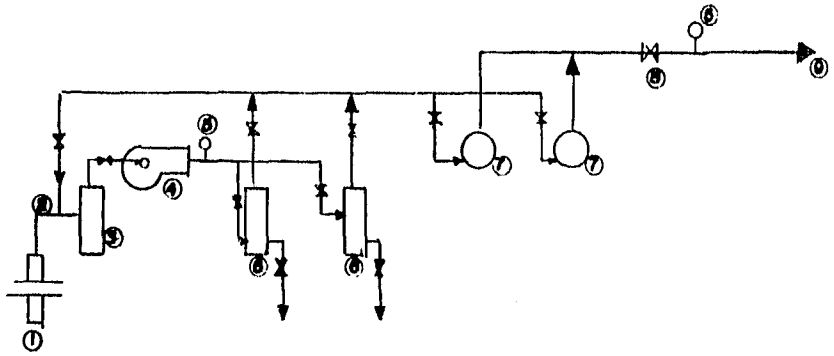
##### **a.2) Desventajas:**

- Existe una dificultad para convencimiento de su utilización debido principalmente a su bajo poder calorífico el cual oscila entre 4,700 a 6,000 kcal/m<sup>3</sup>., comparado con el butano que es de 28,588 kcal/m<sup>3</sup>.
- La utilización del biogas como combustible domiciliario requiere de la existencia de una red de distribución; en caso de no existir, el costo de inversión se incrementa, disminuyendo la factibilidad de utilización.

TABLA V.1  
APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS

PROYECTO/AMBITO	DESCRIPCION	VENTAJAS	DESVENTAJAS	INFRAESTRUCTURA	OBSERVACIONES
COMBUSTIBLE INDUSTRIAL	DIRECTA	- FORTALECIMIENTO EN EL USO DE BIOGAS - COMBUSTIBLE AMIGABLE CON EL MEDIO AMBIENTE - BIOMASA COMBUSTIBLE	- FUERTES EMISIONES DE OXIDO NITROSO EN EL TRATAMIENTO - PARA SU DISTRIBUCION SE NECESITA UN BIEN DISEÑADO SISTEMA DE CONDUCCION Y ALMACENAMIENTO - CONSERVACION EN EL TIEMPO - RIESGO DE EXPLOSION EN CASO DE FUGA DE BIOGAS - ENTUBAR Y AISLAR PARA EL BIEN DE LOS TUBOS DE CONDUCCION Y ALMACENAMIENTO - UNO DE LOS TIPOS DE BIOMASA QUE SE PUEDE USAR PARA LA PRODUCCION DE BIOMASA COMBUSTIBLE	- TIPO DE CAPTACION - LINEAS DE CONDUCCION ENTRE POZOS Y SAI DE TRATAMIENTO - EQUIPO DE TRATAMIENTO PARA LA PURIFICACION DE BIOMASA COMBUSTIBLE - EQUIPO DE DISTRIBUCION - BOMBAS DE PRESION - INSTALACIONES DE ALMACENAMIENTO	
COMBUSTIBLE INDUSTRIAL	INDIRECTA	- NO SE REQUIERE DE MEDIDAS DE SEGURIDAD - NO SE NECESITA EQUIPO ESPECIAL PARA LA COMBUSTION - LAS EMISIONES EN EL ALMACENAMIENTO SON MENORES	- SE DEBE REALIZAR LA RECONSTRUCCION DE LOS EQUIPOS EXISTENTES O INCREMENTARLOS - SE TIENE QUE CONSIDERAR EL BIOGAS PARA EVITAR LA FORMACION DE LA LINDA DE TRANSACCION DE LA COMBUSTION - SE REQUIERE DE PREPARATI VOS EN EL TIEMPO	- TIPO DE CAPTACION - LINEAS DE CONDUCCION ENTRE POZOS Y SAI DE TRATAMIENTO - EQUIPO DE TRATAMIENTO PARA LA PURIFICACION DE BIOMASA COMBUSTIBLE - EQUIPO DE DISTRIBUCION - SISTEMAS DE FIDELIZACION DE BIOMASA COMBUSTIBLE - CONSUMIDOR PARA LA COMBUSTION	
COMBUSTIBLE INDUSTRIAL	DIRECTA	- EL TRATAMIENTO DE BIOMASA ES RÁPIDO - SE LE PUEDE UTILIZAR PARA EL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS - SE UNIFORMAN LAS REACCIONES QUIMICAS	- SE UTILIZAN TORQUES SALTADOS DE GAS - EL RIESGO DE COMBUSTION EN EL BIEN DE LA BIOMASA ES ALTO - SISTEMA DE CONDUCCION DE BIOMASA QUE DEBE SER CONSIDERADO PARA EVITAR LA FORMACION DE LA LINDA DE TRANSACCION DE LA COMBUSTION - SE REQUIERE DE PREPARATIVOS EN EL TIEMPO	- TIPO DE CAPTACION - LINEAS DE CONDUCCION ENTRE POZOS Y SAI DE TRATAMIENTO - EQUIPO DE TRATAMIENTO PARA LA PURIFICACION DE BIOMASA COMBUSTIBLE - EQUIPO DE DISTRIBUCION - SISTEMAS DE FIDELIZACION DE BIOMASA COMBUSTIBLE - CONSUMIDOR PARA LA COMBUSTION	EXISTE EL COMBUSTIBLE EN ALGUNAS PLANTAS INDUSTRIALES QUE SE ALMACENAN EN UN TANQUE GENERAL DE BIOMASA COMBUSTIBLE EN EL CENTRO DE TRATAMIENTO
GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA		- BIOMASA COMBUSTIBLE - EL COSTO DE BIOMASA ES EL MAS ALTO - ANALISIS AMBIENTAL DEL BIOMASA COMBUSTIBLE	- EL RIESGO DE COMBUSTION EN EL BIEN DE LA BIOMASA ES ALTO - SISTEMA DE CONDUCCION DE BIOMASA QUE DEBE SER CONSIDERADO PARA EVITAR LA FORMACION DE LA LINDA DE TRANSACCION DE LA COMBUSTION - SE REQUIERE DE PREPARATIVOS EN EL TIEMPO	- TIPO DE CAPTACION - LINEAS DE CONDUCCION ENTRE POZOS Y SAI DE TRATAMIENTO - EQUIPO DE TRATAMIENTO PARA LA PURIFICACION DE BIOMASA COMBUSTIBLE - EQUIPO DE DISTRIBUCION - SISTEMAS DE FIDELIZACION DE BIOMASA COMBUSTIBLE - CONSUMIDOR PARA LA COMBUSTION	
COMBUSTIBLE PARA VEICULOS		- BIOMASA COMBUSTIBLE - BIOMASA COMBUSTIBLE - BIOMASA COMBUSTIBLE	- BIOMASA COMBUSTIBLE - BIOMASA COMBUSTIBLE - BIOMASA COMBUSTIBLE	- TIPO DE CAPTACION - LINEAS DE CONDUCCION ENTRE POZOS Y SAI DE TRATAMIENTO - EQUIPO DE TRATAMIENTO PARA LA PURIFICACION DE BIOMASA COMBUSTIBLE - EQUIPO DE DISTRIBUCION - SISTEMAS DE FIDELIZACION DE BIOMASA COMBUSTIBLE - CONSUMIDOR PARA LA COMBUSTION	EL USO DE BIOMASA COMBUSTIBLE EN VEICULOS ES ALTO EN ALGUNAS PLANTAS INDUSTRIALES QUE SE ALMACENAN EN UN TANQUE GENERAL DE BIOMASA COMBUSTIBLE EN EL CENTRO DE TRATAMIENTO
GENERACION DE BIOMASA		- BIOMASA COMBUSTIBLE - BIOMASA COMBUSTIBLE - BIOMASA COMBUSTIBLE	- BIOMASA COMBUSTIBLE - BIOMASA COMBUSTIBLE - BIOMASA COMBUSTIBLE	- TIPO DE CAPTACION - LINEAS DE CONDUCCION ENTRE POZOS Y SAI DE TRATAMIENTO - EQUIPO DE TRATAMIENTO PARA LA PURIFICACION DE BIOMASA COMBUSTIBLE - EQUIPO DE DISTRIBUCION - SISTEMAS DE FIDELIZACION DE BIOMASA COMBUSTIBLE - CONSUMIDOR PARA LA COMBUSTION	EL BIOMASA COMBUSTIBLE EN VEICULOS ES ALTO EN ALGUNAS PLANTAS INDUSTRIALES QUE SE ALMACENAN EN UN TANQUE GENERAL DE BIOMASA COMBUSTIBLE EN EL CENTRO DE TRATAMIENTO

**COMBUSTIBLE DOMESTICO  
DISTRIBUCION DIRECTA**



- ① PUNTO DE EXTRACCION
- ② LINEA DE CONEXION
- ③ TANQUE SEPARADOR DE CONDENSADOS
- ④ SOPLADOR
- ⑤ MEDIDOR DE PRESION
- ⑥ FILTRO DE ACIDO SULFURICO
- ⑦ TURBOCOMPRESORES
- ⑧ REDUCTOR DE PRESION
- ⑨ RED DE DISTRIBUCION

ESQ, V 4



- Se requiere de un programa de conversión de equipos, dado que los convencionales no son adecuados para el quemado del biogas.
- Debe optimizarse y minimizarse el radio de distribución debido al alto costo de la red de tuberías.
- Una falla eventual en el equipo o las fluctuaciones en la generación afectan directamente la distribución causando discontinuidad en el servicio.

### **a.3) Sistema:**

- Pozos de Captación.
- Líneas de conexión entre pozos y cabezal general.
- Equipo de tratamiento preliminar (eliminación del equipo de arrastre y ácido sulfhídrico).
- Sistema de dos turbocompresores (uno para relevo) para presurización y despacho de gas.
- Medidor central de vacío.
- Red de distribución domiciliaria.
- Extracción soporte, reductora de presión.
- Instalaciones domiciliarias internas.

### **b) Domiciliaria indirecta.**

Consiste en la inyección del biogas en la red existente de algún concesionario local de gas para su distribución domiciliaria, como se ve en el esquema V.5.

### **b.1) Ventajas:**

- No se requiere de la construcción de la red de distribución.
- No se requiere la adaptación de equipos domiciliarios para el quemado.
- Dado que el biogas solo se inyecta en cantidades específicas, las fluctuaciones en el suministro se absorbe sin problemas por el sistema general.

### **b.2) Desventajas:**

- Se deben respetar los límites de intercambio entre el biogas y el gas manejado (hay una relación volumétrica de mezclado definida), de tal manera que no se requieren adaptaciones subsecuentes a los equipos domiciliarios de quemado.
- Es posible que se requiera de la remoción del CO<sub>2</sub> existente en el biogas, dado que éste en presencia de agua es muy corrosivo, por lo que es necesario un equipo de tratamiento adicional para cumplir las normas de operación de las compañías de gas.
- En la mayoría de los casos es necesario una deshidratación exhaustiva del gas, para evitar corrosión en la línea de transmisión de la concesionaria.
- Se requiere de un incremento de presión para la inyección en la red de transmisión de la concesionaria.

### **b.3) Sistemas.**

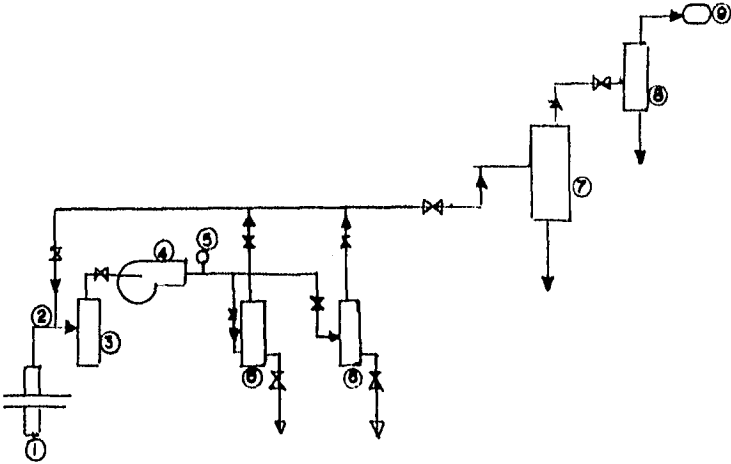
El sistema consiste:

- Pozos de captación.
- Líneas de conexión entre pozos y cabezal genera.
- Equipo de tratamiento preliminar (remoción de condensados y ácido sulfhídrico).
- Sistema de deshidratación.
- Sistema de eliminación de CO<sub>2</sub>.
- Compresor de presionamiento.

### **b.4) Observaciones:**

La distribución indirecta es más ventajosa y segura porque se elimina la construcción de la red de distribución y la adaptación de equipo domiciliario.

COMBUSTIBLE DOMESTICO  
DISTRIBUCION INDIRECTA



- ① POZOS DE EXTRACCION
- ② LINEA DE CONEXION
- ③ TANQUE SEPARADOR DE CONDENSADOS
- ④ SOPLADOR
- ⑤ MEDIDOR DE PRESION
- ⑥ FILTRO DE ACIDO SULFURICO
- ⑦ SISTEMA DE DESHIDRATACION
- ⑧ SISTEMA DE ELIMINACION DE CO<sub>2</sub>
- ⑨ COMPRESOR PARA PRESIONAMIENTO

E.S.Q. V. 5

### **c) Distribución Industrial.**

El sistema difiere poco del señalado para distribución residencial directa, salvo el requerir mayor potencia de los turbocompresores y mayor capacidad del medidor central de vacío como se ve en el esquema V.6.

#### **c.1) Ventajas:**

- Generalmente las instalaciones industriales se diseñan para un sistema de quemado dual de combustible (ejemplo gas-petróleo), lo que facilita su utilización.
- La distribución del biogas a las industrias no requiere de un tratamiento sofisticado del gas, siendo suficiente la remoción de condensados.
- Su utilización sirve como estrategia de reducción de consumo de combustibles fósiles (petróleo, diesel, combustóleo).
- Se quema eficientemente sin dejar residuos tóxicos, lo que es una ventaja en cuanto a exigencias de control ambiental.

#### **c.2) Desventajas:**

- El consumidor industrial requiere grandes volúmenes de gas.

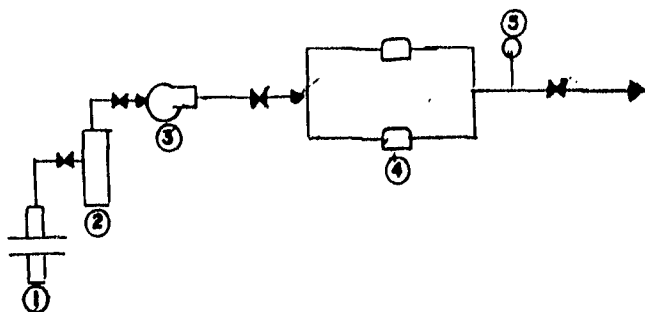
#### **c.3) Sistema:**

- Pozos de captación.
- Líneas de conexión entre pozos y cabezal general.
- Separador de condensados.
- Sistema de turbocompresores.
- Medidor central de vacío.

#### **c.4) Observaciones:**

La distribución industrial del biogas es la alternativa más ventajosa en cuanto a inversión y utilidades cuando se tiene alguna planta industrial cercana al sitio de disposición final; de no ser así, se debe efectuar un estudio económico de costo beneficio para evaluar la viabilidad de su utilización.

## COMBUSTIBLE PARA USO INDUSTRIAL



- ① POZOS DE EXTRACCION
- ② TANQUE SEPARADOR DE CONDENSADOS
- ③ SOPLADOR
- ④ TURBOCOMPRESORES
- ⑤ MEDIDOR DE VACIO

ESQ.V.6

#### **d) Generación de Energía Eléctrica.**

El gas se inyecta en un motor de combustión interna (a presiones típicas de 0.35 a 0.70 kg./cm<sup>2</sup>, cuya carburación se modifica para permitir una entrada adecuada de aire (10%) para la combustión; el motor acciona un generador que produce energía eléctrica.

Como opción puede ser utilizada una turbina de vapor, lo cual resulta menos adecuado pues se necesita una etapa intermedia de compresión (10 a 20 kg./cm<sup>2</sup>), para poder inyectar el gas a la turbina, lo que convierte a esta opción en menos ventajosa. El proceso se muestra en el esquema V.7.

##### **d.1) Ventajas:**

- Solo es necesario eliminar el ácido sulfhídrico del biogas y los condensados.
- El costo de inversión es relativamente bajo, pues además del equipo y dispositivos básicos sólo se requiere de motor de combustión interna.
- El uso para la generación de electricidad puede ayudar al abastecimiento de energía a localidades cercanas, o bien para las mismas instalaciones que se proyecten construir en los sitios de disposición final.
- El costo de producción y mantenimiento es bajo comparado con otras posibilidades de uso como la producción de metanol o de combustible para automóviles.

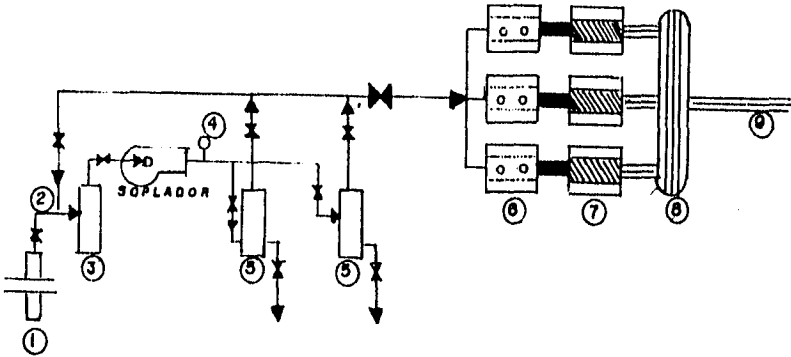
##### **d.2) Desventajas:**

- El motor de combustión interna debe sufrir variaciones en el sistema de carburación.
- El motor también debe estar diseñado para funcionar en forma dual en cuanto al quemado de combustible para cubrir las fluctuaciones tanto de suministro como de poder calorífico (no debe ser menor de 19 kg./lts.) del biogas.
- Pueden existir restricciones políticas en cuanto a la integración a la red pública o a la generación.

##### **d.3) Sistema:**

- Pozos.
- Líneas de conexión entre pozos y cabezal general.
- Equipo de tratamiento preliminar (eliminación de condensados y ácido sulfhídrico).

## GENERACION DE ELECTRICIDAD



- ① POZOS DE EXTRACCION
- ② LINEA DE CONEXION
- ③ TANQUE SEPARADOR DE CONDENSADOS
- ④ MEDIDOR DE PRESION
- ⑤ FILTROS DE ACIDO SULFURICO
- ⑥ MOTORES DE COMBUSTION INTERNA
- ⑦ GENERADORES DE ELECTRICIDAD
- ⑧ INTERRUPTOR
- ⑨ LINEA DE ALTO VOLTAGE

ESQ. V.7

- Soplador o bomba de vacío.
- Motor de combustión interna.
- Generador de electricidad.
- Tablero de control y distribución.

#### **e) Combustible para Vehículos.**

Esta posibilidad de uso es la que requiere de un tratamiento previo más exhaustivo, ya que debe eliminarse casi la totalidad del CO<sub>2</sub>, (pues además de ser un gas no combustible provoca corrosión en presencia de agua), seguido por una compresión a presiones del orden de 200 kg./cm<sup>2</sup>. Se puede ver en el esquema V.8.

##### **c.1) Ventajas:**

- Puede ser un ahorro de energéticos en países que carecen de combustibles fósiles como el petróleo.
- Se pueden alcanzar eficiencias del orden de 10 km./m<sup>3</sup>, de gas en motores de gasolina y de 3.5 en motores diesel (85% biogas 15% diesel).
- La combustión del biogas produce sustancias no tóxicas, lo que ayuda al control de la contaminación.

##### **c.2) Desventajas:**

- Se necesita eliminar casi en su totalidad el contenido de CO, lo cual incrementa el número de equipos, mantenimiento y personal.
- Deben utilizarse presiones elevadas para que el manejo del biogas sea adecuado.
- Se requiere de cilindros de construcción especial para el almacenamiento del biogas manejado; deben poseer una resistencia a la presión elevada, debiendo ser los más ligeros posibles, (de no suceder así, la disposición es incorrecta para el manejo del comprimido y del tanque pesado en el interior del vehículo).
- El uso como combustible se restringe a flotas públicas donde los vehículos deban ser guardados en un garage general en el que puedan efectuar reabastecimiento; para ello tienen que establecerse una gran cantidad de puestos, lo que hace poco atractiva su utilización como combustible.
- El equipo de compresión debe ser tal que pueda alcanzar presiones del rango de 170 a 245 kg./cm<sup>2</sup>. a fin de poder almacenar la mayor cantidad posible por cilindro.



Sin embargo, existe la restricción de que posiblemente no se cuente con equipo estándar que cubra el servicio, por lo que se tiene que construir, incrementándose el costo del equipo.

### **e.3) Sistemas:**

- Pozos de captación.
- Líneas de conexión entre pozos y cabezal general.
- Equipo de pretratamiento (eliminación de condensados y ácido sulfhídrico).
- Filtros.
- Equipo de compresión.
- Torre de lavado.
- Bomba de agua a presión.
- Condensadores.
- Sistema de almacenamiento.
- Sistema de distribución de llenado.

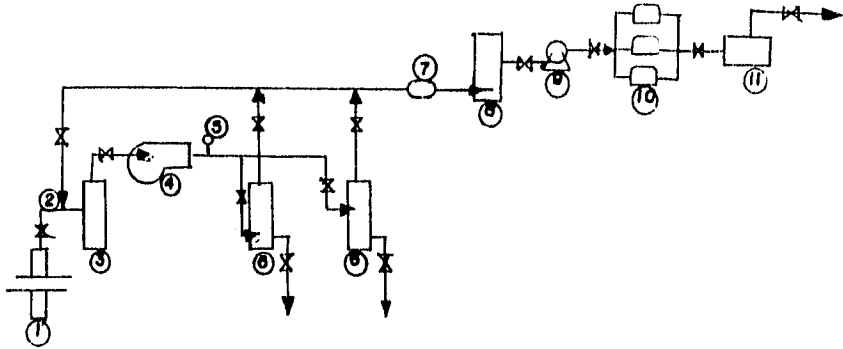
### **e.4) Observaciones:**

La producción de metanol mediante el tratamiento del biogas es costosa, sin embargo representa una posibilidad de aprovechamiento.

El uso del biogas como combustible en automóviles, trae consigo la necesidad de una conversión del sistema de carburación y la colocación de cilindros de almacenamiento; las adaptaciones son:

- Instalación de cilindros de almacenamiento.
- Regulador de presión.
- Mezclador gas-aire montado en el carburador.
- Selector de combustible y manómetro.
- Conexión para reabastecimiento.

## COMBUSTIBLE PARA VEHICULOS



- ① POZOS DE EXTRACCION
- ② LINEA DE CONEXION
- ③ TANQUE SEPARADOR DE CONDENSADOS
- ④ SOPLADOR
- ⑤ MEDIDOR DE PRESION
- ⑥ FILTROS DE ACIDO SULFURICO
- ⑦ COMPRESOR
- ⑧ TORRE DE LAVADO
- ⑨ BOMBA DE AGUA
- ⑩ CONDENSADORES
- ⑪ TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE GASES

ESQ. V.8

## **f) Producción de metanol $\text{CH}_3\text{OH}$ .**

Es un líquido incoloro, móvil, de olor agradable, volátil.

Sus efectos sobre el organismo son análogos a los del etilismo, pero es más tóxico que el etanol, porque se elimina mucho más lentamente por el organismo y ataca el nervio óptico produciendo ceguera.

Es un buen disolvente de materias grasas y resinas. Se emplea como "medio reaccional" por ejemplo, en la fabricación de nitrilo fenilacético por acción del cloruro de bencilo sobre el cianuro de sodio, se efectúa en medio del alcohol metílico.

A título de disolvente o diluyente se emplea en la fabricación de barnices y en la desnaturalización de etanol para usos industriales.

El metanol es una materia prima de síntesis, sirve para fabricar aldehído fórmico.

Se utiliza en la fabricación de un gran número de derivados metilados utilizados en la industria de materias colorantes, productos farmacéuticos y perfumes. El alcohol metílico se utiliza también como carburante por su poder ideotonante y su gran calor de vaporización. Finalmente es muy utilizado como antigél.

Una de las formas de obtenerlo es a partir del metano del gas natural por combustión parcial o conversión con vapor de agua.

Para la utilización del biogas en la producción de metanol se requiere sólo eliminar el ácido sulfhídrico y condensados existentes; está constituido por tres etapas principales una de síntesis, una de formación de metanol y una de purificación. El Proceso se observa en el esquema V.9.

### **f.1) Ventajas:**

- La compresión promedio del biogas favorece la formación de metanol con altos rendimientos de utilización.
- Se forma un líquido que puede utilizarse como combustible sin los riesgos inherentes de la utilización del gas.

- El manejo y almacenamiento de metanol cuando se utiliza como combustible no requiere de equipo de construcción especial.

### **f.2) Desventajas:**

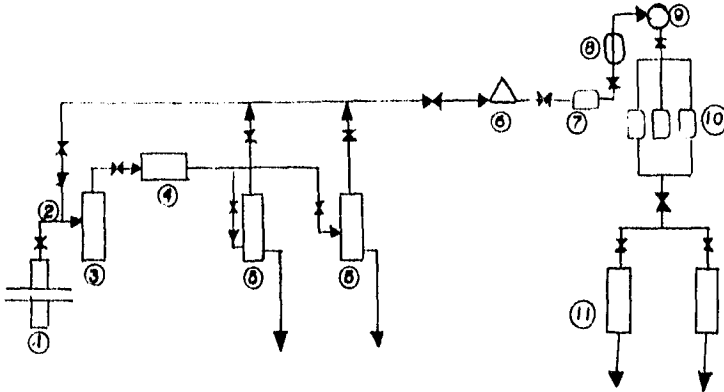
- Para producir metanol se requiere un gran número de equipo.
- Los costos de la planta son de los más elevados de entre las posibilidades de uso consideradas.
- Debido al número de equipos involucrados, los costos de operación y mantenimiento son elevados.
- Según algunos autores, la producción de metanol sería viable económicamente para volúmenes de gas superiores a 140,000 m<sup>3</sup>/día., o sea para sitios de disposición final de grandes proporciones.
- Se requiere de una cantidad apreciable de servicios auxiliares para el funcionamiento de los equipos (agua de enfriamiento, electricidad, aire de planta e instrumentos).

### **f.3) Sistema:**

- Pozos de captación.
- Líneas de conexión entre pozos y cabezal general.
- Equipo de tratamiento preliminar (eliminación de condensados y ácido sulfhídrico).
- Reformador primario.
- Equipo de compresión.
- Convertidor de metanol.
- Interembiadores de calor.
- Condensadores.
- Torres de destilación (una si su uso es como combustible. dos si se quiere obtener metanol de alta pureza).

Haciendo una jerarquización de las alternativas antes mencionadas en base a la cantidad de equipo utilizado, se tiene el siguiente resumen en la tabla V.2.

CONVERSION A METANOL



- ① POZOS DE EXTRACCION
- ② LINEA DE CONEXION
- ③ TANQUE SEPARADOR DE CONDENSADOS
- ④ SOPLADOR
- ⑤ FILTROS DE ACIDO SULFURICO
- ⑥ REFORMADOR PRIMARIO
- ⑦ COMPRESOR
- ⑧ CONVERTIDOR DE METANOL
- ⑨ INTERCAMBIADOR DE CALOR
- ⑩ CONDENSADORES
- ⑪ TORRES DE DESTILACION

ESQ. V.0

TABLA V.2

EQUIPAMIENTO NECESARIO PARA EL  
 APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS

APROVECHAMIENTO	EQUIPO
COMBUSTIBLE DOMESTICO	- POZOS. - RED DE CAPTACION. - UNIDAD DE PRETRATAMIENTO - EQUIPO DE TRANSPORTE (SOPLADOR Y LINEA DE CONDUCCION).
GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA	- POZOS. - RED DE CAPTACION. - UNIDAD DE PRETRATAMIENTO - MOTOR DE COMBUSTION INTERNA ADAPTADO PARA QUEMAR GAS.
PRODUCCION DE METANOL	- EQUIPO Y ASPECTOS ASOCIADOS AL PERSONAL, MANTENIMIENTO, EQUIPO DE RELEVO) ASI COMO DE SERVICIOS AUXILIARES. - POZOS. - RED DE CAPTACION. - UNIDAD DE PETRATAMIENTO (REMOCION DE CONDENSADOS Y ACIDO SULFHIDRICO). CONDICIONES EXTREMAS DE OPERACION (ALTAS PUREZAS Y ELEVADAS PRESIONES).

Algunas objeciones que impiden la aplicación de dichas alternativas para utilizar el biogas son:

a) Información insuficiente, dependiente de la generación del biogas del relleno sanitario, la producción total de éste, la eficiencia de recuperación y las variaciones de su composición a largo plazo.

b) La información en el diseño y técnicas operativas para la extracción y recuperación del biogas, son insuficientes para permitir el aseguramiento en términos cuantitativos y una razonable evaluación de la efectividad del costo.

Concluyendo de esta manera con el capítulo correspondiente a las alternativas de aprovechamiento del biogas; en seguida se presenta un ejemplo de aplicación respecto a la generación, control y aprovechamiento del biogas en un sitio de disposición final de desechos sólidos municipales.

# CAPITULO VI

## EJEMPLO DE APLICACION

En México la disposición final de desechos sólidos se ha venido efectuando en un alto porcentaje de manera incontrolada en sitios técnicamente inapropiados (tiraderos clandestinos), lo cual ha contribuido al incremento del deterioro ambiental.

Sin embargo, si dichos sitios son controlados adecuadamente, pueden ser fuentes generadoras de energía.

Algunos de estos sitios se encuentran clausurados y saneados; como los ubicados en los municipios del Estado de México, entre los que se pueden mencionar: Naucalpan en la Colonia "Rincón Verde", Ecatepec en la Colonia Chiconautla, Atizapán de Zaragoza en la Colonia "Las Aguilas", Nicolás Romero en la colonia "El Globo", etc..

Por lo anterior se considera pertinente presentar un ejemplo para uno de estos sitios.

El sitio en estudio es el tiradero denominado "Las Aguilas", ubicado dentro de la Colonia Las Aguilas, en el municipio de Atizapán de Zaragoza Estado de México.

En dicho sitio, se propone la forma para controlar y aprovechar el biogas que se produce; para ello en seguida se proporcionan los datos necesarios utilizados en los diferentes cálculos y estimaciones:



## **VI.1) DATOS GENERALES DEL SITIO.**

### **a) Descripción del sitio:**

Tiradero clausurado de desechos sólidos municipales, en proceso de ser recuperado para su aprovechamiento como zona de recreación y esparcimiento social. Un panorama general se observa en la fotografía VI.1 del anexo I.

### **b) Ubicación Física:**

El sitio se encuentra en la ladera de una loma. Colinda al Norte con el municipio de Atizapán de Zaragoza, en el ejido de Atizapán en la Colonia Las Aguilas y con el arroyo "Las Minas", al Sur con las calles de Golondrinas del Mar, Avenida Uno y Cabo Bretón. Al Oriente con las calles de Pelicano y Zenzontle y al Poniente diversas calles de las Colonias Sagitario I y Plan Sagitario.

Como se observa en el croquis de localización. Figura VI.1

El acceso al sitio es la continuación de la calle Golondrinas del Mar, a través de un camino ascendente de una longitud aproximada a 1 km., como se observa en la fotografía VI.2 del anexo I.

### **c) Fisiografía:**

Está conformada por lomeríos de topografía medianamente abrupta, rodeado por una serie de cañadas de diferentes dimensiones que se han formado por efecto del intemperismo, el escurrimiento superficial y la urbanización acelerada que se ha presentado en la región.

En la conformación fisiográfica es importante resaltar la influencia del arroyo "Las Minas", mismo que sirve de límite del predio en este punto, así como el lugar de concentración de los escurrimientos superficiales, como se puede ver en las fotografías VI.3 y VI.4, del anexo I.

CROQUIS DE LOCALIZACIÓN DEL TIRADERO  
 "LAS AGUILAS" EN ATIZAPAN DE ZARAGOZA

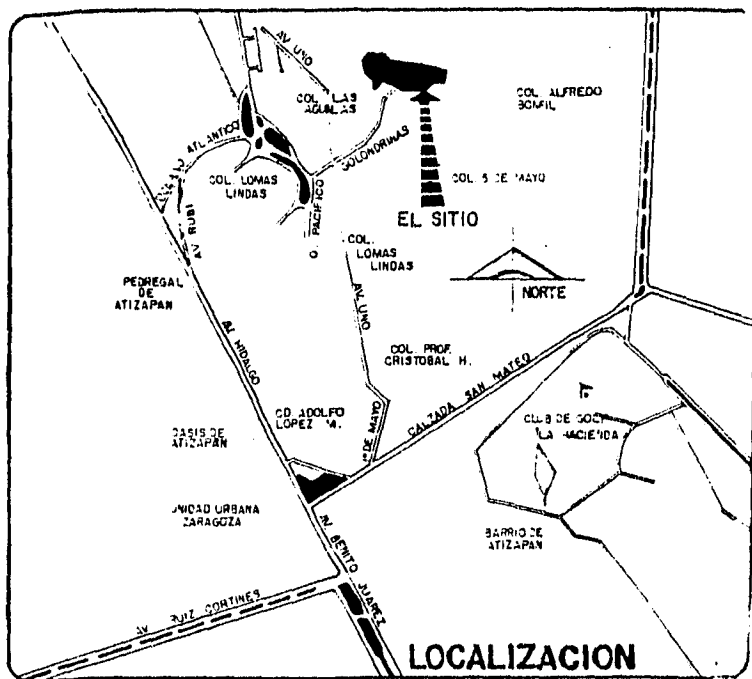


FIG. VI.1

#### **d) Topografía:**

La altimetría del sitio en donde se encuentra ubicado el tiradero "Las Águilas", es accidentada, tiene una superficie de 23.0 Has., circunscrita por una poligonal ligeramente romboide con vértices agudos al Noroeste y Sureste respectivamente y delimitada en tres de sus cuatro lados por la zona urbana y en el último por el arroyo "Las Minas".

El área efectiva que contiene los residuos sólidos es de aproximadamente 18 Has.

Existen una serie de terrazas y taludes que han sido conformadas durante el saneamiento del sitio y sirven como caminos de acceso para salvar los desniveles entre plataformas.

La mayor parte de los taludes presentan una inclinación de 3:1 (tres horizontal por uno vertical), no así en los puntos más bajos donde los taludes son de aproximadamente 90° respecto al horizonte, lo cual representa un riesgo a la estabilidad del conjunto.

#### **e) Hidrología superficial:**

El único cuerpo de agua superficial en la zona es el arroyo "Las Minas", al Norte de la poligonal, con un escurrimiento perenne de bajo caudal que aumenta en épocas de lluvias.

Sin embargo, los asentamientos humanos irregulares que se localizan en ambos márgenes aguas arriba del lugar, descargan sus aguas residuales en este cuerpo contaminándolo desde antes que entre al tiradero. Así el aspecto actual del arroyo es el de un canal a cielo abierto que conduce aguas negras y desechos sólidos, como se observa en la fotografía VI.3., del anexo I.

#### **f) Geohidrología Subterránea:**

De acuerdo a estudio realizados en el subsuelo, no se detectaron cuerpos de agua a profundidades entre 75 y 90 m., por lo que se deduce que éstos se encuentran a profundidades mayores, por lo tanto la niveles de contaminación de los mantos freáticos es casi nula.

**g) Geología:**

El tiradero se encuentra localizado sobre una estructura de depósitos ígneos extrusivos, donde destacan los mantos de toba altamente compacta con intercalaciones de arena y grava.

Esta estructura presenta moderada fracturación, con parámetros de permeabilidad baja.

**h) Ingreso de residuos sólidos al sitio:**

333.0 ton/día. (Dato reportado por la Secretaría de Ecología del Estado de México).

**i) Antigüedad del sitio:**

15 años aproximadamente.

**j) Cantidad total de residuos depositados durante ese periodo de tiempo:**

1,825,000 toneladas

**k) Espesor o altura de los estratos de residuos sólidos:**

20 m., aproximadamente.

## **VI.2) IMPORTANCIA DEL CONTROL DEL BIOGAS EN EL TIRADERO "LAS AGUILAS".**

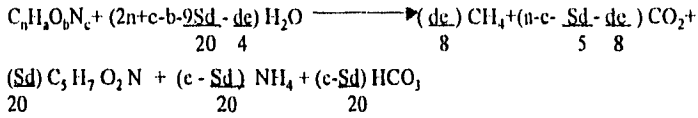
El control del biogas debe ser considerado en el sitio de "Las Aguilas" por las siguientes razones:

- a) De acuerdo con los cálculos efectuados para 1,825,000 Ton., se tiene una producción máxima diaria de 62.61 lts. biogas/kg., de residuo húmedo, los cuales deben ser controlados adecuadamente para evitar posibles riesgos a la población adyacente.
- b) Se tienen asentamientos humanos importantes en las áreas circundantes y contiguas al sitio de disposición final de residuos sólidos. Como se observa en las fotografías VI.1 y VI.2 del anexo I. Los cuales están expuestos a los efectos del biogas.
- c) El sitio una vez clausurado y saneado se pretende utilizar para áreas de esparcimiento y deportivas, ya que en esta zona de la Colonia se carecen de éstas; por lo que se estima una gran afluencia de visitantes a dicho sitio, expuestos al biogas.
- d) Por la falta de control de los residuos sólidos en el área conurbada de la Ciudad de México y por el desarrollo industrial que caracteriza a esta región, existe la evidencia del depósito de residuos industriales peligrosos (tales como aceites quemados, tintas, pinturas, ollín, medicamentos caducos, etc.), a lo largo de la vida del sitio de disposición final.
- e) De acuerdo con los estudios geofísicos, existe un gran número de fracturas en el suelo, principalmente del lado donde se encuentra la zona urbana. Estas fracturas constituyen una condición favorable para que se presente una emigración de biogas en forma lateral.

### VI.3) ESTIMACION DE LA PRODUCCION DE BIOGAS.

Como ya se mencionó, para estimar la producción de biogas se aplican los métodos para calcular el metano.

a) Utilizando el método empírico estequiométrico para el cálculo del metano se tiene:



Se cuantifica el número de moles de cada uno de los componentes generados en la reacción.

Para ello se efectúan los siguientes cálculos:

b) Conociendo el porcentaje en peso húmedo de la composición química de los desechos sólidos, de acuerdo con el análisis de muestras de residuos tomadas en el sitio de estudio, se calculan los coeficientes estequiométricos de cada componente.

#### COMPOSICION QUIMICA DE LOS DESECHOS.

	% PESO SECO	% PESO HUMEDO	COEFICIENTE	COEFICIENTE
C	17.78	62.25	5.18	12.97
H	2.04	7.14	7.14	17.85
O	7.15	25.03	1.56	3.90
N	1.59	5.60	0.4	1.0
	28.56	100.00		

Los coeficientes estequiométricos son:

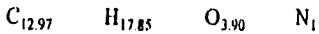
$$n = 12.97$$

$$a = 17.85$$

$$b = 3.90$$

$$c = 1$$

De acuerdo a los cálculos anteriores la fórmula empírica de los desechos es:



c) Se calcula la fracción de sustrato que se convierte en material celular la cual es:

$$S = ae \frac{0.2 f_{\text{oc}}}{f_{\text{oc}}} = 0.2 \frac{(0.2 \times 0.02)}{0.02} = 0.04$$

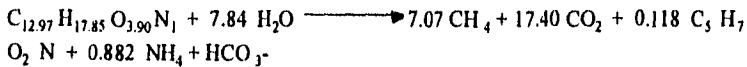
Suponiendo los siguientes valores para la actividad biológica dentro del relleno  $ae = 0.2$ ,  $f = 0.02$  y tomando un tiempo infinito para  $\text{oc}$ , obtenemos que  $S = 0.04$ .

Utilizando este valor de  $S$  para propósitos de cálculo dado:

d) Tenemos que:  $e = 1 - S = 1 - 0.04 = 0.96$

e) Siendo  $d = 4n + a - 2b - 3c = 4(12.97) + 17.85 - 2(3.90) - 3(1) = 58.93$

f) Sustituyendo valores en la fórmula empírica, se tienen los siguientes resultados.



La cual se traduce:

1 mol de materia orgánica + 7.84 moles de agua confinados en un relleno sanitario en condiciones anaerobias, son transformados a 7.07 moles de metano + 17.40 moles de bióxido de carbono + 0.118 moles de materia celular + 0.882 moles de amonio + 0.882 moles de carbonato de monohidrógeno o bicarbonato.

g) El peso molecular de la fórmula empírica es:

$$P_m = 12 (12.97) \text{ g/mol} + 1 (17.85) \text{ g/mol} + 16(3.90) \text{ g/mol} + 14(1) \text{ g/mol} = 249.89 \text{ g/mol.}$$

$$\text{No. Moles} \times P_m = 1 \text{ mol} \times 249.89 \text{ g/mol} = 249.89 \text{ g.}$$

h) Considerando que 1 mol de cualquier gas = 22.4 lts. a TPN.

Convertimos a litros:

$$7.07 \text{ mol. CH}_4 (22.4 \text{ l}) = 158.37 \text{ lts.}$$

$$17.40 \text{ mol CO}_2 (22.4 \text{ l}) = 389.76 \text{ lts.}$$

i) Entonces el volumen de metano producido por peso unitario de residuo compuesto húmedo es:

$$\frac{158.37 \text{ lts}}{2.5 \text{ Kg}} \times 0.2856 = 18.09 \text{ lts } \frac{\text{CH}_4}{\text{Kg residuo húmedo}}$$

j) Y el volumen de bióxido de carbono producido por peso unitario de residuo compuesto húmedo es:

$$\frac{389.76 \text{ lts}}{2.05 \text{ Kg}} \times 0.2856 = 44.52 \text{ lts } \frac{\text{CO}_2}{\text{Kg residuo húmedo}}$$

Considerando al metano y al bióxido de carbono como los dos componentes principales del biogas se tienen:

**62.61 lts. biogas / Kg. residuo húmedo.**

Desde el punto de vista práctico es necesario conocer durante que tiempo se genera el volumen de metano, para ello se acude al método cinético de "Palos Verdes".

a) Conociendo la composición de residuos sólidos confinados en el sitio de estudio, se tiene la tabla VI.1.



**TABLA VI.1**

**COMPOSICION TIPICA DE LOS RESIDUOS SOLIDOS EN EL TIRADERO DE "LAS AGUILAS" EN ATIZAPAN DE ZARAGOZA.<sup>(1)</sup>**

<b>SUBPRODUCTOS</b>	<b>%</b>
RESIDUOS ALIMENTICIOS	43.08
RESIDUOS DE JARDINERIA	5.85
FIBRA DURA VEGETAL	8.10
PAPEL	12.64
ENVASES DE CARTON	1.62
CARTON	3.28
TRAPO	2.37
PLASTICO	6.73
LATA	1.68
VIDRIO	6.78
OTROS	7.87
TOTAL	100.00

(1) SECRETARIA DE ECOLOGIA DEL ESTADO DE MEXICO, "PROYECTO DE CLAUSURA DEL TIRADERO LAS AGUILAS DE ATIZAPAN DE ZARAGOZA", p.80.

b) DE LA TABLA VI.2 SE OBTIENEN LAS TRES CATEGORIAS DE SUBPRODUCTOS POR SU VELOCIDAD DE DEGRADACION

**TABLA VI.2**

**CATEGORIAS DE SUBPRODUCTOS POR SU VELOCIDAD DE DEGRADACION**

CATEGORIAS	SUBPRODUCTOS	PORCENTAJE EN PESO DE DESECHOS	RESPECTO AL TOTAL DEPOSITADOS	% DE LA FRACCION ORG. TOTAL
A RAPIDAMENTE DEGRADABLES	RESIDUOS ALIMENTICIOS	43.08	48.93	58.48
	RESIDUOS DE JARDINERIA	5.85		
B MODERADA VEL. DE DEGRADACION	FIBRA DURA	8.10	28.01	33.47
	VEGETAL	12.64		
	PAPEL	1.62		
	ENV. DE CARTON	3.28		
	CARTON	2.37		
C LENTAMENTE DEGRADABLE	PLASTICO	6.73	6.73	8.04
		83.67	83.67	99.99

- Desechos recibidos durante 15 años = 1'825,000 Ton.
- De los cuales el 83.67% son de origen orgánico.
- Por lo tanto la cantidad de residuos orgánicos es de 1'526,977.5 Ton.
- Producción de metano = 18.09 m<sup>3</sup> (Obtenido por el metodo estequiometrico) Ton.

c) Aplicando el modelo de "Palos Verdes".

$$G_{1i} = \frac{L_{0i}}{2} \exp [-K_{1i} t_{1/2}^i + k_{1i} t] \quad t < t_{1/2} \quad \text{-----(1)}$$

$$L_{2i} = \frac{L_{0i}}{2} \exp (-k_{2i} t + k_{2i} t_{1/2}^i) \quad \text{-----(2)}$$

c.1) Calculando Lo

Lo= Desechos acumulados en 15 años (% fracción orgánica)

$$L_{0A} = 1'526,977.5 (0.5848) = 892,976.44$$

$$L_{0B} = 1'526,977.5 (0.3347) = 511,079.37$$

$$L_{0C} = 1'526,977.5 (0.0804) = 122,768.99$$

c.2) Calculando  $k_1$  y  $k_2$

Donde:

$$k_1 = \frac{\ln(50)}{t_{1/2}}$$

$$k_2 = \frac{\ln(50)}{t_{99/100} - t_{1/2}}$$

TABLA VI.3

$K_1$  y  $K_2$

CATEGORIAS DE RESIDUOS	% EN PESO NORMALIZADO	$t_{1/2}^*$	$t_{99/100}^*$	$k_1$	$k_2$
A	0.5842	2	4	1.956	1.956
B	0.3352	5	12	0.782	0.559
C	0.0803	25	60	0.156	0.112

\* Tiempo supuesto en años para sitios de disposicion final de residuos sólidos que producen biogas después de 10 años.

c.3) Sustituyendo en las ecuaciones (1) y (2), se tiene los resultados siguientes:

TABLA VI. 4

RESUMEN DE RESULTADOS

años	$G_A$	$G_B$	$G_C$
1	63,143.69	11,193.99	1,452.31
2	446,488.22,	24,468.28	1,697.50
3	63,143.69	53,483.74	1,984.00
4	8,929.90	116,906.87	2,319.04
5	1,262.90	255,539.68	2,710.56
6	178.61	364,966.74	3,168.17
7	25.26	83,544.36	3,703.05
8	3.58	47,769.37	4,328.22
9	0.51	27,313.41	5,058.94
10	0.08	15,617.28	5,913.02
11	0.02	8,929.66	6,911.29
12	0.0	5,105.81	8,078.10
13	0.0	2,919.40	9,441.90
14	0.0	1,669.26	11,035.94
15	0.0	954.45	12,899.09

Entonces la producción de metano en el año 15 es de 13,853.54m<sup>3</sup>

Calculando los logaritmos de las ecuaciones (1) y (2), se tienen los siguientes resultados:

$$\text{Log } G_{1i} = \text{Log } \frac{K_{1i} \cdot L_{oi}}{2} - \frac{K_{1i} \cdot t_i/2_i}{2.3} + \frac{K_{1i} t}{2.3}$$

$$\text{Log } L'_{2i} = \text{Log } \frac{K_{2i} \cdot L_{oi}}{2} + \frac{K_{2i} \cdot t_i/2_i}{2.3} - \frac{K_{2i} t}{2.3}$$

Donde:

$i = A, B, C:$

TABLA VI.5

LOGARITMOS DE  $G_i$

$t$ años	Log. $G_A$	Log. $G_B$	Log. $G_C$
1	5.09	4.96	5.14
2	5.94	5.30	5.09
3	3.54	5.64	5.04
4	2.74	5.98	4.99
5	1.94	6.32	4.95
6	1.14	4.92	4.90
7	0.34	4.68	4.85
8	0.0	4.44	4.80
9	0.0	4.20	4.75
10	0.0	3.96	4.71
11	0.0	3.72	4.66
12	0.0	3.48	4.61
13	0.0	3.24	4.56
14	0.0	3.00	4.58
15	0.0	2.76	4.47

## **VI.4) SISTEMA PROPUESTO PARA EL CONTROL Y TRATAMIENTO DEL BIOGAS.**

Como ya se mencionó en el capítulo IV, las obras que generalmente se deben construir para el control del biogas en sitios de disposición final de desechos sólidos, son principalmente: la impermeabilización del sitio; la construcción de pozos de extracción de biogas (para venteo, incineración o aprovechamiento) y adicionalmente los pozos de monitoreo fuera del sitio para detectar migraciones.

Tomando como referencia estas acciones, se propone el tipo de control que se puede llevar a cabo en el tiradero "Las Aguilas", municipio de Atizapán de Zaragoza.

### **VI.4.1) IMPERMEABILIZACION DEL SITIO.**

La superficie del terreno que ocupa el tiradero "Las Aguilas", no ha sido impermeabilizada ni de manera artificial ni natural, por lo que las emisiones de contaminantes tienden a fluir incontroladamente en sentido horizontal y vertical.

Esta condición del sitio aparentemente no ha afectado al manto freático, pues de acuerdo a los resultados geohidrológicos, éste se encuentra a profundidades mayores de 95 m.; además de que el tipo de suelo es de permeabilidad baja, según el estudio geológico llevado a cabo.

Debido a que el tiradero se encuentra en la superficie de una ladera, no hay paredes naturales que la delimiten y por lo tanto no es posible efectuar la impermeabilización sobre éstas.

De acuerdo a la fisiografía del sitio, se puede notar que los taludes de las celdas de desechos sólidos, ubicadas en el Norte, tienen una pendiente muy pronunciada, amenazando con derrumbarse principalmente en la época de lluvias que es cuando los residuos se saturan y disminuye la capacidad de carga de los taludes; por otro lado también se puede notar que los desechos están descubiertos y hay escurrimientos de lixiviados y emigraciones de biogas. Como se puede observar en las fotografías VI.5 y VI.6 del anexo I..

Además de las características anteriores, cabe mencionar que existe un arroyo de agua ubicado al norte y al pie del sitio, en el cual actualmente se descargan las aguas residuales domiciliarias de las zonas aledañas y acarrea una gran cantidad de residuos sólidos y lixiviados hacia la población; así como agua pluvial en época de lluvias.

Por estos motivos se recomienda que en dicha zona, particularmente al pie de los taludes mencionados, se lleven a cabo una serie de obras de ingeniería para prevenir posible siniestros.

Dichas obras pueden ser: la construcción de un muro de contención de aproximadamente 20.0 m. de altura por 1.5 Km. de longitud, la construcción de un canal para la captación de los lixiviados y el agua pluvial que escurre de los taludes, el entubamiento del arroyo de aguas negras y por otro lado la impermeabilización de los taludes (aproximadamente 3.0 Ha., ver plano 1 del anexo 1) con materiales sintéticos específicamente con geosintéticos (geotextil, geomembrana, geotextil) para evitar la emigración horizontal del biogas hacia la zona habitacional aledaña.

Esta impermeabilización se puede llevar a cabo de la siguiente manera:

- a) Se realiza un levantamiento topográfico para conocer el área por impermeabilizar (3.0 Ha. aproximadamente.)
- b) Se conforman los taludes dando pendiente de 3:1.
- c) Se tienden los materiales sintéticos, en forma de sandwich (geotextil, geomembrana, geotextil), procediendo primero a la colocación del geotextil el cual se ancla en los extremos superior e inferior en una zanja perimetral de 0.60 m. de ancho x 0.60 m. de profundidad, excavadas en la corona y en el pie del talud.
- d) Sobre dicho geotextil, se coloca la geomembrana, la cual se une con soldadura por extrusión con solapado anclándose en la zanja ya mencionada.
- e) Se coloca la siguiente capa de geotextil para la protección de la geomembrana de los agentes exteriores.

Para evitar que el material de impermeabilización sea destruido, se recomienda la colocación de una capa de cobertura vegetal.

Cabe mencionar que dichos trabajos de impermeabilización deben ser ejecutados por técnicos con amplia experiencia en el ramo.

#### **VI.4.2) SISTEMAS DE EXTRACCION DE BIOGAS.**

Siguiendo la secuencia para la construcción de este tipo de obras, se tienen las siguientes observaciones:

##### **a) Estudios Previos.**

El sitio no presenta problemas de comunicación ya que cuenta con tres accesos amplios (6.0 m. de ancho).

No se tienen problemas políticos ni sociales, ya que el sitio es propiedad estatal y se cuenta con todo el apoyo de las autoridades para realizar este tipo de obras. Sin embargo el presupuesto asignado para estas obras no cubre el costo.

El sitio está conformado en terrazas y taludes siendo posible la construcción de los pozos sobre las primeras, pues la mayor parte de los taludes presentan una inclinación de 3:1 (tres horizontal por una vertical), y en algunos puntos éstos son de aproximadamente 90° respecto al horizonte, lo cual representa un riesgo a la estabilidad del conjunto.

El tiradero se encuentra localizado sobre una estructura de depósitos ígneos extrusivos, donde destacan los mantos de toba con intercalaciones de arena, grava. Presenta moderada fracturación, con parámetros de permeabilidad baja.

El espesor de los estratos que conforman los desechos sólidos confinados desde la superficie hasta el nivel de desplante es de aproximadamente 20.0 m.

##### **b) Sistema Propuesto.**

Atendiendo a las necesidades de controlar el biogas con la mayor eficiencia posible, se recomienda que la extracción se efectúe mediante el sistema activo, por las ventajas que



éste proporciona (ya antes mencionadas), dicho sistema de extracción forzada elimina el riesgo que representa la migración del biogas hacia el exterior.

#### Perforación de los pozos:

Debido a las condiciones del sitio, en donde ya existían grandes volúmenes de desechos confinados antes de iniciar su control, ha sido necesario que los sistemas de extracción tengan que perforarse al final de la obra, es decir en el último nivel.

El nivel de los pozos debe estar en función del espesor de los estratos que conforman los desechos sólidos. En este caso dicho valor promedio es de 20.0 m. partiendo de este valor y el 75% recomendado, se deben barrenar los pozos a una profundidad de 15 m. y un diámetro de 0.40 m. aproximadamente.

#### Distribución de los pozos:

Para el cálculo de la separación de los pozos se aplica la fórmula

$$d = \frac{(2 - a)R}{100}$$

Donde:

d= Espacio entre pozo y pozo.

R= Radio de influencia del pozo de extracción.

a= El traslape requerido.

Para el cálculo del radio se toma:

$$R \text{ (RADIO DE INFLUENCIA)} = \left[ \frac{(QW) C}{K 3.1416 H (Pv) T} \right]^{1/2}$$

Donde:

Qw (Flujo de biogas a través del pozo): 8.335 lts./seg. <sup>42</sup>

<sup>(42)</sup> De acuerdo con experiencias en la medición del flujo de biogas en sitios de disposición final de residuos sólidos, se han detectado de 20 a 30m<sup>3</sup> en pozos de buena producción.

H (Profundidad promedio del pozo): 15 m.

Pv (peso volumétrico de los residuos compactados): 850 Kg./m<sup>3</sup>.

T (Tasa de producción de metano): 8,472 ml/kg./día. <sup>43</sup>

C (fracción de concentración de metano): 0.54

K=(Factores de conversión)= 1.157 x 10<sup>-8</sup> (1/día) / (ml/seg)

Sustituyendo valores:

$$R = [(8.35 \times 0.54) / 1.157 \times 10^{-8} \times 3.1416 \times 15 \times 850 \times 8.472]^{1/2} = (4.509 / 0.003926) = 33.88 = 34$$

Entonces el radio de influencia es:

R(RADIO DE INFLUENCIA): 34 m.

Con el propósito de aprovechar eficientemente la superficie recuperada, se considera un promedio de 40 m. de radio de influencia.

El espaciado de los pozos de extracción esta dado por:

$$d = \frac{2 \cdot (27)}{100} R$$

$$d = \frac{2 \cdot (27)}{100} 40 = 69.2 \text{ m.}$$

Considerando un traslape del 27%.

Aplicando la ecuación anterior, se obtiene una separación entre pozo y pozo, de 69 m., ésta se respeta en la medida de lo posible y está en función de los límites en donde se encuentran confinados los desechos sólidos.

El área de influencia del flujo de biogas es de 2,729.68 m<sup>2</sup>, por lo cual se estimó un número aproximado de 66 pozos; y puesto que ya existen 16, quedan por construir 50.

En el plano 2 del anexo I se presenta la ubicación de los pozos.

---

(43) Dato obtenido en la realización de una serie de mediciones en campo por personal técnico del D.D.F.

### Construcción de los pozos:

En base a las especificaciones técnicas se procede a efectuar la construcción de los pozos, utilizando el siguiente equipo y material.

#### Equipo:

Perforadora sobre orugas, con barrena helicoidal tricónica auxiliada mediante un compresor, planta generadora de energía eléctrica para el compresor utilizado en la extracción del material, taladro, pala manual y carretilla.

#### Material:

Tubería, válvulas, coples y tapones; todo de 4" (0.10 m.) de diámetro y de P.V.C.; tezontle de 2" de diámetro.

### Habilitación de la Tubería:

- El ducto captador de cada pozo se une en su extremo superior mediante un tramo de tubo flexible hacia la red de conducción.
- Se barrena la tubería, los barrenos se hacen de 0.10 m. de largo por 0.005 m. de ancho colocados en configuración "tresbolillo" sobre la superficie de tubo de P.V.C.
- Se arman los tubos captadores, uniendo si es necesario dos o más tramos con coples (las uniones deben quedar herméticamente selladas para evitar fugas), hasta alcanzar la longitud que debe ser igual a 14.70 m., en el extremo inferior.
- Una vez alcanzada su longitud, se sellan en sus extremos inferiores con tapones de P.V.C., para evitar la entrada de material que obstruya las ranuras y por lo tanto la captación del biogas.
- Con el fin de absorber los asentamientos de la estructura del sistema, se coloca una junta telescópica en el extremo superior del tubo captador, la cual funciona mediante el principio del telescopio.

La junta telescópica ya ilustrada en la figura IV.10 es un tramo de tubo de P.V.C. de 0.15 m. de diámetro por 1.0 m. de longitud, unido al tubo captador, mediante reducciones y lubricantes al tubo captador.

### Equipamiento de los pozos:

- Se coloca dentro del pozo una base de 0.30 m. de tezontle.
- Se introduce el tubo captador previamente habilitado.
- Se coloca en el espacio anular entre el pozo y el tubo captador, el tezontle hasta el nivel -1.0, continuando con material impermeable como la arcilla hasta el nivel -0.50 m. respecto al nivel superficial de terreno.
- En dicho nivel (-0.50), se coloca una membrana de polietileno de alta densidad de 3.0 x 3.0 m. anclada en una zanja perimetral de 0.40 de ancho x 0.40 de altura, impermeabilizando el área perimetral del pozo para evitar la migración del biogas hacia la superficie.
- Se coloca una última capa de 0.50 m. de arcilla compactando con un pisón de mano o si es posible con un rodillo liso.
- Para proteger el sistema se levanta en el perímetro de éstos una estructura de protección que consiste en un registro de tabique sobre el cual se coloca una jaula metálica de celored.

El registro de tabique, se construye de la siguiente manera:

- Se desplanta una losa de cimentación de concreto armado de 4 m<sup>2</sup>. x 0.30 m. de espesor.
- Sobre ésta se levanta un registro de 2.0 x 1.20 x 0.90 m. de altura, con muros de tabique de 0.14 m. de espesor reforzando con castillo de 0.30 x 0.30 m. en las cuatro esquinas, donde se coloca una tapa de concreto (F'c = 150 Kg./cm<sup>2</sup> armado con malla electrosoldada 6 x 6 - 10/10), con un orificio central en donde se aloja el quemador.
- Se monta sobre el registro una jaula de celored de 1.20 x 1.20 m. de calibre 12.
- Finalmente se realizan el repellado y la pintura sobre dicha estructura. Ésta estructura ya se mostró en la figura IV.19.
- El quemador de biogas debe contar con el siguiente equipo para la combustión eficiente: mezclador aire-gas, válvulas de ajuste, piloto y válvulas de paso.

En las figuras IV.23 y IV.24, se presenta un esquema de quemador para la incineración del biogas.

### Mantenimiento de los pozos de operación activa:

- Detección y reparación de fugas en toda la instalación (ductos, válvulas, etc.).

- Renovación de los pozos de biogas, ya que éstos tienden a hundirse por los asentamientos generados por la degradación de los residuos sólidos.
- Reconstrucción de los registros que son destruídos por los vehículos o maquinaria pesada.
- Desalzar de manera constante (por lo menos cada mes) los ductos captadores del biogas, utilizando un malacate o algún sistema de succión.
- Mantener en buenas condiciones el equipo mecánico de extracción (equipo de bombeo, válvulas, conexiones, etc.).

## **VI.5) SISTEMAS PARA EL MONITOREO DEL BIOGAS FUERA DEL TIRADERO "LAS AGUILAS".**

No obstante el control que se propone para el biogas generado dentro del tiradero "Las Aguilas", mediante el sistema activo de extracción; no se descarta la posibilidad de que un alto porcentaje de biogas logre emigrar horizontalmente hacia la periferia del sitio, alcanzando grandes distancias. Acumulándose dicho biogas posiblemente en cavernas, oquedades, alcantarillas, etc., lo cual resulta de alto riesgo a los pobladores, principalmente los ubicados en la zona norte y sur del sitio por encontrarse adyacentes a éste.

Por dichos riesgos se proponen construir 12 pozos de monitoreo en la periferia del sitio como se ilustra en el plano 3 de anexo I, con el fin de medir metano, bióxido de carbono, oxígeno, nitrógeno, explosividad, temperatura, toxicidad y flujo.

El procedimiento constructivo de los pozos de monitoreo, se divide en las siguientes actividades: perforación del pozo, habilitaciones de la tubería y equipamiento del pozo.

Para dichas actividades se requiere el siguiente equipo y material.

### **Equipo:**

Perforadora tricónica helicoidal de 6" (0.05 m.) de diámetro, compresor para la extracción del material producto de la perforación, revoladora, carretilla, palas, plomada, botes, cimbra para la base de registro, cuchara, flexómetro, etc.

### **Material:**

Concreto F'c 150 Kg./cm<sup>2</sup>. de proporciones 1:4:6 para el sello o tapón, tezontle de 3/4" (0.02 m.) de diámetro, tubería de P.V.C. de 2" (0.05 m.) de diámetro, tubería de P.V.C. de 3" (0.07 m.) de diámetro, válvulas de P.V.C. de 2" (0.05 m.) de diámetro, registro cilíndrico de Fo.Fo de 0.30 m. de diámetro y 1.0 m. de longitud.

### **Perforación de los Pozos:**

No obstante el no contar con la geofísica del suelo en donde se encuentra la población, se propone que se construyan por lo menos 12 pozos de monitoreo dentro de dicha zona. colocados en un radio de 100 m.

Cada pozo debe tener un diámetro de 0.20 m. aproximadamente y una profundidad de 15.0 m. (propuesta) por no conocerse la geofísica de la periferia del sitio.

#### Habilitación de la tubería:

Los pozos se equipan con tres tubos de P.V.C. de 2" (0.05 m.) de diámetro, y longitudes de 13.0 m. para el primero, 6.0 m. para el segundo y 2.50 m. para el tercero, colocando en cada extremo inferior de dichos tubos una pichancla de 1.0 m. de longitud por 3" (0.07 m.) de diámetro.

Simultáneamente a las actividades de perforación de los pozos, se barrenan la pichanchas de cada dispositivo; los barrenos pueden ser de aproximadamente 1/4" (0.006 m.) de diámetro, colocados en configuración "tresbolillo".

Se arman los dispositivos, uniendo las pichanchas con los ductos, utilizando reducciones y coples de P.V.C.

#### Equipamiento del pozo:

El equipamiento consiste en introducir en el pozo tres dispositivos de monitoreo a diferentes niveles, el material de filtro y el concreto necesario para el bloqueo de cada estrato.

Dichas actividades se realizan de la siguiente forma:

- Se verifica que el pozo tenga las dimensiones especificadas, que no se encuentre azolvado, inundado u obstruido con algún objeto.
- Se coloca en la base del pozo una plantilla de tezontle de 1.0 m. de espesor.
- Se introduce el tubo de 14.0 m. de longitud.
- Se coloca a volteo una capa de 0.30 m. de tezontle entre el espacio anular del tubo y el pozo.
- Se coloca el concreto el cual forma un bloque de 0.30 m. , que sieve para separa la cámara inferior de las siguientes.
- Se introduce el tubo de 7.0 m. de longitud en la segunda cámara y se coloca la capa de 0.30 de tezontle y el bloque de 0.30 m. de concreto.

- Se introduce el tercer tubo en la tercera cámara, colocando también 0.30 m. de tezontle y 0.30 m. de concreto.

Colocados los tres monitores a tres niveles diferentes, se sella el pozo con concreto en la parte superficial, sobresaliendo los extremos de cada tubo en los cuales se instala una válvula de 2" (0.05 m.) de diámetro para el control de muestreo.

Finalmente, para la protección de los dispositivos de monitoreo, se coloca un registro de acero, anclado en una base de concreto, ya ilustrada en la figura IV.29.



## VI.6) APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA.

En seguida se efectúa un análisis simple para conocer la cantidad de energía que se puede producir con el biogas generado en un tiempo determinado.

### VI.6.1) GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA.

a) Datos.

Metano estimado por el método de "Palos Verdes" para el año 15= 13,853.54 m<sup>3</sup>.

Transformado a horas: 1.58 m<sup>3</sup>.

Poder calorífico del metano= 8,847 Kcal/m<sup>3</sup>.

Equivalente en Watts: 1Kcal-h = 1.16279 W.

b) Desarrollo:

No obstante el haberse propuesto un sistema activo para la extracción del biogas, se considera que el 40% no logra extraerse por haber emigraciones incontroladas a través del suelo no impermeabilizado, por lo tanto la cantidad se reduce a:

$$(60\%) (1.58 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}) = 0.948 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}.$$

b.1) Calculando el poder calorífico de esta cantidad, se tiene:

$$(8,847 \text{ Kcal/m}^3) (0.948 \text{ m}^3/\text{h}) = 8,386.95 \text{ Kcal/h}.$$

b.2) Convirtiendo a watts-h:

$$1 \text{ Kcal} = 1.1628 \text{ watts}$$

Por lo tanto:

$$(8,386.95 \text{ Kcal/h}) (1.1628 \text{ watts-h}) = 9,752.35 \text{ watts-h}.$$

### b.3) Cuantificación de luminarias.

- Considerando que cada luminaria es de 250 wats, se tienen:

$(9,752.35 \text{ watts.}) / 250 \text{ watts.} = 39 \text{ luminarias.}$

- Colocando una luminaria a cada 50 m. se puede alumbrar una superficie de:

$2,500 \text{ m}^2 \times 39 = 97,500 \text{ m}^2. = 9.75 \text{ aproximadamente } 10 \text{ Has.}$

Debido a que la superficie del sitio es de 18 Has., se necesitan:

$180,000 \text{ m}^2 / (2,500 \text{ m}^2) = 74 \text{ luminarias.}$

Ya que sólo se puede obtener energía para 39 luminarias, se propone colocar una a cada 68 m, es decir:

$(180,000 \text{ m}^2) / 39 = 4,615.38 \text{ m}^2.$

Si el área es cuadrada, se tiene que la longitud es de:

$(4,615.38 \text{ m}^2) = 67.9 = 68 \text{ m.}$

En el plano 4 anexo I, se ubican las 39 luminarias.

## **VI.6.2) PROCESO PARA EL APROVECHAMIENTO DEL BIOGAS EN LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA.**

Para el aprovechamiento del biogas generado en los sitios de disposición final, se puede utilizar el siguiente sistema:

Pozos de extracción, red de conexión entre pozos y planta de tratamiento, equipo de tratamiento preliminar (eliminación de condensados y ácido sulfhídrico), soplador o bomba de vacío, motor de combustión interna y generador de electricidad.

### Pozos de extracción:

Se propone que los sistemas para la extracción del biogas operen de manera activa, con el fin de captar un mayor volumen para satisfacer los requerimientos de la planta generadora de electricidad, dichos pozos ya han sido descritos.

### Red de conexión entre pozos:

La red propuesta consiste en captar el biogas de los 66 pozos mediante la conexión de éstos hacia una red secundaria, posteriormente hacia una red primaria que conduzca al biogas para su tratamiento.

Debido a las condiciones topográficas y al uso final del sitio, la red se tiende subterránea, para ello se excava una zanja de sección rectangular de 0.70 m. de profundidad por 0.25 m. de ancho y aproximadamente 2,000 m. de longitud.

El material a emplear en la línea puede ser de polivinilo de cloruro (P.V.C.), lo cual garantiza su resistencia a la corrosión (provocada principalmente por el ácido sulfhídrico), además de ser más barato.

El diámetro recomendado es de 2" (0.05 m.).

La conexión principal del pozo de biogas a la red debe de revisarse cuidadosamente, ya que si no cumple con las condiciones adecuadas de sellado, pueden presentarse fallas en el sistema como la intrusión de agua o aire a la red.

En el plano 3, anexo I se muestra el arreglo de ductos, el cual consta de: colector principal, colector local, subcolector, colector individual y siete trampas de condensados.

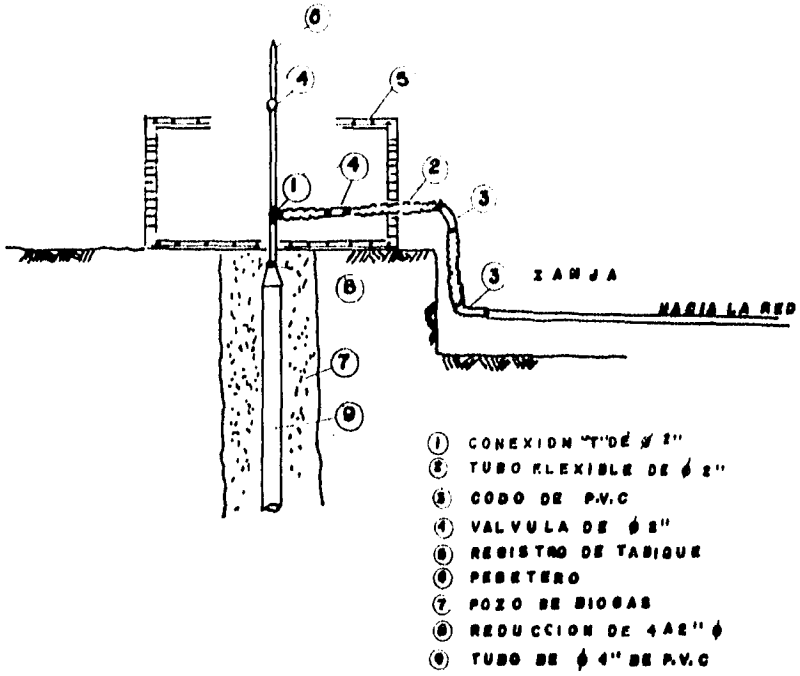
Las líneas de conducción se conectan a las trampas de condensados ubicados en los puntos más bajos de la red, para en seguida bombarse hacia el sistema de tratamiento.

### Equipo de tratamiento del biogas:

El tratamiento del biogas para ser utilizado en la generación de energía eléctrica, consiste además del tanque de condensados, en medidores de presión y filtros de ácido sulfhídrico. Un arreglo se observa en la figura VI.2.

### Sistema eléctrico:

El sistema eléctrico puede ser de las siguientes características:



**FIG.VI.2 CONEXION DE POZOS  
 DE BIOGAS**

Motor diesel de 2.30 m. de largo, 1.60 m. de ancho y 2.40 m. de altura, la marca puede ser Perking o equivalente, un generador eléctrico sincrónico sin escobillas, marca Kato modelo 4PI-0400 m. tipo 13682 o equivalente, un tablero de control y distribución; marca Square o equivalente y un tanque de combustible de 18 litros.

El gas se inyecta al motor de combustión interna (a presiones típicas de 0.35 a 0.70 Kg./cm<sup>2</sup>., cuya carburación se modifica para permitir una entrada adecuada de aire (10%) para la combustión; el motor acciona un generador que produce energía eléctrica.

- El motor diesel consta de sistema de combustible, sistema de agua de enfriamiento, sistema de lubricación forzada, gobernador hidráulico de velocidad, sistema de escape de gas, sistema de admisión de aire, sistema de arranque y tablero de control local del motor diesel.

- El generador eléctrico sincrónico, está constituido por:  
Sistema de excitación, sistemas de regulación de tensión.

- El tablero de control y distribución esta integrado por:  
Instrumentos de medición, dispositivos de control, dispositivos de protección.

El motor y el generador deben estar acoplados y fijados en una base común de acero estructural, además de tener amortiguadores antivibratorios.

## **VI.7) CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL EJEMPLO.**

### **VI.7.1) CONCLUSIONES.**

a) La estimación del volumen de biogas que se genera en el sitio de disposición, es muy difícil de calcular, debido a que el sitio ha funcionado como tiradero a cielo abierto y gran parte de la fracción orgánica contenida en los residuos sólidos ya se estabilizó.

b) Como es obvio las condiciones físicas del lugar en el que fue emplazado el tiradero a cielo abierto de residuos sólidos llamado "Las Aguilas", está provocando un severo deterioro ambiental, por ello es muy importante que a la brevedad se tomen medidas para mitigarlos.

Dentro de tales medidas se encuentra el saneamiento que incluye a las obras complementarias para detener las emanaciones de gases y líquidos, así como para detectar emigraciones hacia zonas no controladas. En este sitio así como muchos otros, se tiene que recuperar sus condiciones naturales originales, aprovechando al máximo algunos residuos y combustibles en este caso el biogas.

- El sitio en estudio inició su control después de aproximadamente 15 años de existir, puede observarse que actualmente hay una baja producción de biogas pues de acuerdo a la velocidad de degradación de los desechos orgánicos, sólo los desechos de moderada y lenta descomposición están actuando.

### **VI.7.2) RECOMENDACIONES.**

- Una vez clausurado el sitio e implementado con la infraestructura necesaria para su uso como área de esparcimiento social, se recomienda no abrirse al público durante el tiempo en que las emanaciones de biogas sean muy fuertes, evitando así posibles siniestros.

- No obstante el bajo volumen de biogas generado en la actualidad, éste representa una fuente de energía para el alumbrado local; sin embargo para este caso y debido al costo que implica su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica, únicamente se recomienda su incineración en quemadores locales.

- Se recomienda el mantenimiento constante de todas las obras de control de contaminantes mientras éstos existan y con ello evitar emigraciones que repercutan en el bienestar de la población circundante.
  
- Si el biogas se va a aprovechar, se recomienda dar mantenimiento al equipo e instalaciones; para que sea reutilizable en otros sitios.
  
- Todas las actividades que incluyen la construcción, operación y mantenimiento de las obras y equipo para el control y/o aprovechamiento del biogas. deben llevarse a cabo por personal responsable y de amplia experiencia.

# CAPITULO VII

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### VII.1) CONCLUSIONES.

1) No obstante los estudios realizados para el manejo adecuado de los residuos sólidos, aún no se han puesto en práctica totalmente, debido a problemas económicos, políticos y de concientización social; lo que ha venido frenando a las acciones necesarias para llevar a cabo el manejo eficiente de dichos residuos sólidos; de los cuales un gran porcentaje se incorpora al ambiente indiscriminadamente, originando sitios incontrolados de disposición final como los tiraderos de alto riesgo.

Sin embargo, si dichos sitios de disposición final son controlados, se transforman en grandes fuentes de energía, debido al biogas que se genera; el cual es un recurso energético potencialmente aprovechable en las actividades donde se requiera algún tipo de combustible.

2) El control de biogas es necesario en los sitios de disposición final de desechos sólidos para evitar riesgos a la población circundante.

3) Para estimar la generación de biogas se han aplicado métodos empíricos para conocer el volumen de metano, ya que dentro de sus componentes es éste el que le da la propiedad de ser un energético, además de ocupar casi el 50% de su volumen.

4) Las cantidades teóricas estimadas de biogas normalmente son más altas que los volúmenes reales producidos en campo, debido a que en las ecuaciones químicas que muestran los procesos de descomposición, se considera una reacción completa de la fracción orgánica de los desechos sólidos.



5) Es claro que cualquier estimación que se haga sobre un fenómeno no controlado puede distar apreciablemente del valor real que se observe. En ese sentido, los cálculos que se utilizan para estimar la producción total de biogas, proporcionan una idea de lo que puede ser en general el comportamiento de la producción de ese gas para un macro tiempo, ya que en intervalos cortos (horas o días), los volúmenes que se generan varían significativamente por las condiciones ambientales o de sustrato presentes en ese momento.

6) El factor de producción de metano por masa unitaria de residuos sólidos  $60 \pm 30$  lts.  $\text{CH}_4/\text{Kg.}$  de desechos sólidos (o  $\text{m}^3$  de  $\text{CH}_4/\text{ton.}$  de desechos sólidos), obtenido con los desechos generados en Estados Unidos, debe ser diferente para México y tal vez mayor debido a que en la composición de residuos sólidos se tiene un alto porcentaje de materia orgánica.

7) Si bien es cierto que otras fuentes de energía son más accesibles técnica y económicamente (petróleo, carbón, etc.), la alternativa energética que ofrece el biogas no debe ser subestimada ya que a nivel local es una opción al uso de combustibles convencionales; quedando la investigación para su aprovechamiento en función de una plena participación entre los organismos responsables del sector energético.

8) Respecto a los sistemas para la extracción del biogas en los tiraderos en proceso de saneamiento, cabe mencionar que aún no se especifica el tipo y proceso constructivo; siendo algunos de los descritos en este trabajo los que se han utilizado.

9) El control del biogas puede ser más o menos complejo, dependiendo de las condiciones del sitio de disposición final, siendo más difícil su control cuando el suelo en donde se efectúa la disposición final no ha sido impermeabilizado, favoreciendo la emigración incontrolada.

10) Debido a que en México existen una gran cantidad de tiraderos clandestinos de alto riesgo, es necesario realizar un monitoreo de las zonas circundantes, verificando principalmente alcantarillas, pozos de visita, tubos descubiertos, grietas del suelo y en lugares en donde se sospeche que pueda haber una concentración de biogas.

Lo anterior con el fin de tomar las medidas preventivas, construyendo obras de control.

Analizando las particularidades del presente caso de estudio, pueden desprenderse finalmente las siguientes recomendaciones:

## **VI.2) RECOMENDACIONES.**

1) Ya que en México se ha considerado al relleno sanitario como una de las opciones más eficientes para el confinamiento de los desechos sólidos, se sugiere que dicha obra se planee y proyecte como una futura planta generadora de energía, lo cual se puede obtener a través del manejo adecuado de los desechos sólidos, mediante la separación de los orgánicos e inorgánicos, confinando en una zona específica la materia orgánica (generadora del biogas); equipando dicha zona como un digestor anaerobio.

Esta forma de concentrar los desechos orgánicos en un área menor, facilita el control de los productos finales como el lixiviado y el biogas. Además se disminuyen las obras que se tenían planeadas construir sobre todo el sitio para el control de contaminantes.

Y por otro lado las estimaciones de la producción de biogas pueden ser más reales.

2) En los sitios de desechos sólidos existentes, se recomienda realizar pruebas de extracción del biogas tanto de corta como de larga duración, con el objeto de conocer que tasa máxima de extracción puede emplearse sin ocasionar variaciones en los procesos anaerobios internos del sitio y por lo tanto, cambios drásticos en la composición de dicho gas.

3) Si se pretende comercializar el biogas de un sitio específico, se sugiere hacer un minucioso análisis costo-benéfico, relativo al tratamiento y venta del biogas, ya que como se observó; el objetivo principal del estudio, no es la rentabilidad, si no el ganar la mayor experiencia posible respecto al tema del biogas generado en sitios de disposición final de desechos sólidos.

4) Adicionalmente a estos datos, se debe determinar el poder calorífico real del gas producido en el sitio de estudio, para que en función de este valor y las cantidades generadas de gas, pueda contarse con un estimado de los ingresos potenciales para la determinación de la viabilidad de alguna opción particular de aprovechamiento.

5) El tema referente a la generación control y aprovechamiento del biogas producido en los sitios de disposición final de desechos sólidos municipales, es muy importante ya que éste

representa un contaminante de alto riesgo cuando no es controlado, pero una fuente alterna de energía cuando sí lo es; por tal motivo se sugiere que se realice una mayor investigación a nivel nacional, difundiendo los resultados a través de cursos, conferencias, etc.

**ANEXO I  
ALBUM DE FOTOGRAFÍAS  
Y PLANOS**

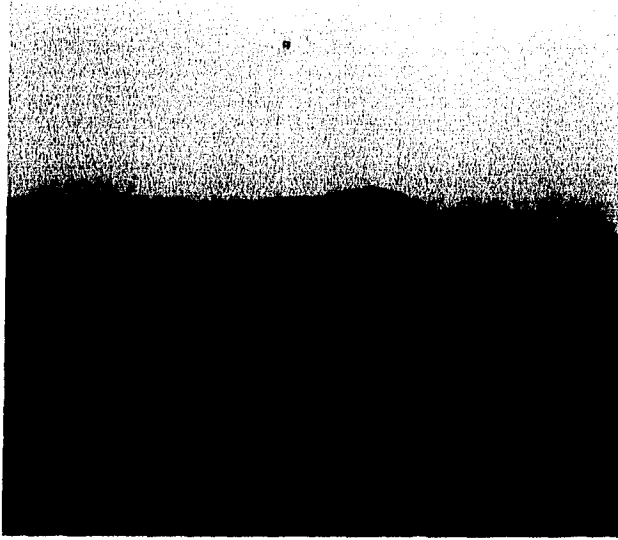


FOTO. VII PANORAMA GENERAL DEL SITIO "LAS AGUILAS" EN  
ATIZAPAN DE ZARAGOZA ESTADO DE MEXICO



FOTO. VI. 2 ACCESO AL SITIO



FOTO. VI.3 ARROYO "LAS MINAS"



FOTO. VI.4 EMIGRACION DE LIXIVIADOS Y RIOGAS

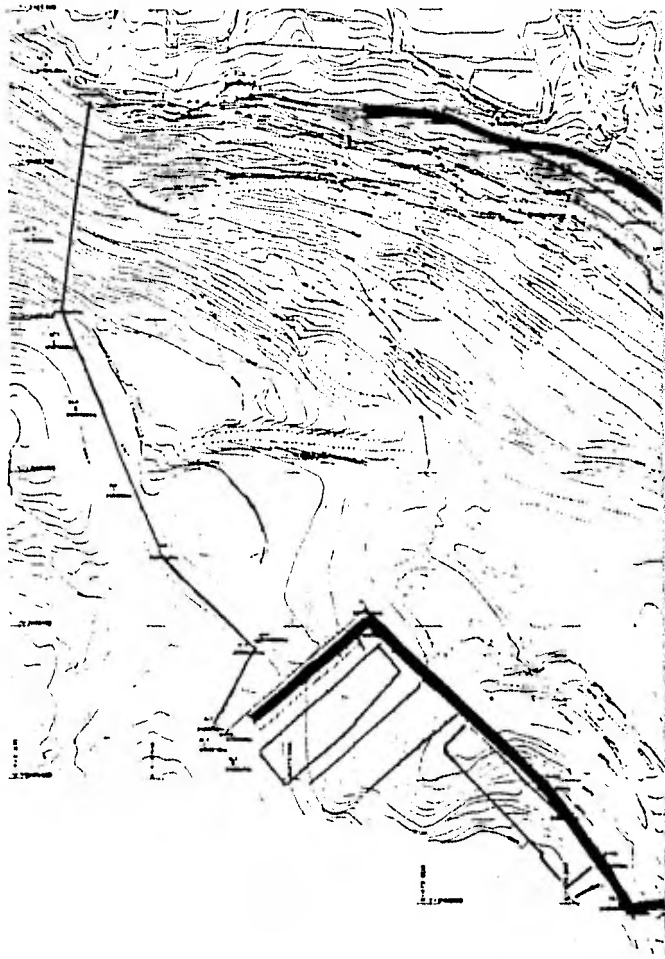


FOTO. VI.5 ESTADO ACTUAL DE LOS TALUDES



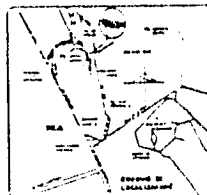
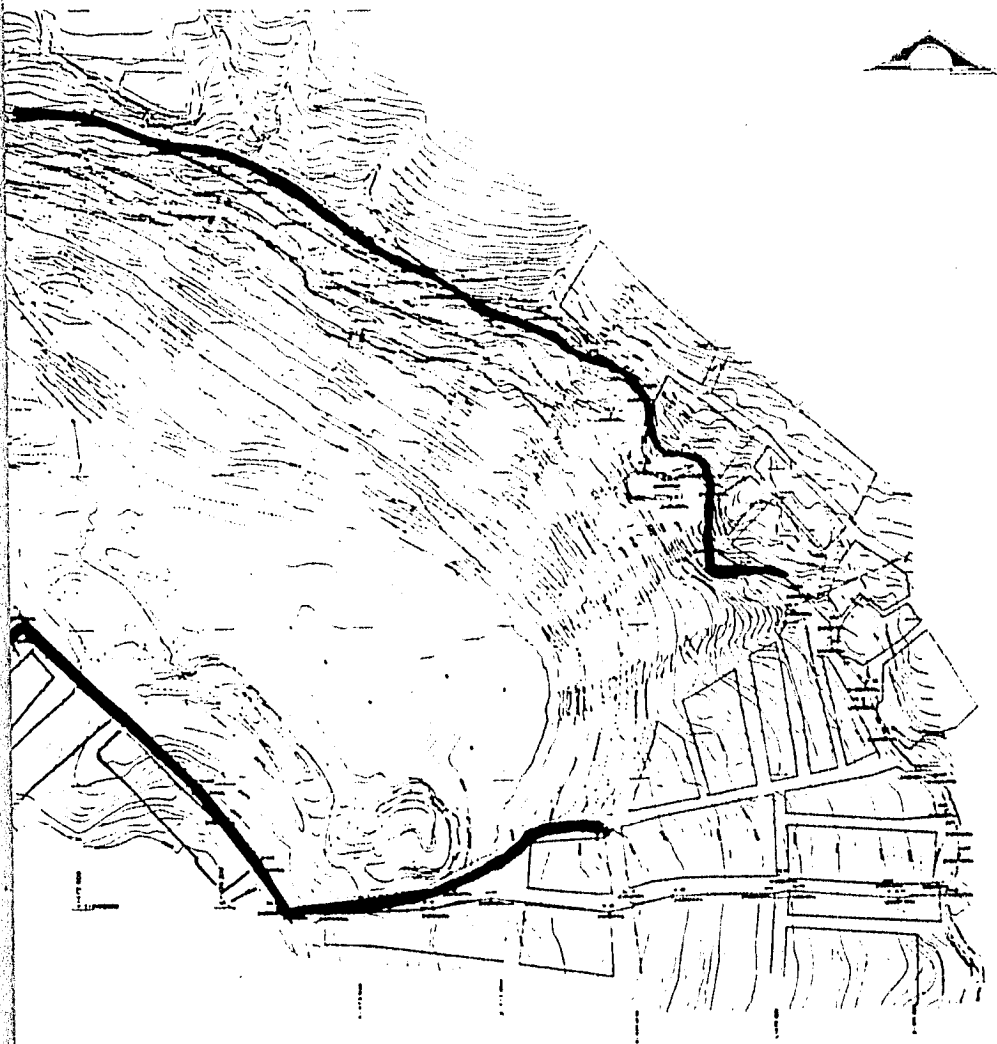
FOTO. VI.6. TALUD A PUNTO DE FALLAR

IMPERMEABILIZAZIONE





# IMPERMEABILIZACION



## LEYENDA

línea de impermeabilización	—
línea de drenaje	---
línea de propiedad	----
línea de loteo	.....
línea de camino	-----
línea de canal	-----
línea de río	-----
línea de quebrada	-----
línea de arroyo	-----
línea de caño	-----
línea de quebrada	-----
línea de arroyo	-----
línea de caño	-----

material impermeable

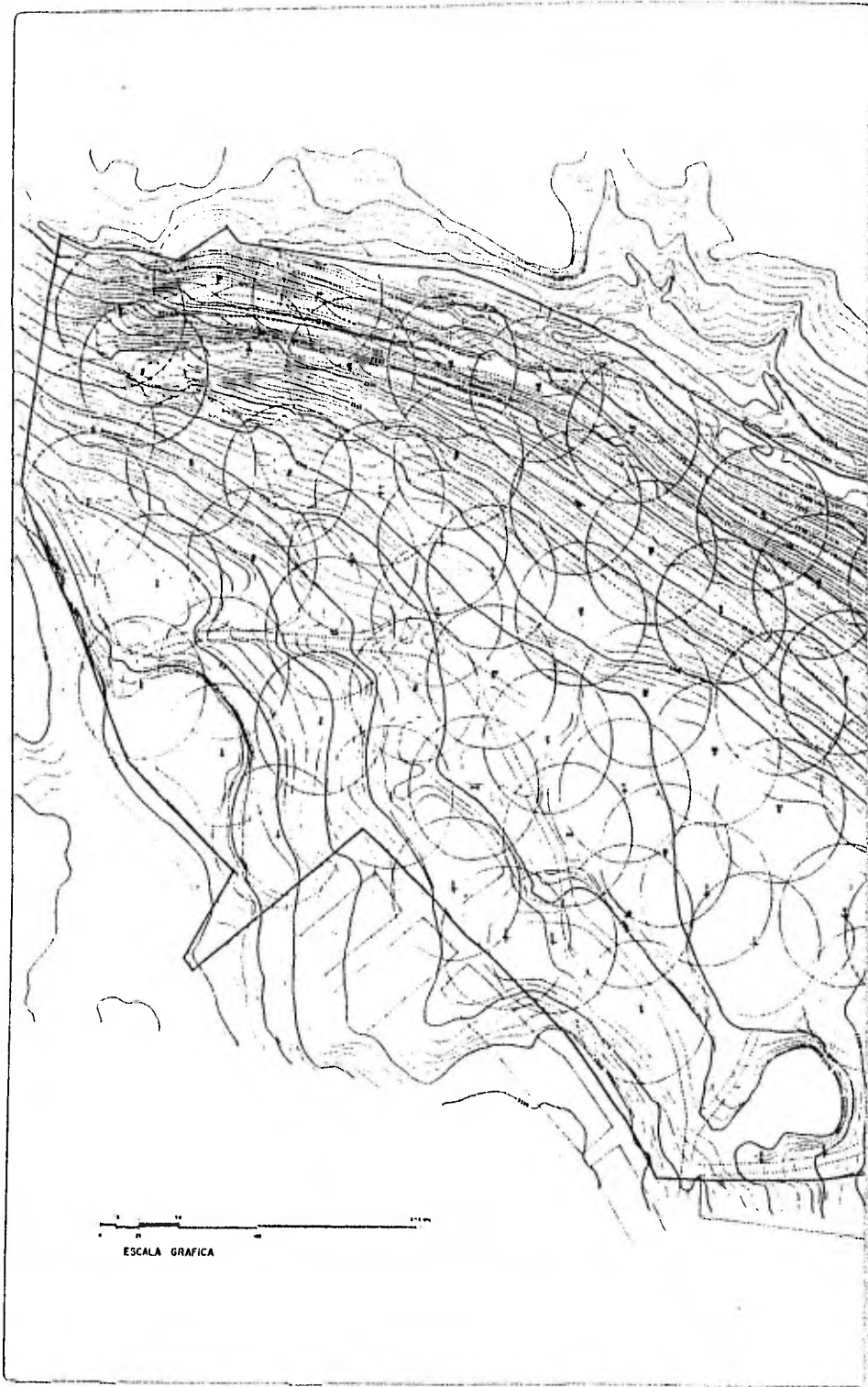
FECHA DE ELABORACION	
FECHA DE APROBACION	
FECHA DE REVISION	
FECHA DE ACTUALIZACION	

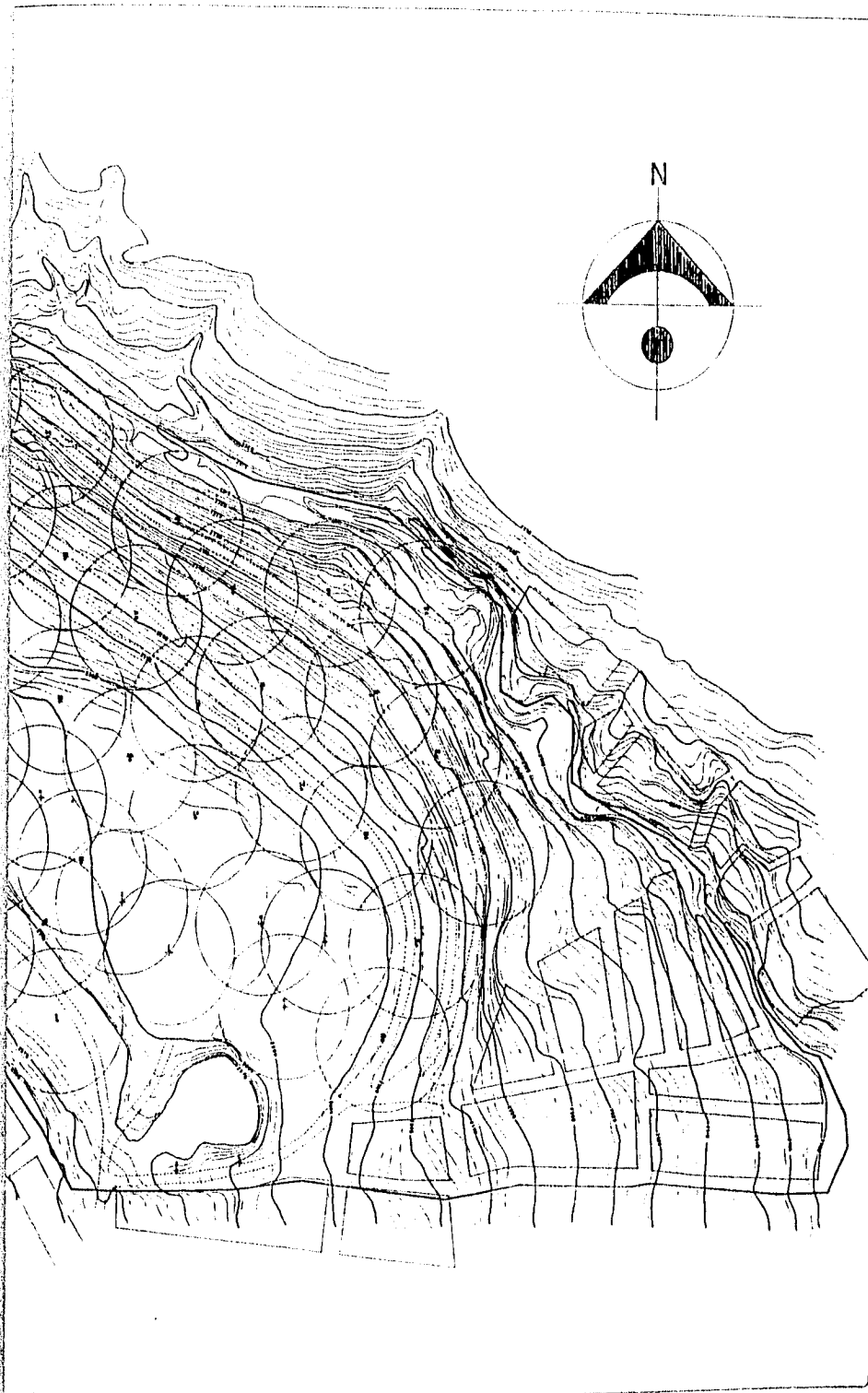
FECHA DE ELABORACION	
FECHA DE APROBACION	
FECHA DE REVISION	
FECHA DE ACTUALIZACION	



GEOSINTETICOS

PLANO NO. 1






SIMBOLÓGIA	
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	POZOS DE BOMBAS EXISTENTES
	POZOS DE BOMBAS PROPUESTOS
	RADIO DE INFLUENCIA 40 Mts
	CAMINOS PARA MANTENIMIENTO
	POZOS DE BOMBAS EXISTENTES PROPUESTOS PARA MONITOREO

POZOS DE BOMBAS	CANTIDAD
EXISTENTES	18
PROPUESTOS	30
TOTAL	48

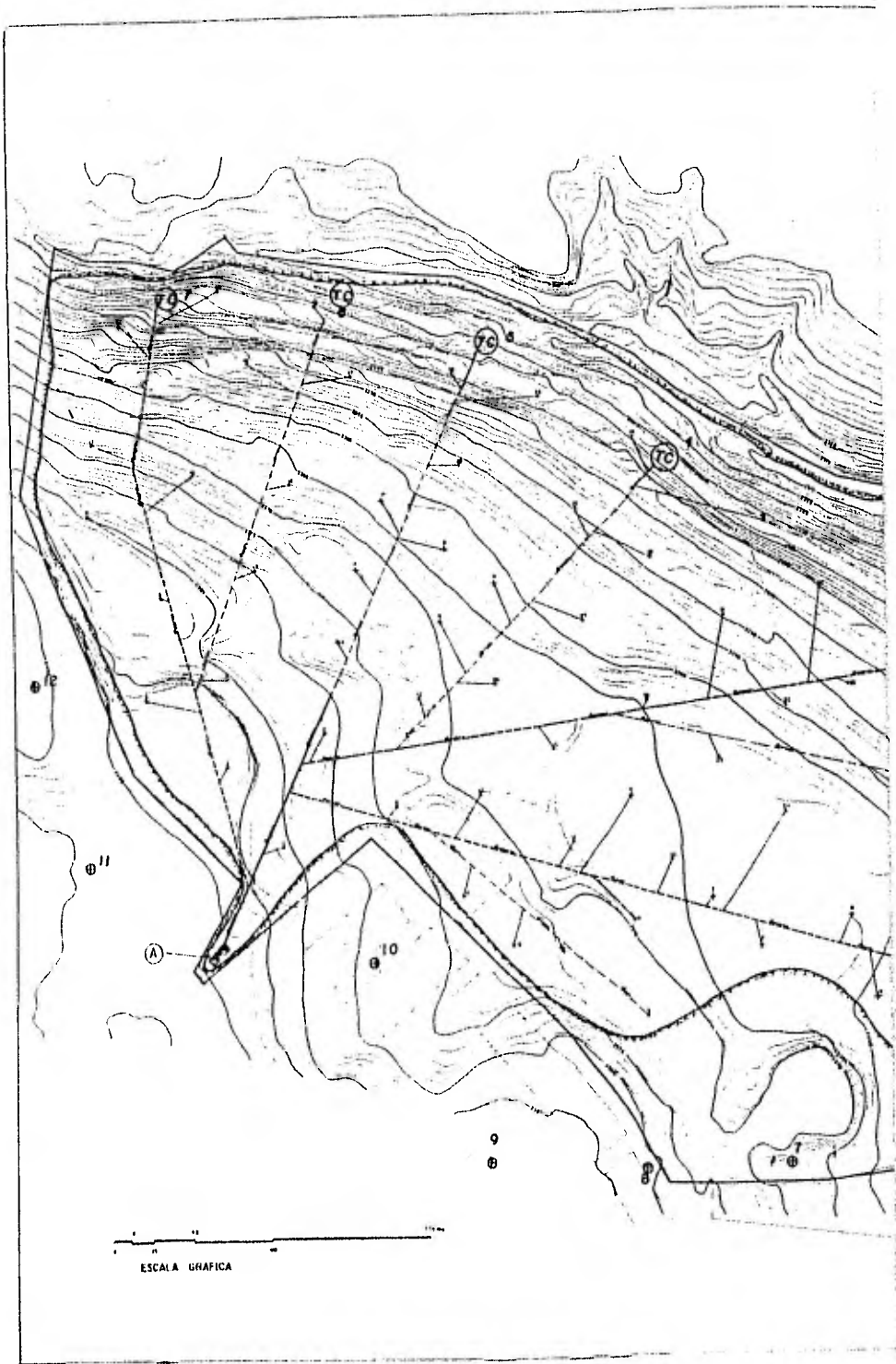
NO.	DIBUJO DE REFERENCIA	FECHA

REGISTRO	
FECHA	LOCALIDAD

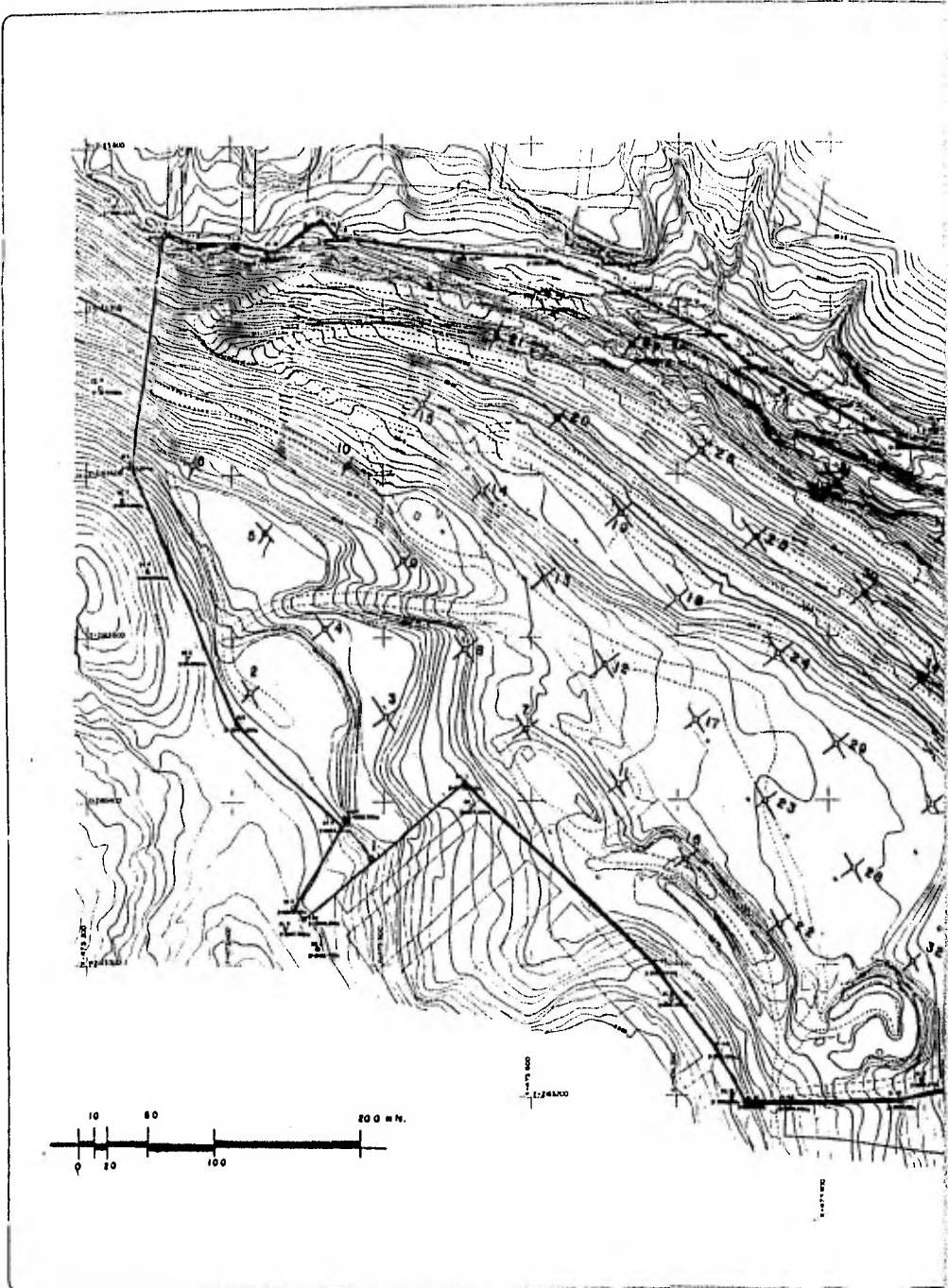

**GOBIERNO DEL ESTADO DE MEXICO**  
 SECRETARIA DE ECOLOGIA  
 DIRECCION GENERAL DE PREVENCIÓN  
 Y RESTAURACION ECOLOGICA

TITULAR TIRAJERO A CARGO ABERTO "LAS ANILLAS"	ESCALA 1:10000 PLAN NO. 2
---	------------------------------------

LEYENDA DE PUNTO DE BOMBAS  
 ELABORADO EN MARZO DE 1984  
 EN EL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y SERVICIOS  
 AMBIENTALES DEL ESTADO DE SONORA, DEL 10 DE  
 MARZO DE 1984  
 ELABORADO POR  
 EL MAPA DE TIRAJERO









## ANEXO II

### GLOSARIO DE TERMINOS

- 1.- **Acido Acético:** Líquido que resulta de la oxidación del alcohol etílico, con eliminación de agua y tiene la fórmula  $\text{CH}_3 - \text{CO}_2\text{H}$ .
- 2.- **Acido Propiónico:** Líquido aceitoso, el primero de los ácidos grasos que se separan de una disolución acuosa mediante adición de sales minerales.
- 3.- **Aerobios:** Organismos que no pueden vivir sin absorber el oxígeno del aire.
- 4.- **Altimetría:** Ciencia que estudia las alturas o relieves de una superficie de terreno.
- 5.- **Aminoácidos:** Cuerpos que reúnen las funciones de ácido y de amina, los cuales son constituyentes esenciales de los tejidos orgánicos.
- 6.- **Anaerobios:** Organismos que viven sin aire.
- 7.- **Bandeo:** Actividad que consiste en compactar el material de cubierta de los desechos sólidos, con un tractor angledozer.
- 8.- **Carburante:** Gas o líquido lo bastante volátil para que mezclado con aire, y comprimido en un cilindro, se inflame al saltar una chispa entre los dos electrodos de la bujía de ignición y proporcione, al expandirse los gases de combustión, la energía necesaria para arrastrar al cigüeñal.
- 9.- **Celulosa:** Hidrato de carbono, isómero del almidón, que es constituyente fundamental del esqueleto de los vegetales. Se presenta en forma de fibras formadas por fibrillas compuestas de gran número de moléculas lineares. Su fórmula es  $\text{C}_6 \text{H}_{10} \text{O}_5$ .
- 10.- **Celda de desechos sólidos:** Es la conformación geométrica que se le da a los residuos sólidos municipales y al material de cubierta, debidamente compactada con equipo mecánico.



11.- **Comburente:** Propiedad de un gas que al combinarse con otro, provoca la combustión del mismo; el oxígeno es comburente pero no combustible.

12.- **Condensado:** Sustancia cuya densidad ha sido aumentada mediante eliminación de una parte de su agua. Líquido o sólido que resulta al procesar un gas.

13.- **(D.B.O)<sub>5</sub>:** Demanda bioquímica de oxígeno. Cantidad de oxígeno que requieren las bacterias para descomponer la materia orgánica contenida en una muestra de agua, en un lapso de cinco días. La (D.B.O)<sub>5</sub> de las aguas negras es de 200 a 400 mg., de oxígeno por litro.

14.- **Destilación:** Separación de los distintos constituyentes de una mezcla líquida mediante evaporación y condensación ulterior de los mismos.

15.- **Desorción:** La eliminación de una sustancia de la superficie en donde está absorbida.

16.- **Digestor anaerobio:** Instalación equipada para que se efectúe la descomposición anaerobia de la materia orgánica y por ende la generación de gas combustible.

17.- **Estequiométrico:** Parte de la química que trata de las proporciones en que se combinan o reaccionan los cuerpos. Permite calcular la cantidad de sustancias en masa o volumen que intervienen en las reacciones químicas.

18.- **Expedito:** Que actúa con rapidez.

19.- **Gas L.P.:** O gas licuado de petróleo, compuesto principalmente por propano o butano o una mezcla de ambos. Se le conoce comercialmente como gas L.P., porque en los recipientes en donde se almacena, transporta y distribuye, se encuentra en estado líquido. Se utiliza con gran demanda en instalaciones de aprovechamiento tipo doméstico, comercial o industrial.

20.- **Gas natural:** Compuesto de hidrocarburos parafínicos que se encuentran en el subsuelo de los campos y pozos petrolíferos. Está formado en una mayor proporción de metano (92% de su volumen), etano (3% de su volumen) y trazas de otros gases (5% de su volumen).

**21.- Grado de compactación:** El grado de compactación de un suelo en obra, es la relación en porcentaje, entre el peso volumétrico seco obtenido por el equipo de campo y el máximo, correspondiente a la prueba de laboratorio que fundamentó el estudio.

$$G_c (\%) = 100 (\text{Peso Vol. seco}) / (\text{Peso Vol. máx.})$$

De esta manera cuando se pide una compactación por ejemplo del 95% Proctor, quiere decir: *"Compáctese este material hasta el 95% del peso volumétrico seco máximo, obtenido en la prueba dinámica Proctor de laboratorio"*.

**22.- Hidrólisis:** Descomposición de ciertos compuestos orgánicos por la acción del agua.

**23.- Lisímetros:** Instrumento para medir la cantidad de un fluido filtrado a través del suelo.

**24.- Lixiviado:** Líquido altamente tóxico con una (D.B.O.), entre 40 a 85 veces mayor que las aguas residuales. Compuesto por el percolado que se produce al degradarse la materia orgánica contenida en los desechos sólidos y por las infiltraciones o escurrientos del agua pluvial sobre éstos.

**25.- Miscibles:** Sustancias o cosas que pueden ser mezcladas.

**26.- Mol:** Molécula - gramo. Unidad de cantidad que contiene tantas partículas como átomos contenidos en 12/1.00 mgr. del núcleo C<sup>12</sup>.

**27.- Ozono:** Gas de fórmula O<sub>3</sub> de color azul e intenso olor está concentrado en la ozonósfera detiene los rayos ultravioletas solares, los cuales son mortales para los seres vivos.

**28.- Polisacáridos:** Glúcido de molécula grande, formada por la unión de muchas moléculas.

**29.- Poliestireno:** Alto polímero termoplástico, que resulta de la polimerización del estireno.

**30.- Pichancha:** Ducto perforado por donde se filtra un fluido, en este caso el biogas.

**31.- Proyecto de clausura:** Estudio técnico que comprende la definición del uso final de un sitio de disposición final de desechos sólidos, una vez que ha terminado su vida útil; determinando el equipamiento necesario en base a las condiciones físicas del sitio, uso de suelo, entorno urbano, etc.

**32.- Prueba Proctor:** Prueba de mecánica de suelos para determinar la mejor proporción de agua que ha de tener el suelo para ser compactado, consiste en apisonar varias muestras del mismo, hasta obtener el resultado deseado, y midiendo el peso volumétrico y el contenido de humedad de la muestra más satisfactoria.

**33.- Radio de influencia de los pozos de biogas:** Distancia radial que alcanzan los pozos para extraer el biogas.

**34.- Relación de vacíos:** Relación volumétrica de los suelos. Es el cociente entre el volumen de vacíos y el de sólidos.

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

**35.- Sinergia:** Asociación de varios órganos para realizar una función.

**36.- Tresbolillo:** Dícese de la colocación de elementos en líneas paralelas, de modo que los de cada fila corresponden al medio de los huecos de la fila inmediata.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Asociación Mexicana para el Control de Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C. *Diseño de Disposición Final de Residuos Sólidos (Rellenos Sanitarios)*, Curso Internacional, México, D.F., 1994, p. 503.
- 2.- Asociación Mexicana para el Control de Residuos Sólidos y Peligrosos. *Los Residuos Sólidos y Peligrosos recurso de desperdicio?*, Gulas para el desarrollo del sector de aseo urbano en Latinoamérica y el Caribe, Primer Congreso Nacional, México D.F., 1991.
- 3.- Auvinet, Gabriel y Esquivel, Raúl. *Impermeabilización de Lagunas Artificiales*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México, D.F., 1986, p. 77.
- 4.- Becerril, L., Diego Onésimo. *Manual de Instalador de Gas L.P.*, 4a. edición, Ed. Porrúa, México, p. 222.
- 5.- Burdon, Kenneth and Robert P., Williams. *Microbiología*, México, D.F., 1983.
- 6.- Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C.. *Proyecto Tipo de Relleno Sanitario*, Parte uno Antecedentes para el Diseño, Documentos Técnicos, Serie: Medio Ambiente, México, D.F., 1994, p. 43.
- 7.- Chambers. *Diccionario Científico Tecnológico*, Tomo 1. Ed. Omega. S.A., Barcelona, España.
- 8.- De Galiana, Mingot, Tomas. *Larousse Tecnológico*, Ed. Larousse México 1980, p. 1056.
- 9.- Dirección General de Servicios Urbanos del D.D.F., Dirección Técnica de Desechos Sólidos. "Biogas Fertilizer System", Technical Report on A. Training, Seminar in China.
- 10.- Dirección General de Servicios Urbanos. Dirección Técnica de Desechos Sólidos D.D.F., "Descripción de Acciones para Mejorar el Equipo de Limpia del D.F.", México, D.F., 1986.

- 11.- Dirección General de Servicios Urbanos, Dirección Técnica de Desechos Sólidos. *"Muestreo de Generación de Desechos Sólidos Domiciliarios para el Distrito Federal"*, México, D.F., 1993.
- 12.- Dirección General de Servicios Urbanos, Dirección Técnico de Desechos Sólidos D.D.F. *"Resumen Ejecutivo Relativo a la Viabilidad Técnica para el Aprovechamiento del Biogas Generado en los Sitios de Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales en el D.F."*, segunda versión, México, D.F., 1990.
- 13.- Emcon Associates. *"Methane Generation and Recovery from Landfills"*, Ann arbor Science, Michigan, U.S.A, 1980.
- 14.- Garibay Orozco, Rafael. *Aprovechamiento del Biogas Generado en el Extradero de San Lorenzo Tezonco*, Tesis de licenciatura U.A.M., Plantel Azcapotzalco.
- 15.- G., Devore y E., Muñoz Mena. *Química Orgánica*, Publicaciones Cultural, México, D.F., 1976, p. 734.
- 16.- Gunnerson, Charles G. *Anaerobic Digestion, Principles and Practice for Systems*, Washington, D.C., U.S.A., 1986, p. 154.
- 17.- Ingeniería para el Control de Residuos Municipales e Industriales, S.A. de C.V., *"Clausura de un Sitio de Disposición Final de Residuos Sólidos"*, México, D.F., 1993.
- 18.- J. Crutcher, Anthony. *"Landfill Gas Collection and Utilization"*, A. Symposium on Solid Waste Management, Waterloo, Ontario, U.S.A., 1988, p. 32.
- 19.- Jiménez Redondo, Manuel. *Diccionario de Física*. Ed., Rioduero, España, 1976, p. 253.
- 20.- Koerner, Roberth M. *Designing with Geosynthetics*, second edition, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1990. p. 652.
- 21.- Kurt, Gieck. *Manual de Fórmulas Técnicas*, Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. México D.F., 1977.

- 22.- Lin, Lin-Yin. *Multiple - Stage Anaerobic Digestion System*, Ann Arbor, Michigan, University of Pittsburgh, U.S.A., 1984. p. 177.
- 23.- Mandujano A., Ma. Isabel y Felix A., Alfonso. *Energía y Fertilizantes a partir de Desechos Orgánicos*, Manual para el promotor de la Tecnología, Cuernavaca Morelos, México, D.F., 1981.
- 24.- Monroy, O. y G., Viniegaras. *Biología para el Aprovechamiento de los Desechos Orgánicos*, Ed. A.G.T., México, D.F., 1981.
- 25.- Morales y Monroy, Rafael y Oviedo Hernández, Esteban. "Inclusión de Geosintéticos como Solución a la Problemática Creada por los Residuos de Construcción y Demolición", PIVIDE, S.A. de C.V., México, D.F., p. 12.
- 26.- Morales y Monroy, Rafael y Oviedo Hernández, Esteban. "Uso de Geosintéticos en la Disposición Final de Residuos Sólidos", PIVIDE, S.A. de C.V., México, D.F., p. 10.
- 27.- Murillo F., Rodrigo. *Simposio sobre Geosintéticos*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, D.F., 1990, p. 190.
- 28.- Phil o, Leaty and Berrin, Tanse. "Landfill Gas Movement, Control and Uses", University of Wisconsin-Madison.
- 29.- Rosales Ortega, Rodrigo. "Incineración de Gases para Abatir Contaminantes del Aire", Tesis Profesional de Licenciatura ESQIE, IPN, México, D.F., 1973.
- 30.- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. *Manual de Rellenos Sanitarios*, México, D.F., 1984.
- 31.- Secretaría de Salubridad y Asistencia, Patronato Nacional de Promotores Voluntarios, *Protección del Medio Ambiente*. Manual del Promotor Voluntario en Saneamiento Básico, México, D.F., 1984.
- 32.- Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C. *La Ingeniería Ambiental en el Futuro de México*, Vol. 1 y 2, México, D.F., 1984.

33- Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C.. *Saneamiento Ambiental, el Gran Reto*, VI Congreso Nacional, Querétaro, México, 1988.

34.- T.E.I.G.O., S.A.. "*Depósito de Residuos I y II*", Estudio sobre Geosintéticos, México, p. 250.

35.- Trejo Vázquez, Rodolfo. *Procesamiento de la Basura Urbana*, Ed. Trillas, México, D.F., 1994.

36.- Valera. D.H.W.. *Problemática Ambiental en los Suelos, Originada por los Lixiviados Generados en un Relleno Sanitario, Una Alternativa de Control*, Tesis de Maestría ESIA, IPN, México, D.F., 1991.