



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

“DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO  
INTERMUNICIPAL PARA LOS MUNICIPIOS DE  
ÁTOYAC DE ÁLVAREZ-BENITO JUÁREZ Y TÉCPAN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

P R E S E N T A :

ING. OSCAR MAURICIO GALINDO VALENCIA

TUTOR:

M. C. CONSTANTINO GUTIERREZ PALACIOS

2009





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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Martínez Pereda Pedro

Secretario: Dra. Orta Ledesma María Teresa

Vocal: M.C. Gutiérrez Palacios Constantino

1<sup>er</sup> Suplente: M.I. Sánchez Gómez Jorge

2<sup>do</sup> Suplente: Dra. Rojas Valencia María Neftalí

Lugar o lugares donde se realizo la tesis:

Edificio de Posgrado de La Facultad de Ingeniería y Municipio de Atoyac de Álvarez, Gro.

TUTOR DE TESIS:

M.C. Constantino Gutiérrez Palacios

---

FIRMA

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la oportunidad de brindarme el realizar mis estudios.

A mis padres que han sido motivo mi gran inspiración y por su incondicional apoyo.

A mis hermanos que también han sido fuente de mi inspiración y ser para ellos un ejemplo a seguir.

A mi familia por todo el apoyo que me han brindado para ser quien soy.

A todos mis profesores que han aportado cada uno con su granito de arena para complementar mi conocimiento.

A **CONACYT** por su ayuda en mis estudios de posgrado y por la cual estaré eternamente agradecido.

A Karla quién ha venido a mi vida a darle un segundo aire y motivación, mil gracias amor por estar siempre en las buenas y en las malas.

A la memoria de mi difunta abuela †

<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Problemática de los Residuos Sólidos.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Justificación.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>6</b>
1.3.1 General.....	6
1.3.2 Particulares.....	6
<b>1.4 Alcances.....</b>	<b>7</b>
<b>2 ANTECEDENTES.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Condiciones actuales del manejo de residuos sólidos en “Atoyac de Álvarez” .....</b>	<b>9</b>
2.1.1 Estudio de generación de residuos sólidos urbanos (NMX-AA-61-1981).....	10
<b>2.2 Condiciones actuales del manejo de residuos sólidos en “Benito Juárez” .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3 Condiciones actuales del manejo de residuos sólidos en “Técpán de Galeana” .....</b>	<b>16</b>
2.3.1 Generación.....	16
<b>2.4 Beneficios del Sitio de Disposición Final Intermunicipal.....</b>	<b>18</b>
<b>2.5 Ventajas de los Biorrellenos Metanogénicos sobre Rellenos Tradicionales.....</b>	<b>19</b>
<b>2.6 Iniciativa de Mercados de Metano (M2M).....</b>	<b>22</b>
<b>2.7 Gases de efecto invernadero originados por rellenos sanitarios.....</b>	<b>23</b>
2.7.1 La política sobre el calentamiento global debido al biogás.....	24
2.7.1.1 Tratamiento.....	24
2.7.1.2 Métodos de control estándar del biogás.....	24

<b>3 BASES DE DISEÑO</b> .....	27
<b>3.1 Legislación en Materia de Residuos Sólidos</b> .....	27
3.1.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (1917).....	27
3.1.2 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (H. Congreso de la Unión, 2003).....	28
3.1.3 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (H. Congreso de la Unión, 1988).....	32
3.1.4 Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2003).....	32
3.1.5 Ley de Aprovechamiento y Gestión Integral de los Residuos del Estado de Guerrero (Guerrero, 2008).....	35
<b>3.2 Estudios de Campo</b> .....	36
3.2.1 Selección del Sitio para Ubicación del Relleno Sanitario (Gutiérrez, 2006).....	36
3.2.1.1 Metodología para la Selección del Sitio.....	39
3.2.2 Estudio Topográfico (Niño, 2008).....	42
3.2.2.1 Levantamiento Topográfico.....	42
3.2.2.2 Planimetría.....	42
3.2.2.3 Altimetría.....	42
3.2.2.4 Metodología empleada para el levantamiento topográfico.....	43
3.2.3 Estudio Geotécnico (Couttolenc, 2008).....	44
3.2.3.1 Trabajos de campo.....	44
3.2.3.2 Capacidad de Carga.....	47
3.2.3.3 Capacidad del Relleno Sanitario.....	47
3.2.3.4 Análisis de la Geología y Geotecnia del sitio.....	48
3.2.4 Estudio Geohidrológico (Consultores, 2008).....	51
3.2.4.1 Climatología.....	51
3.2.4.2 Hidrografía.....	51
<b>3.3 Tipos de Relleno Sanitario</b> .....	53
3.3.1 Método de área.....	53
3.3.2 Método de Trinchera o Zanja.....	54
3.3.3 Método combinado.....	55

3.3.4 Método Seleccionado para el Relleno Sanitario Intermunicipal.....	56
<b>3.4 Métodos de Generación de Lixiviados.....</b>	<b>57</b>
3.4.1 Modelo de Tchobanoglous (Tchobanoglous, y otros, 1993).....	57
3.4.2 Método de Thornthwaite y Mather (Thornthwaite, y otros, 1979).....	57
<b>3.5 Métodos de generación de Biogás.....</b>	<b>59</b>
3.5.1 Método de Tchobanoglous.....	59
<b>3.6 Planeación del proyecto.....</b>	<b>60</b>
3.6.1 Proyección de población.....	60
3.6.2 Producción de Residuos Sólidos.....	61
<b>4 PROYECTO DEL RELLENO SANITARIO INTERMUNICIPAL.....</b>	<b>61</b>
<b>4.1 Requerimientos Volumétricos del Sitio.....</b>	<b>69</b>
<b>4.2. Dimensionamiento de la Celda Diaria.....</b>	<b>65</b>
4.2.1 Cobertura de la celda diaria.....	66
<b>4.3 Cálculo de la Vida Útil del Sitio.....</b>	<b>69</b>
<b>4.4 Calendarización de la Vida Útil del Sitio.....</b>	<b>69</b>
4.4.1 Secuencia de Llenado de Celdas.....	70
4.4.2 Volumen de lixiviado y método de manejo.....	70
<b>4.5 Producción de Lixiviados.....</b>	<b>72</b>
4.5.1 Método de Thornthwaite.....	74
4.5.1.1 Precipitación Pluvial.....	74
4.5.1.2 Escurrimiento Superficial.....	75
4.5.1.3 Evapotranspiración.....	75
4.5.1.4 Evapotranspiración Real.....	76
4.5.2 Método de Tchobanoglous.....	79
4.5.3 Análisis de ambos métodos.....	82

4.5.4 Cárcamo de bombeo.....	82
<b>4.6 Producción de Biogás.....</b>	<b>85</b>
4.6.1 Modelo EPA.....	85
4.6.1.1 Análisis de la Composición de los Residuos.....	85
4.6.2 Modelo Tchobanoglous.....	93
4.6.3 Análisis de ambos modelos.....	96
<b>4.7 Propuesta como Biorrelleno Metanogénico.....</b>	<b>98</b>
4.7.1 Recirculación de lixiviados.....	99
4.7.2 Extracción y quema de Biogás.....	101
4.7.2.1 Normativa y estándares de operación de quemadores de biogás en Europa....	103
<b>4.8 Sistema de Impermeabilización.....</b>	<b>104</b>
4.8.1 Arcilla.....	105
4.8.2 Capacidad de amortiguamiento.....	105
4.8.3 Geotextil.....	106
4.8.4 Geomembrana.....	108
4.8.4.1 Acondicionamiento de la base del relleno sanitario.....	109
<b>4.9 Manejo de aguas pluviales.....</b>	<b>111</b>
<b>4.10 Selección de Maquinaria.....</b>	<b>114</b>
<b>4.11 Monitoreo Ambiental.....</b>	<b>119</b>
4.11.1 Monitoreo de Lixiviados.....	120
4.11.1.1 Parámetros a Monitorear.....	120
4.11.2 Parámetros y métodos de Análisis Recomendados y Frecuencia.....	121
4.11.3 Monitoreo de Biogás.....	124
4.11.3.1 Parámetros a Monitorear.....	124
4.11.4 Métodos de Análisis Recomendados y Frecuencia.....	126

4.11.5 Mantenimiento del Sitio Clausurado.....	127
4.11.6 Supervisión de Asentamientos en el Tiradero.....	128
4.11.7 Supervisión del Suelo.....	128
4.11.8 Supervisión de Deslizamientos.....	128
4.11.9 Supervisión de Depresiones.....	129
4.11.10 Supervisión de Erosión Pluvial.....	131
<b>4.12 Costos de Inversión y operación del Relleno Sanitario.....</b>	<b>132</b>
4.12.1 Costos por construcción.....	132
4.12.2 Costos por operación.....	134
4.12.3 Costos de salarios y prestaciones de operadores.....	134
4.12.4 Costo de arrendamiento de equipo y maquinaria.....	134
4.12.5 Costos de combustibles y lubricantes.....	134
4.12.6 Costos de reparaciones y mantenimiento preventivo.....	136
4.12.7 Costos de material de cubierta.....	136
4.12.8 Gastos administrativos.....	136
<b>4.13 Clausura del Relleno Sanitario.....</b>	<b>138</b>
4.13.1 Configuración de la superficie final.....	138
4.13.2 Construcción de la cobertura Final.....	138
4.13.3 Control de Biogás.....	139
4.13.4 Control de Lixiviados.....	139
4.13.5 Infraestructura complementaria.....	140
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>141</b>
<b>ANEXO 1.....</b>	<b>144</b>
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>147</b>
<b>ANEXO 3.....</b>	<b>155</b>
<b>ANEXO 4.....</b>	<b>158</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>161</b>

## RESUMEN

Debido a la problemática que existe en nuestro país por la alta generación de residuos sólidos urbanos (RSU) y su inadecuada disposición final, se creó la NOM-083-SEMARNAT-2003, la cual tiene como objetivo principal dar las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

Para el caso de las grandes ciudades de nuestro país, estas cuentan en su mayoría con un relleno sanitario para la disposición de sus RSU. Por otra parte, los pequeños poblados no cuentan con los recursos técnicos y económicos para la implementación de una infraestructura de este tipo, teniendo en la mayor parte de estos simplemente tiraderos a cielo abierto en los cuales disponen de sus residuos sin ningún control ocasionando con esto, contaminación del aire, suelo y cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Las comunidades del Estado de Guerrero no son una excepción respecto al problema de la mala disposición de sus RSU. Por esta razón, se realizó el diseño de un relleno sanitario intermunicipal que cumpliera con las exigencias de la NOM-083-SEMARNAT-2003; se analizó la generación de lixiviados (Thornthwaite y Tchobanoglous) y biogás (EPA y Tchobanoglous) por métodos de predicción distintos, identificando con esto cual es el que proporciona valores más precisos de acuerdo a las condiciones presentes en el sitio. A sí mismo, se realizó la propuesta de relleno sanitario como "*biorrelleno metanogénico*", el cual recomienda una recirculación de lixiviados para una rápida degradación de los residuos y una generación temprana de biogás, teniendo como resultado un menor costo para el tratamiento de los lixiviados y un tiempo de monitoreo menor que el esperado en un relleno tradicional.

El diseño del relleno sanitario estuvo limitado a las condiciones físicas del sitio así como a los resultados de los estudios de mecánica de suelos principalmente. El método constructivo fue el de área debido a las condiciones estratigráficas y de carga del predio, teniendo como altura máxima 20 metros y una vida útil de 12 años aproximadamente. Las alternativas tanto de recirculación como de captación de biogás se hicieron contemplando dentro de las distintas opciones, las más seguras y eficientes para poder maximizar la eficiencia de recirculación. La recirculación se propuso inyectando lixiviado por medio de una tubería vertical, distribuyendo este a través de tuberías horizontales; la captación de biogás, se propuso de forma horizontal con tuberías de polietileno de alta densidad para una captación mayor de este gas y evitar que debido a los asentamientos diferenciales se tuvieran problemas de falla como se llega a presentar con tuberías verticales.

## **ABSTRACT**

Because of the problems that exist in our country for the high generation of solid waste (MSW) and its inappropriate disposal was established in NOM-083-SEMARNAT-2003, which aims mainly to environmental protection specifications for site selection, design, construction, operation, monitoring, closure and additional works of a final disposal site for municipal solid waste and special handling.

In the case of the great cities of our country, these have mostly a sanitary landfill for disposal of their MSW. Moreover, small towns do not have the financial and technical resources to implement such infrastructure, taking most of these simply open-air dumps which have their waste without causing any control with this, air pollution, soil and surface water and groundwater.

The Guerrero State communities are no exception to the problem of the unwillingness of its MSW. For this reason, was carried out to design a intermunicipal landfill that met the requirements of NOM-083-SEMARNAT-2003, analyzes the generation of leachate (Thorntwaite and Tchobanoglous) and biogas (EPA and Tchobanoglous) for prediction methods different, which is identified with it that provides more precise values according to the conditions present at the site. In itself, the proposal was carried landfill as "methanogenic biorrelleno," which recommends a leachate recirculation for rapid degradation of waste and a young generation of biogas, resulting in lower cost for the treatment of leachate time monitoring and lower than expected in a traditional landfill.

The design of the landfill was limited to the physical conditions of the site as well as the results of soil mechanics studies mainly. The building method was the area because of the stratigraphic and load conditions of the property, with the maximum height of 20 meters and a lifespan of approximately 12 years. The alternative recirculation both biogas and catchment were looking into different options, safer and more efficient to maximize the efficiency of recirculation. The proposed injection of leachate recirculation through a vertical pipe, distributing this through horizontal pipes, the uptake of biogas, was proposed horizontally with high density polyethylene pipes for greater uptake of this gas and to prevent differential settlement due to failure will have problems as you get to present with vertical piping.

---

# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Problemática de los Residuos Sólidos

El problema al que se enfrenta nuestro país en el manejo de los residuos sólidos municipales se ha incrementado en los últimos años debido a la urbanización y a la industrialización de las poblaciones; hasta en la región más remota se han presentado cambios significativos en los hábitos de consumo y disposición de sus residuos; aunado a esto, dichas regiones no cuentan con la infraestructura necesaria para el manejo de éstos y se disponen de manera inadecuada en tiraderos a cielo abierto, afectando de esta forma no solo el aspecto visual si no también la vida animal, flora, suelo, agua y aire.

El Estado de Guerrero, como muchos otros Estados, presenta la misma problemática causando efectos ambientales adversos ocasionados por el mal manejo de sus residuos sólidos. Los municipios de Atoyac de Álvarez, Benito Juárez y Técpan de Galeana (localidades de estudio del presente trabajo), disponen de sus residuos en tiraderos a cielo abierto, llegando en ocasiones a encontrarse en barrancas que por su inclinación, los residuos llegan a la Cuenca del Río Atoyac. Esta situación ha afectado dicho cuerpo de agua alterando su calidad ya sea para el abastecimiento de agua de poblaciones cercanas a este, así como la propia vida acuática y animal que se provee de éste.

Los sitios en los que actualmente se disponen los residuos no cumplen como sitios de disposición controlados, siendo la mayoría tiraderos a cielo abierto en donde se disponen los residuos violando varios de los lineamientos estipulados por la NOM-083-SEMARNAT-2003. Sitios elegidos al azar, no controlados estrictamente, con quemas frecuentes y que emiten gases tóxicos, pueden desarrollar impactos ambientales provocando efectos adversos al ambiente y a la salud.

Todos estos problemas se derivan de fallas o falta del servicio de recolección de los residuos sólidos, falta de conciencia ciudadana al depositar los residuos en las márgenes del río, falta de sitios de disposición adecuados y suficientes para confinar los residuos, falta de una cultura nacional y local por el reciclaje y reaprovechamiento de la mayoría de los productos consumidos por los habitantes del municipio y que son desechados deliberadamente al ambiente.

La prevención y minimización de la generación de los residuos, de su liberación al ambiente y su transferencia de un medio a otro, así como su manejo integral para evitar riesgos a la salud y daños a los ecosistemas serán uno de los puntos fundamentales que se han de tomar en consideración para la elaboración de este trabajo.

## 1.2 Justificación

En julio del año 2005, se puso en marcha el mega Proyecto “Las Regiones Sociales en el Siglo XXI” comúnmente denominado Pro-Región o Pro-Regiones, como parte del Programa “Sociedad y Cultura: México Siglo XXI”, impulsado por el Dr. Juan Ramón de la Fuente, ex rector de la UNAM. Tal proyecto tiene como objetivo principal poner al servicio de las comunidades de una región, el potencial de las ciencias sociales y científicas desarrolladas en la UNAM y centros de educación superior, para solución de problemas relacionados con el mejoramiento de los niveles de vida de los mexicanos.

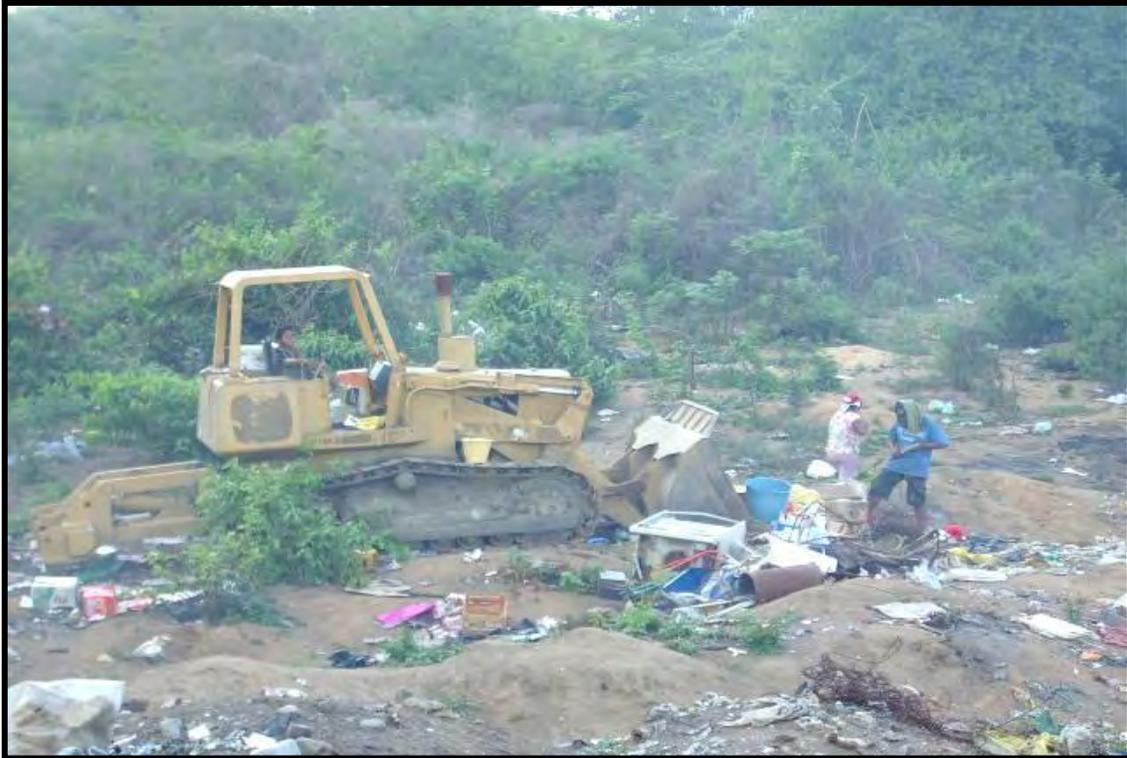
Para la realización de este trabajo se tomará como región piloto la Cuenca del Río Atoyac (Figura 1), que se encuentra localizada al sur del estado de Guerrero y que consta de los municipios representan el mayor problema en la contaminación de dicho río.



**Figura 1 Cuenca del río Atoyac, GUERRERO**  
Fuente: (INEGI, 2008)

Cabe resaltar que el problema que presentan éstas tres comunidades primordialmente es la disposición final de sus residuos sólidos, en estas, los tiraderos a cielo abierto son parte del paisaje de estos municipios, causando impactos ambientales a la salud severos, dentro de los cuales destacan: la contaminación del aire por quema de residuos, la existencia de pepenadores (hombres, mujeres y niños) expuestos a condiciones de insalubridad y a los gases de la combustión, la mezcla de residuos peligrosos con los domiciliarios, la alteración del paisaje

proliferación de fauna nociva y contaminación de aguas subterráneas por la infiltración de lixiviados. En la Figura 2 se puede observar a los pepenadores del tiradero de Atoyac que no cuentan con ninguna medida de protección.



**Figura 2      Pepenadores en el tiradero de Atoyac**

La importancia del apoyo a los proyectos orientados a fomentar la educación ambiental y solucionar los problemas sociales y ambientales derivados de las malas costumbres que pueden influir negativamente en, algunas o en la mayoría de las localidades de nuestro país, hace necesario que exista interés y participación por parte de los miembros de las instituciones, las autoridades y pobladores para resolver el problema de la inadecuada disposición de los RSM.

La problemática que se vive en los Municipios destaca un tema: la contaminación del ambiente, la cual conlleva a diversos problemas que están ligados entre sí. La contaminación del río será mitigada después de que se efectúe el saneamiento *in situ* y se prohíba desechar materiales al mismo. Sin embargo, para evitar que se desechen los residuos a este cuerpo de agua, y también en tiraderos a cielo abierto, es necesario diseñar un sistema que permita tener un buen manejo de los RSM de acuerdo a las necesidades de los habitantes de estos municipios.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 General

Realizar los diseños conceptual y dimensional a detalle de un relleno sanitario intermunicipal que cumpla con la normatividad ambiental vigente, para las poblaciones de Atoyac de Álvarez, Benito Juárez y Técpan de Galeana, del Estado de Guerrero. Mejorar las condiciones de vida de la población que se beneficiará, así como reducir los impactos al ambiente por un mal manejo de los residuos y contribuir a reducir el calentamiento global.

### 1.3.2 Particulares

- ✓ Determinar la cantidad de residuos a disponer a lo largo de la vida útil del relleno sanitario de acuerdo a las limitantes que se tengan a partir de los análisis de los estudios realizados por la Facultad de Ingeniería de la UNAM así como los realizados por particulares.
- ✓ Analizar el método de construcción más adecuado de acuerdo a la topografía y geología del sitio.
- ✓ Diseñar la “celda diaria tipo” de acuerdo a los volúmenes generados por los tres municipios.
- ✓ Determinar la cantidad de lixiviados y biogás que se generarán a lo largo de la vida útil.
- ✓ Propuesta de un plan de monitoreo ambiental de acuerdo a las especificaciones de la NOM-083-SEMARNAT-2003 para con esto poder mitigar y minimizar cualquier impacto adverso al ambiente por cuestiones de operación del relleno.
- ✓ Diseñar los drenajes de captación de lixiviados y la infraestructura para el manejo del biogás.
- ✓ Seleccionar los equipos requeridos para la construcción y operación del relleno sanitario.

## 1.4 Alcances

- ✓ Se realizará un análisis de la producción de lixiviados y biogás a partir de una comparación entre distintos modelos de proyección, para con esto, identificar que método cumple de forma más precisa con las condiciones que se presentan en el sitio mediante su construcción y operación.
- ✓ Se hará el estudio de relleno sanitario como biorrelleno metanogénico a partir de la recirculación de lixiviados y optimización de la extracción del biogás.
- ✓ El diseño se enfocará y se limitará a las condiciones físicas, geológicas y topográficas del sitio, con esto se realizará la mejor propuesta para que el sitio opere de forma funcional y en condiciones ambientalmente seguras.
- ✓ Se estudiarán las alternativas entre un relleno sanitario tradicional y uno que opere como biorrelleno metanogénico, con fin de obtener los mejores beneficios ambientales.

---

## 2 ANTECEDENTES

---

El río Atoyac se ubica dentro de la Cuenca Atoyac, en la región Costa Grande del Estado de Guerrero. Esta cuenca ocupa el 8.8% del territorio total de dicho estado. A lo largo del río se ubican diversas comunidades tanto rurales como urbanas. De éstas últimas se encuentran entre las principales Atoyac de Álvarez (cabecera municipal) y El Paraíso, ambas pertenecientes al municipio Atoyac de Álvarez, y San Jerónimo, cabecera municipal de Benito Juárez. En el presente, el río Atoyac ha visto mermar la calidad de sus aguas debido al mal manejo de los recursos y desechos de las poblaciones cercanas, en especial las mencionadas anteriormente, debido a que constituyen los núcleos poblacionales más numerosos de la zona.

El municipio de “Atoyac de Álvarez” cuenta con 132 localidades mientras que “Benito Juárez” cuenta con 48, estas localidades comprenden la Cuenca del Río Atoyac; ambos municipios se ubican a poco menos de 100 km de distancia de Acapulco sobre la carretera Acapulco-Zihuatanejo. La región colinda con los municipios de: Técpan de Galeana, San Miguel Totolapan, Heliodoro Castillo y Coyuca de Benítez; y además con el Océano Pacífico, principalmente con las Playas “Paraíso Escondido” y “San Jerónimo”.

Otro problema inquietante relacionado con el manejo inadecuado de los desechos es su disposición. Escasamente se cumplen con sitios de disposición controlados para los residuos, siendo la mayoría tiraderos a cielo abierto, en donde se disponen los residuos violando varios de los lineamientos estipulados por la legislación federal. Sitios elegidos al azar, no controlados estrictamente, con quemas frecuentes y que emiten gases tóxicos, pueden desarrollar impactos ambientales, como contaminación del aire, del agua, del suelo y a las poblaciones aledañas, provocando efectos adversos al ambiente y a la salud.

Para dar solución al problema de disposición inadecuada de los residuos sólidos, los tres municipios mencionados fueron convocados por la Subsecretaría de Obras Públicas de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas del estado de Guerrero para la ejecución de los estudios, proyectos y construcción de un relleno sanitario intermunicipal. La Subsecretaría obtuvo recursos financieros del Banco Nacional de Obras (Banobras) y junto con la aportación económica de los tres municipios mencionados se realizarán los trabajos descritos. Como parte de los trabajos previos realizados por Pro Regiones y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, seleccionó el sitio de disposición final de acuerdo a lo que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 “Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

## 2.1 Condiciones actuales del manejo de residuos sólidos en “Atoyac de Álvarez”

El municipio de Atoyac cuenta con una población estimada de 56,566 habitantes reportada para el 2008 (CONAPO, 2008). El sitio de disposición final es un tiradero a cielo abierto donde, son depositados los residuos recolectados por el servicio de limpia. Este tiradero, de capacidad desconocida por el municipio, no cumple con la norma de construcción y operación de rellenos sanitarios, pues presenta una serie de irregularidades por las cuales no puede ser considerado con un sitio controlado. Actualmente, la disposición final no sólo se realiza en este tiradero, una parte de la población dispone clandestinamente sus desechos en terrenos baldíos, barrancas, cañadas o el río mismo.

El hecho de que la disposición final de los residuos de Atoyac se realice sin ningún control sanitario, origina una serie de impactos negativos para los habitantes y el ambiente. Algunos de los que se han originado han sido la alteración del paisaje, proliferación de plagas nocivas para el ser humano (roedores, cucarachas, moscas, etc.), infiltración de lixiviados contaminando los mantos freáticos, contaminación de cuerpos de agua superficiales por el escurrimiento de lixiviados y la emisión de gases perjudiciales para la salud humana y el ambiente debido a la descomposición de los residuos o la quema de los mismos. En la Figura 1 se muestra las condiciones actuales del sitio de disposición del municipio de Atoyac de Álvarez.



**Figura 1** Quema de residuos en el tiradero a cielo abierto de Atoyac.

2.1.1 Estudio de generación de residuos sólidos urbanos (NMX-AA-61-1981)

La Facultad de Ingeniería de la UNAM realizó el estudio de generación de residuos sólidos urbanos (Gutiérrez, 2006) con el fin de conocer la generación media del municipio. Se hizo un muestreo de los residuos generados de la población a analizar del 27 de febrero al 8 de marzo de 2006 obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 1:

**Tabla 1 Resultados del estudio de Generación de Atoyac**

Generación media	0.552 kg/hab·día
Media	0.481 kg/hab.día
Moda	0.312 kg/hab.día
Desviación estándar	0.313681 kg/hab.día
Varianza	0.09839 kg/hab.día

Con el estudio realizado, se hizo un análisis de subproductos de acuerdo a la NMX-AA-22-1985; este consiste en seleccionar una muestra representativa de los residuos y clasificarlos según sus características. Con los resultados de estos análisis, en un futuro, se podrá tomar como base para la implementación y mejora del sistema de manejo de residuos sólidos; con la generación per cápita junto con la proyección de población, se podrá determinar qué capacidad tendrá el relleno sanitario, entre otros aspectos. En la Figura 2 se muestra el método de cuarteo que forma parte del estudio de generación de residuos sólidos.



**Figura 2 Método de cuarteo de residuos sólidos en Atoyac**  
 Fuente: Imagen tomada de (Gutiérrez, 2006)

En la Tabla 2, se muestran los subproductos obtenidos en el estudio de generación realizado en el municipio de Atoyac.

**Tabla 2 Composición promedio de residuos sólidos en Atoyac de Álvarez, Gro..**

Subproductos	% en peso
Algodón	0.01
Cartón	2.01
Cartón encerado	1.68
Cloruro de polivinilo	0.00
Cuero	0.38
Hueso de animal	0.02
Hule	0.88
Lata de aluminio	0.00
Lata de otros metales	0.63
Loza y cerámica	0.13
Madera	0.31
Material de construcción	0.08
Material ferroso	0.52
Material no ferroso	0.31
Materiales peligrosos	0.11
Otros	0.06
Pañal desechables y toallas sanitarias	8.74
Papel de impresión	0.83
Papel de revista	1.00
Papel sanitario	2.16
Periódico	0.33
PET	2.11
Unicel	0.23
Polietileno de alta densidad	1.70
Polietileno de baja densidad	3.10
Plásticos varios	2.69
Residuo fino	3.33
Residuos alimenticios	23.65
Residuos de jardín	38.77
Semilla y cáscara dura	0.00
Tetrapack	0.51
Trapo	1.06
Vidrio de color	0.06
Vidrio transparente	2.12
Cera	0.04
Residuos especiales	0.24
Peligrosos	0.04
Pajilla	0.03
Plastilina	0.01
Plumas	0.12
<b>Total</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Estudio de generación del municipio de Atoyac (Gutiérrez, 2006)

De la Tabla 1 se puede observar que los residuos predominantes en el municipio de Atoyac son los residuos de jardinería y residuos alimenticios, entre los dos conforman casi el 63% de los residuos totales de este municipio. Con estos resultados se observa que aún los habitantes consumen productos naturales en mayor volumen y en menor los empacados. Los productos que son susceptibles de valorización son: PET, polietileno de alta densidad, cartón, latas de aluminio y vidrio.

En el municipio de Atoyac ya se cuenta con un sistema de aprovechamiento del PET mediante un particular, el cual consiguió la maquinaria adecuada para compactar y separar en cubos estos plásticos. Con esto se está propiciando el reciclaje de este tipo de material ayudando con esto a reducir la cantidad de residuos depositados en tiraderos, en la Figura 3 se observa que residuos valorizables, en este caso el PET, empiezan a ser considerados como una fuente de trabajo para habitantes de Atoyac de Álvarez.



**Figura 3** Comercialización del PET en el municipio por medio de particulares

## 2.2 Condiciones actuales del manejo de residuos sólidos en “Benito Juárez”

En el municipio de Benito Juárez cuenta con una población estimada de 13,873 habitantes, reportada para el 2008 (CONAPO, 2008). La localidad tiene el problema con el manejo de sus residuos sólidos, ya que existen diferentes sitios de disposición clandestinos que son un foco de contaminación para el entorno y que pueden causar diferentes daños a la salud de los habitantes.

El inadecuado manejo de los residuos en estas comunidades es una muestra de lo que pasa en la mayoría de las regiones con características similares del país; por lo tanto, realmente es necesario proporcionar a éstas el servicio no solo del relleno sanitario si no también una adecuada recolección y estaciones de transferencia para no generar gastos excesivos de los camiones recolectores al llevar directamente los residuos hasta el sitio de disposición final. Con esto, se evitarían serios problemas ambientales en esta zona del estado de Guerrero y garantizar la salud pública de los habitantes de dichas localidades. La Figura 4 se observa la quema de basura en el tiradero de San Jerónimo.



**Figura 4** Quema de residuos en el tiradero de San Jerónimo  
Fuente: Imagen tomada del estudio diagnóstico de Benito Juárez (Gutiérrez, 2006)

Al igual que las comunidades anteriores, se realizó un estudio de generación de residuos sólidos de la localidad para con ello determinar la cantidad de residuos generados por la población así como los subproductos que son sujetos a valorización, para esto se contó con la participación de 100 casas elegidas al azar. Los resultados obtenidos del estudio de generación se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3 Resultados del estudio de Generación de San Jerónimo**

Generación media	0.550 kg/hab*día
Mediana	0.496 kg/hab*día
Moda	Moda <sub>1</sub> = 0.160 kg/hab*día Moda <sub>2</sub> = 0.930 kg/hab*día Moda <sub>3</sub> = 0.511 kg/hab*día Moda <sub>4</sub> = 0.720 kg/hab*día
Desviación estándar	0.316
Varianza	0.0999

El peso volumétrico de los residuos resulto ser de 97.47 kg/m<sup>3</sup>, mientras que los subproductos encontrados en el estudio de generación se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4 Composición promedio de residuos sólidos en Benito Juárez**

Subproductos	% en peso
Algodón	0.04
Cartón	2.62
Cartón encerado	0.70
Cloruro de polivinilo	0.00
Cuero	0.25
Hueso de animal	0.99
Hule	0.29
Lata de aluminio	0.05
Lata de otros metales	0.98
Loza y cerámica	0.49
Madera	0.59
Material de construcción	1.58
Material ferroso	0.40
Material no ferroso	0.74
Materiales peligrosos	0.11
Otros	1.91
Pañal desechables y toallas sanitarias	2.43
Papel de impresión	0.89
Papel de revista	0.39
Papel sanitario	3.50
Periódico	0.50
PET	3.75
Unicel	0.52
Polietileno de alta densidad	1.02
Polietileno de baja densidad	3.91
Plásticos varios	4.13
Residuo fino	0.13

**Tabla 4 Composición promedio de residuos sólidos en Benito Juárez “Continuación”**

Subproductos	% en peso
Residuos alimenticios	28.00
Residuos de jardinería (pasto, ramas, etc.)	30.96
Semilla y cáscara dura	0.00
Tetrapack	0.66
Trapo	2.56
Vidrio de color	0.41
Vidrio transparente	3.26
Cera	0.12
Residuos especiales	0.11
Papeles varios	1.02
<b>Total</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Estudio de generación del municipio de Benito Juárez (Gutiérrez, 2006)

En la Figura 5 se muestra la separación de subproductos realizada conforme a la NMX-AA-22-1985



**Figura 5 Análisis de subproductos.**

Fuente: Imagen tomada del estudio de Generación de Benito Juárez (Gutiérrez, 2006)

Los porcentajes de los residuos encontrados en el análisis de subproductos nos da un claro ejemplo de que muchos de los residuos son susceptibles de valorizarse para que eviten ser dispuestos junto con otros que no lo son y con esto poder garantizar una vida útil mayor al futuro relleno sanitario. Por ejemplo, el 58.96% corresponde a los residuos alimenticios y de jardín; el PET cuenta con un 3.75%; el polietileno de baja densidad un 3.91%; el cartón un 2.62% y el vidrio con un 3.26% representan un porcentaje importante que puede ser reincorporado a la industria y con esto evitar el uso de insumos.

## 2.3 Condiciones actuales del manejo de residuos sólidos en “Técpán de Galeana”

En el municipio de Técpán de Galeana cuenta con una población estimada de 56,418 habitantes reportada para el 2008 (CONAPO, 2008). Así como los dos municipios anteriormente presentados, no cuenta actualmente con un manejo integral de los residuos sólidos urbanos, por ende se han generado impactos adversos al ambiente y a la salud humana debido a su mala disposición (tiraderos a cielo abierto). Para conocer de manera concreta la cantidad de residuos generados en el municipio, se realizó un estudio de generación basado en la NMX-AA-061-1985.

### 2.3.1 Generación

El estudio de generación que se realizó en el mes de marzo de 2008 fue con el fin de conocer la cantidad de residuos generados por la población así como los subproductos que pueden estar sujetos a valorización. Los resultados obtenidos del estudio se presentan en la Tabla 5:

**Tabla 5 Resultados del estudio de Generación de Técpán de Galeana**

Generación media	0.550 kg/hab.día
Mediana	0.405 kg/hab.día
Moda	0.328 kg/hab.día
Varianza	$S^2 = 0.079$
Desviación estándar	$S = 0.278$

En la Tabla 6, se presenta la composición de subproductos obtenidos en el estudio de generación del municipio.

**Tabla 6 Composición promedio de residuos sólidos en Tépán de Galeana**

Subproductos	% en peso
Algodón	0.13
Cartón	3.92
Cartón encerado	0.35
PVC	0.00
Cuero	0.00
Hueso de animal	0.50
Hule	1.72
Lata de aluminio	0.69
Lata de otros metales	0.00
Loza y cerámica	1.53
Madera	1.52
Material construcción	1.04
Material ferroso	1.46
Material no ferroso	0.67
Materiales peligrosos	0.10
Pañal desechable y toallas sanitarias	8.57
Papel de impresión	1.73
Papel de revista	0.79
Papel sanitario	3.20
Periódico	0.94
PET	3.32
Unicel	0.35
PEAD	0.00
PEBD	3.83
Plásticos varios	7.32
Residuo fino	0.00
Residuos alimenticios	17.58
Residuos de jardinería (pasto, ramas, etc.)	26.79
Semilla y cáscara dura	2.90
Tetrapak	1.80
Trapo (natural y sintético)	1.60
Vidrio de color	0.47
Vidrio transparente	4.42
Otros	0.78
Total	100.00

Fuente: Estudio de generación del municipio de Tépán de Galeana (Gutiérrez, 2008)

## 2.4 Beneficios del Sitio de Disposición Final Intermunicipal

El sitio que fungirá como relleno intermunicipal, cumplirá con todas las exigencias que emite la NOM-083-SEMARNAT-2003: será de mayor capacidad posible para poder garantizar la mayor vida útil del sitio; deberá de localizarse a distancias cercanas a las fuentes de generación pero sin que esto afecte a la población circundante; estar situado por lo menos a las distancias mínimas que exige la norma para evitar contaminación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos; acceso al sitio en cualquier época del año; personal capacitado para poder operar y dar mantenimiento preventivo al equipo que se esté empleando entre otros aspectos.

Con la implementación de dicho relleno se pretende evitar la quema clandestina de residuos, que implica además de fuentes de contaminación, efectos dañinos a la salud de la población cercana; evitar que los sitios donde se disponen los residuos actualmente sigan contaminando agua, suelo y aire debido al mal manejo que se proporciona.

El sitio que se seleccionará para el emplazamiento contará con disposición adecuada de los residuos para así evitar los problemas ambientales que anteriormente se tenían; además de tomar las medidas mencionadas anteriormente, en este trabajo se presenta la alternativa de operar dicho relleno sanitario como un biorrelleno metanogénico, que a diferencia de los sitios tradicionales, propone una recirculación de lixiviados para con esto garantizar la descomposición homogénea de los residuos, reducir la toxicidad y costos por tratamiento de estos; obtención de biogás a edades tempranas para con esto reducir los tiempos de monitoreo postclausura así mismo tener la opción de aprovechar estos gases para la producción de energía (entre otras opciones) y con esto reducir los gases liberados al ambiente y que son fuente importante del cambio climático que está sufriendo actualmente nuestro planeta.

## 2.5 Ventajas de los Biorrelenos Metanogénicos sobre Rellenos Tradicionales

Hasta el momento en nuestro país, la gran mayoría de los sitios que operan como relleno sanitario, no cumplen al 100% las características de operación; ya sea por la forma en la que fueron diseñados o bien, por la forma en la que operan. Así mismo, en otros países, específicamente de primer mundo y algunos en Sudamérica operan sus sitios de disposición final como biorrelenos metanogénicos o como biorreactores, teniendo excelentes beneficios ambientales y operacionales.

Es importante que en México se deje de aspirar a contar con un relleno sanitario tradicional en que en el mejor de los casos, cumpla con la normatividad vigente. Por esta razón, en este trabajo se consideró presentar la alternativa de los biorrelenos metanogénicos, en los cuales se aprovecha al máximo las condiciones presentes en el sitio y con esto optimizar la vida útil del biorrelleno, así como para reducir la mayor cantidad de impactos ambientales que pudieran ser ocasionados por la mala operación de un relleno tradicional. Una comparación de los atributos que caracterizan tanto al relleno sanitario tradicional como a los biorrelenos metanogénicos, se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7 Comparación entre Relleno Sanitario Tradicional y Biorrelleno Metanogénico**

Atributo	Relleno Sanitario	Biorrelleno Metanogénico
Asentamientos Esperados: Después de 2 años: Después de 10 años:	2 a 5 % 15%	10 a 15 % 20 a 25%
Tiempo de estabilización	30 a 100 años	
Tasa de generación de metano	Baja	Alta
Capacidad de Absorción de líquidos en la masa de residuos	Indefinida	178.38 a 356.76 L/m <sup>3</sup>
Costos de inversión	Bajo	Bajo
Costos de operación y mantenimiento	Bajo	Bajo a medio
Costos de clausura	Alto	Bajo a medio

Fuente: Adaptado de (Adeleke, 2003)

Una de las principales ventajas es la rápida estabilización de los residuos, resultando en reducciones a largo plazo de riesgos por contaminación de agua subterránea y reducción en la toxicidad del lixiviado. Esto reduce el tiempo de cuidados con respecto a los rellenos tradicionales. Además, los costos por tratamiento de lixiviados son reducidos e inclusive en algunos casos eliminados debido a la recirculación. La capacidad para usar el espacio ganado por la estabilización de residuos en los biorrelenos puede también reducir el área total requerida para rellenos nuevos o la expansión de los actuales.

La recirculación de los lixiviados no consiste solamente en aportar humedad que requiere la degradación de los residuos en condiciones anaerobias, sino para remover la carga orgánica

presente en los lixiviados (donde prevalecen los ácidos grasos volátiles); aportar material celular para incrementar las tasas de población bacteriana y con todo esto, incrementar las tasas de generación de metano y acelerar la producción de biogás en el tiempo.

La carga orgánica a remover al interior de un biorrelleno, en diferentes tiempos y con distintas constantes de degradación, será la suma de carga orgánica presente en los lixiviados, mas la carga orgánica que prevalece en los residuos confinados.

Además de la recirculación de lixiviados, es necesario incrementar la carga bacteriana metanogénica presente en éstos, mediante la inoculación de lodos fluidizados con alto contenido de materia celular; de tal manera que la infiltración de líquidos percolados enriquecidos con microorganismos metanogénicos al interior de la masa de residuos, incrementará las tasas de degradación de éstos, ayudando a que los tiempos de estabilización sean reducidos de 30-40 años a 3-5 años en promedio.

Los costos de los biorrelenos son comparables con los rellenos tradicionales. El incremento de los costos iniciales por los requerimientos para la inyección de lixiviados y el incremento en los costos de operación de un biorrelleno son compensados por el incremento en la capacidad de disponer residuos y prolongar el periodo de clausura debido a la estabilización. Estas compensaciones y el incremento de beneficios por la mayor producción de metano (CH<sub>4</sub>) y la capacidad para recircular otros líquidos (lodos industriales, entre otros) dentro de la masa de residuos para tratarlos, hace que el biorrelleno sea atractivo para compañías privadas. (Council, 2006)

El biorrelleno metanogénico es un sistema que permite la recirculación de líquidos a los residuos durante su llenado y durante su operación. El contenido de humedad óptimo para la degradación de residuos es de 60 a 70% (A Bluestem Solid Waste Bioreactor Cell Pilot Project Operating Protocol and Monitoring Plan Draft Report, 1997). La Agencia de Protección al Ambiente (EPA, por sus siglas en inglés) define un biorrelleno como un relleno que logra un 40% en contenido de humedad agregando líquidos (EPA, 2000).

Las condiciones óptimas que se deben de obtener en un biorrelleno para la producción de metano, ocurren cuando el pH es ligeramente mayor a 6 (en los rellenos tradicionales con dificultad llega a este valor).

Según la composición de los RSU de nuestro país (fracción orgánica aproximada de 60%), los biorrelenos son una excelente opción de tecnología alternativa para una disposición final sustentable teniendo como beneficio adicional el aprovechamiento del gas metano. Si a esto sumamos que los RSU al agregárseles ya sea aguas negras, lodos crudos o lodos digeridos; permiten augurar la posibilidad real de tratamiento tanto de residuos sólidos como líquidos generados en una comunidad, en una sola instalación.

En resumen, se puede decir que las grandes ventajas que tiene un biorrelleno metanogénico sobre los rellenos tradicionales son:

- Estabilización más rápida de los residuos.
- Aumenta el tiempo post clausura.
- Minimiza a largo plazo la responsabilidad ambiental.
- Incrementa el espacio debido al asentamiento que puede minimizar la necesidad de buscar nuevos sitios.
- Permite la producción de biogás con potencial de recuperación de energía.
- Mejora el almacenamiento de lixiviado y reduce los costos de tratamiento.

## 2.6 Iniciativa de Mercados de Metano (M2M)

La iniciativa de Mercados de Metano (M2M, por sus siglas en inglés) fue implementada y es liderada por la EPA de los Estados Unidos desde 2004. En esta, participan 25 países, incluyendo a México para entre otras cosas, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la institución representante y encargada de coordinar las actividades y programas de cada uno de los Subcomités que conforman la Iniciativa. Durante 2006, la SEMARNAT, la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID, por sus siglas en inglés) y la EPA firmaron un acuerdo de cooperación para brindar asistencia técnica al desarrollo de proyectos.

Actualmente, SEMARNAT participa activamente en los cuatro Subcomités que conforman la iniciativa:

- Subcomité de Petróleo y Gas
- Subcomité de Minas
- Subcomité de Rellenos Sanitarios y
- Subcomité de Residuos Agropecuarios

De acuerdo al Banco Mundial, en México existen al menos 85 rellenos potenciales para el desarrollo de proyectos de recuperación y aprovechamiento de metano, con un potencial de reducción de 31 millones de ton CO<sub>2</sub> al año. Los primeros sitios identificados, incluyen: Ciudad Juárez, Chihuahua, Tijuana, León, Puebla, Querétaro, Naucalpan, Tlalnepantla, Distrito Federal, Guadalajara, Cuautitlán, Puerto Vallarta, Atizapán de Zaragoza, Zapopan, Cuernavaca y Cuautla.

Los principales objetivos que se plantea SEMARNAT son:

- Desarrollar las capacidades técnicas que permitan el desarrollo de proyectos de recuperación y utilización de metano que sean atractivos económicamente
- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para contribuir con esto a la mitigación del cambio climático.
- Crear un marco jurídico y administrativo para el desarrollo de proyectos de generación de energía eléctrica a partir de metano.
- Apoyar a las autoridades municipales en la implementación de sistemas de gestión integral de RSU, a fin de mejorar la factibilidad de los proyectos de recuperación y aprovechamiento de metano (CH<sub>4</sub>).

## 2.7 Gases de efecto invernadero originados por rellenos sanitarios

Actualmente hay una gran preocupación por la gran acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera provocando un cambio climático global con consecuencias no conocidas. La mayor atención se enfoca en controlar las emisiones de CO<sub>2</sub>, el gas del efecto invernadero más común. Sin embargo, existe el interés de controlar otros gases causantes de este problema, particularmente el CH<sub>4</sub> se está incrementando. El metano es de preocupación debido a que es 20 veces más efectivo capturar en la atmósfera que el CO<sub>2</sub>. Los rellenos sanitarios son la fuente más grande de metano antropogénico, lo que representa aproximadamente el 30% de las emisiones (Department of Energy, 2008). Una forma para poder mitigar estas emisiones es operar los rellenos sanitarios como biorrellenos metanogénicos o biorreactores, donde los flujos de líquidos y gas son controlados eficientemente para mantener en óptimas condiciones la degradación de los residuos y el control de la liberación de metano (EPA, 2007).

Los mayores beneficios de la recirculación de lixiviados es la reducción de contaminantes como las emisiones de CH<sub>4</sub>. El control del relleno sanitario puede reducir las emisiones de metano antropogénico de un 10 a un 20% (Department of Energy, 2008). Debido a que el CH<sub>4</sub> es un poderoso gas del efecto invernadero, el control de este puede tener un efecto importante en la mitigación de los efectos del cambio climático.

El término “biogás” no es lo mismo que “gas natural” o “metano”; estos son tres conceptos distintos que significan por consecuencia diferentes cosas. El término “metano del relleno sanitario” es engañoso ya que suele ser utilizado para entender que el gas del vertedero es solamente metano.

El metano es un gas de hidrocarburos y es un gas del efecto invernadero así como explosivo y venenoso. Este es generado normalmente por la descomposición de los residuos (en menores cantidades en pantanos, en los estómagos de vacas, etc.).

La liberación de metano crea algunos problemas en el calentamiento global y la liberación de contaminantes tóxicos que pueden causar cáncer y otros problemas de salud en las comunidades cercanas. Estudios que se hicieron en 38 rellenos sanitarios en Nueva York, encontraron que las mujeres que vivían cerca de estos sitios en donde el biogás no era controlado tenían cuatro veces más probabilidades de tener cáncer o leucemia (Investigation of Cancer Incidence and Residence near 28 Landfills with Soil Gas Migration Conditions, 1998).

### 2.7.1 La política sobre el calentamiento global debido al biogás

Los promotores de la combustión del biogás del relleno sanitario, señalan que el metano es un potente gas del efecto invernadero; esto es una razón por la que quemar este gas para producir energía y también para obtener energía considerada “verde”. A menudo se ignora el hecho que la mayoría de rellenos los cuales cuentan con sistemas de recolección, están quemando el biogás de una forma o cualquier otra. Los incentivos involucrados en la comercialización de la energía verde no son suficientes para que los rellenos sin sistemas de recolección de biogás estén siendo instalados para producir energía renovable del biogás, probablemente debido a que no generan suficientes cantidades de biogás como para comercializarlo o ya sea porque no les interesa realizar mayores inversiones y cuidados adicionales en dichos sitios.

Algunas medidas que se han tomando en consideración para darle tratamiento adecuado al biogás se presentan a continuación:

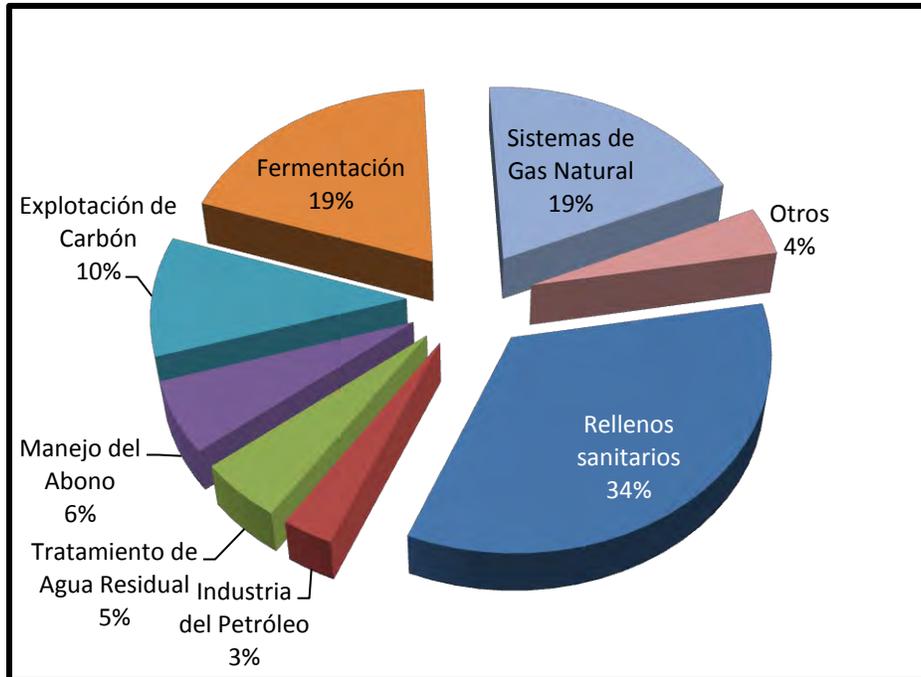
#### 2.7.1.1 Tratamiento

El tratamiento térmico del metano y de los compuestos orgánicos del metano a través de la quema o combustión, consiste en, reducir las emisiones de estos compuestos al medio ambiente. Otro beneficio de la quema es que convierte los compuestos orgánicos del mercurio a compuestos menos tóxicos y compuestos del mercurio inorgánico a menos peligrosos.

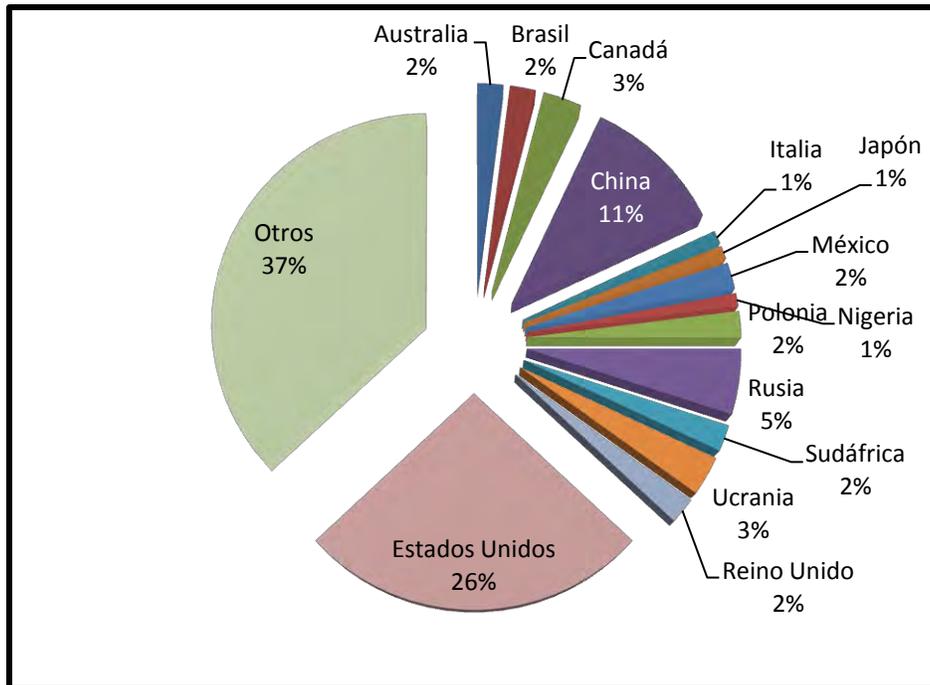
#### 2.7.1.2 Métodos de control estándar del biogás

Para controlar la migración del biogás y reducir sus emisiones, todos los rellenos deben de contar con sistemas de recolección de biogás y quemadores de este. Además, los reglamentos y normas requieren monitoreos mensuales en cada pozo de recolección, además de monitorear las emisiones superficiales de metano para asegurar que el sistema de recolección está funcionando adecuadamente.

De acuerdo la EPA, los rellenos sanitarios de residuos sólidos urbanos, son la fuente más grande de emisiones de metano en los Estados Unidos, y represento alrededor de un 25% en el 2004 (EPA, 2007). A continuación se presentan datos publicados por esta Agencia y que hay que tener en consideración para no dejar de prestarle la atención debida a los problemas ambientales originados por este tipo de infraestructura de saneamiento. En la Figura 6 se indican las emisiones de metano producidas por tipo de fuente. En la Figura 7 se muestran las emisiones de metano en el mundo.



**Figura 6 Emisiones de metano por fuente en E.U.A**  
 Fuente: Environmental Protection Agency (EPA, 2007)



**Figura 7 Emisiones de metano en el mundo**  
 Fuente: Environmental Protection Agency (EPA, 2007)

La preocupación principal que se tiene debido al biogás es que el metano es un efecto-invernadero que permanece en la atmosfera aproximadamente de 9 a 15 años. El CH<sub>4</sub> es 20 veces más fácil de capturar en la atmosfera que dióxido de carbono considerando un periodo de 100 años. Una vez en la atmósfera, el metano es absorbido por las radiaciones infrarrojas de la tierra que de otra forma escaparían al espacio.

Como fuente de energía el metano tiene valor como constituyente primario del gas natural y como una fuente de energía importante. Según la EPA, los esfuerzos para utilizar las emisiones de metano pueden producir energía significativa, economía y beneficios ambientales. Muchas compañías trabajan en conjunto con la EPA para reducir las emisiones de metano y convertir este en energía bajo el marco de Alianza de Metano a los Mercados (EPA, 2007).

## 3 BASES DE DISEÑO

---

### 3.1 Legislación en Materia de Residuos Sólidos

Los países que enfrentan la problemática de los residuos sólidos, cuentan con leyes, reglamentos y planes de manejo adecuado de estos. México, no es la excepción y también se encuentra regulado bajo leyes y reglamentos.

La legislación para el manejo y disposición final de residuos sólidos que se tomará en cuenta para el desarrollo de este trabajo es: Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, NOM-083-SEMARNAT-2003 y Normas Mexicanas (NMX-AA-061-1985, NMX-AA-015-1985 y NMX-AA-019-1985).

Debido a la problemática que ha surgido en los últimos años respecto al control de los residuos sólidos y la alteración que producen estos al ambiente, se tomaron medidas para la prevención y gestión integral de dichos residuos tanto a nivel federal como estatal.

A continuación se presentan de forma general dichas leyes y reglamentos en los cuales se mencionan las obligaciones que tienen todos los participantes en la producción y generación de residuos sólidos para proteger al ambiente, y que tiene facultades en todo el territorio nacional. Sus disposiciones son de orden público e interés social, tienen por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente adecuado y procurar el desarrollo sustentable.

#### 3.1.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (1917)

En la Constitución se hace referencia a algunos artículos sobre los derechos y obligaciones que se deben de cumplir en materia de preservación del medio ambiente y uso del suelo.

El Artículo 27, tiene por decreto las propiedades de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional. Corresponde a la Nación dictar las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas para preservar y restaurar el equilibrio ecológico; para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que la propiedad pueda sufrir en perjuicio de la sociedad.

Dentro de las facultades que le confieren al Congreso, el artículo 73 en su apartado XXIX-G, menciona que le corresponde a este: expedir leyes que establezcan la concurrencia del Gobierno Federal, los gobiernos de los Estados y Municipios; en materia de protección al ambiente, de preservación y restauración del equilibrio ecológico.

Por último, el artículo 115 en su apartado III menciona lo que confiere a los Estados de la Federación y del Distrito Federal. Menciona que los municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos de limpia, recolección, traslado, tratamiento y disposición final de residuos.

### 3.1.2 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (H. Congreso de la Unión, 2003)

Tiene por objeto regular la generación y manejo integral de residuos peligrosos, establecer bases para el manejo de residuos urbanos y de manejo especial, así como las bases para aplicar principios de valorización, responsabilidad compartida y manejo integral de residuos sólidos en el país. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las atribuciones que tienen los tres órdenes de gobierno en términos de esta Ley.

**Tabla 1 Atribuciones de los tres órdenes de gobierno**

<p>FEDERACIÓN</p>	<p>Elaborar el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y el de Remediación de Sitios Contaminados con éstos.</p>
	<p>Expedir las normas oficiales mexicanas relativas al desempeño ambiental que deberá prevalecer en el manejo integral de RSU y de manejo especial</p>
	<p>Verificar el cumplimiento de la normatividad en las materias de su competencia e imponer las medidas correctivas, de seguridad y sanciones que en su caso correspondan.</p>
	<p>Establecer y operar, en el marco del Sistema Nacional de Protección Civil, en coordinación con los gobiernos de las entidades federativas y de los municipios, el sistema para la prevención y control de contingencias y emergencias ambientales relacionadas con la gestión de residuos.</p>
	<p>Promover la investigación, desarrollo y aplicación de tecnologías, equipos, sistemas y procesos que eliminen, reduzcan o minimicen la liberación al ambiente y la transferencia, de uno a otro de sus elementos, de contaminantes provenientes de la gestión integral de los residuos.</p>
	<p>Promover la educación y capacitación continua de personas, grupos u organizaciones de todos los sectores de la sociedad, con el objeto de modificar los hábitos negativos para el ambiente de la producción y consumo de bienes.</p>
	<p>Diseñar y promover ante las dependencias competentes el establecimiento y aplicación de incentivos económicos, fiscales, financieros y de mercado, que tengan por objeto prevenir o evitar la generación de residuos; su valorización; su gestión integral y sustentable.</p>
<p>ENTIDADES FEDERATIVAS</p>	<p>Establecer el registro de planes de manejo y programas para la instalación de sistemas destinados a su recolección, acopio, almacenamiento, transporte, tratamiento, valorización y disposición final.</p>
	<p>Promover, en coordinación con el Gobierno Federal y las autoridades correspondientes, la creación de infraestructura para el manejo integral de los residuos sólidos urbanos, en las entidades federativas y municipios con la participación de inversionistas.</p>
	<p>Promover programas municipales de prevención y gestión integral de los residuos de su competencia y de prevención de la contaminación e sitios con tales residuos y su remediación, con la participación activa de las partes interesadas.</p>
	<p>Coadyudar con el gobierno Federal en la integración de los subsistemas de información nacional sobre la gestión integral de residuos de su competencia</p>
	<p>Formular, establecer y evaluar los sistemas de manejo ambiental del gobierno estatal.</p>

Tabla 8 Atribuciones de los tres órdenes de gobierno “Continuación”

MUNICIPIOS	Formular, por sí o en coordinación con las entidades federativas, y con la participación de representantes de los distintos sectores sociales, los Programas Municipales para la Prevención y Gestión Integral de los RSU.
	Controlar los residuos sólidos urbanos.
	Otorgar las autorizaciones y concesiones de una o más de las actividades que comprende la prestación de los servicios de manejo integral de los RSU.
	Establecer y mantener actualizado el registro de los grandes generadores de RSU.
	Verificar el cumplimiento de las disposiciones de esta Ley, normas oficiales mexicanas y demás ordenamientos jurídicos en materia de RSU e imponer las sanciones y medidas de seguridad que resulten aplicables.
	Efectuar el cobro por el pago de los servicios de manejo integral de RSU y destinar los ingresos a la operación y el fortalecimiento de los mismos.

### 3.1.3 Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (H. Congreso de la Unión, 1988)

Esta ley contiene la distribución de competencias federal, estatal y municipal, como se describe en los apartados respectivos y sienta las bases para la política ambiental y sus instrumentos, así como su planeación.

En materia de residuos sólidos, se encuentran las disposiciones que se relacionan a continuación:

Los artículos 36 a 37 Bis otorgan facultades a la SEMARNAT para la formulación de las Normas Oficiales Mexicanas en materia ambiental.

En cuanto a la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo se consideran los criterios establecidos en los artículos 98 a 107 destacando lo establecido en la Fracción V del citado artículo 98 que dispone que en la realización de obras públicas o privadas que por sí mismas puedan provocar deterioro severo de los suelos, deben incluirse acciones equivalentes de regeneración, recuperación y restablecimiento de su vocación natural.

El artículo 99, fracción XII dispone que los criterios ecológicos para la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo se consideraran en la formulación de los programas de ordenamiento ecológico.

El capítulo IV de esta Ley hace referencia a la prevención y control de la contaminación y, reconoce en sus artículos del 134 a 144, la necesidad de prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, incorporar técnicas para su reuso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final de manera eficiente para evitar la contaminación del suelo, alteraciones nocivas en el proceso biológico del mismo o las alteraciones que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación.

Por su parte el artículo 135 determina como criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo: la ordenación del desarrollo urbano; la operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios y; el manejo de residuos peligrosos.

Sin embargo el artículo 138 prevé la posibilidad de que la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) promueva la celebración de acuerdos de coordinación y asesoría con los gobiernos estatales y municipales para la implantación y mejoramiento de sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de estos residuos.

Por otra parte, atendiendo a lo dispuesto por el Artículo 142 prohíbe la importación de residuos para su derrame, depósito, confinamiento, almacenamiento, incineración o cualquier tratamiento para su destrucción o disposición final en el territorio nacional.

En los artículos 150 al 153 se regula lo relativo a los residuos peligrosos.

Los artículos 171 al 175 Bis regulan lo referente a las sanciones administrativas siendo aplicables a cualquier violación a la normatividad ambiental, coincide con lo que establece la Ley General para la Protección y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) al respecto.

Prevé al igual que la LGPGIR el recurso de revisión contra las resoluciones definitivas, siendo supletoria la Ley Federal de Procedimiento Administrativo.

### 3.1.4 Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (SEMARNAT, 2003)

Debido al gran crecimiento poblacional y con esto una alta demanda de recursos y servicios, ha sido necesario implementar medidas más estrictas respecto al manejo, control y disposición final de los residuos sólidos. Es por esto que fue necesario crear una norma que regulara la disposición final, que los sitios tanto en su diseño, construcción, operación, clausura, monitoreo y obras complementarias; se realicen de acuerdo a lineamientos que garanticen la protección al ambiente.

La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 es el único instrumento normativo para la aplicación del marco ambiental referente a los rellenos sanitarios, es de carácter obligatorio en el ámbito nacional. Establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los RSU, basándose en las características geológicas, climatológicas, así como las situaciones que pueden afectar a las obras civiles, áreas naturales protegidas y zonas ya habitadas, poniendo especial interés a la protección de los mantos acuíferos y cuerpos superficiales de agua.

De la Norma se resaltan diversos puntos a considerar para el emplazamiento del sitio de disposición final, como:

- En localidades mayores a 2,500 habitantes, el límite del sitio de disposición final debe estar a una distancia mínima de 500m contados a partir del límite de la traza urbana existente.
- El sitio de disposición final se debe localizar fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años.
- La distancia de ubicación del sitio de disposición final, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, lagos y lagunas debe ser de 500m como mínimo.
- La ubicación entre el límite del sitio de disposición final y cualquier pozo de extracción de agua, tanto en operación como abandonados, será de 100m adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento. Cuando no se pueda determinar el cono de abatimiento, la distancia al pozo no será menor de 500m.
- No debe ubicarse en zonas de cavernas, fracturas o fallas geológicas.
- Todos los sitios de disposición final deben contar con una barrera geológica natural o equivalente, a un espesor de un metro y un coeficiente de conductividad hidráulica de al menos  $1 \times 10^{-07}$  cm/seg sobre la zona destinada al establecimiento de las celdas de disposición final; o bien garantizarlas con un sistema de impermeabilización equivalente.
- Se debe elaborar un programa de monitoreo de biogás, lixiviado y acuíferos para asegurar la adecuada operación de los sitios de disposición final.

Siguiendo dichos lineamientos se realizó la selección del sitio para la construcción del Relleno Sanitario, el cual estará ubicado en el km 94 de la carretera Acapulco-Zihuatanejo. El criterio de selección del sitio se presentara más adelante.

Según la cantidad de residuos generados, en base a los estudios de generación y a la población, se generan aproximadamente 55.46 ton/día ( $70\text{m}^3/\text{día}$ ), lo que corresponde a un relleno Tipo "B" por estar en el rango de 50 a 100 ton/día. Por tratarse de un relleno Tipo B, los estudios y análisis que tendrán que realizarse son:

1. Hidrológico: debe de garantizar que no existe obstrucción del flujo en el área de inundación o, posibilidad de deslave o erosión que provoque el arrastre de los residuos sólidos, esto si el sitio se encuentra en zona de inundación con periodos de retorno de 100 años, así mismo la distancia de ubicación del sitio, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, debe ser de 1,000m como mínimo y contar con una zona de amortiguamiento tal que pueda retener el caudal de la precipitación pluvial máxima presentada en los últimos 10 años en la cuenca.
2. Topográfico: este estudio servirá para determinar las características físicas del sitio, debe incluir planimetría y altimetría a detalle del sitio seleccionado para el sitio de disposición final.
3. Geotécnico: se deberá realizar para obtener los elementos de diseño necesarios y garantizar la protección del suelo, subsuelo, agua superficial y subterránea, la estabilidad de las obras civiles y del sitio de disposición final a construirse, incluyendo al menos las siguientes pruebas:
  - Exploración y muestreo
  - Estudios en laboratorio
4. Generación y composición de los RSU: estos estudios servirán para identificar las cantidades y características de los residuos sólidos del sitio en estudio, tanto actuales como proyectadas para un periodo igual al periodo de vida útil del sitio. En caso de que estos datos no se encuentren disponibles, se deberán realizar muestreos correspondientes conforme a lo establecido en las siguientes normas mexicanas:
  - NMX-AA-61-1985 Determinación de la generación
  - NMX-AA-15-1985 Muestreo-Método de cuarteo
  - NMX-AA-22-1985 Selección y cuantificación de subproductos
  - NMX-AA-19-1985 Determinación del peso volumétrico *IN SITU*

Los requerimientos volumétricos para el diseño del relleno sanitario, deberán obtenerse para los años estimados, mediante los volúmenes totales anuales y acumulados tanto de los residuos como del material de cubierta, empleando para ello la generación de residuos y los pesos volumétricos.

5. Generación de biogás: se debe hacer una estimación de la cantidad de generación de biogás esperada, mediante análisis químicos estequiométricos, que tomen en cuenta la composición química de los residuos por manejar.
6. Generación de lixiviado: de la misma forma que los estudios de generación de biogás, se debe hacer una cuantificación del lixiviado mediante algún balance hídrico.

Los requerimientos de compactación que exige la norma para este tipo de rellenos es que sea mayor de  $500 \text{ kg/m}^3$ , y las obras complementarias e infraestructura de servicios son:

- Caminos de acceso
- Caminos interiores
- Cerca perimetral
- Caseta de vigilancia y control de acceso
- Báscula para el pesaje de los residuos
- Agua potable, electricidad y drenaje
- Vestidores y servicios sanitarios (zona de duchas y sanitarios)
- Franja de amortiguamiento del relleno hacia el exterior (mínimo 10m)

El sitio de disposición final debe de contar con un “Manual de Operación” en el cual se indiquen los requisitos básicos que deben de cumplirse para tener un buen control las instalaciones. Para asegurar la adecuada operación del sitio deberán de realizarse monitoreos tanto de lixiviados como de biogás

3.1.5 Ley de Aprovechamiento y Gestión Integral de los Residuos del Estado de Guerrero (Guerrero, 2008)

Esta Ley tiene por objeto propiciar el desarrollo sustentable mediante la prevención de la generación, el aprovechamiento y la gestión integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial que no sean considerados como peligrosos por la Legislación Federal de la materia, así como la prevención de la contaminación y remediación de suelos contaminados por residuos.

En el Título Segundo de la presente Ley, Capítulo II-Artículo 7 apartado II menciona que corresponde al Estado, a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Guerrero (SEMAREN), el ejercicio de incorporar en los planes de manejo y programas de ordenamiento ecológico territorial y ordenamiento territorial de asentamientos humanos, la consideración al establecimiento de la infraestructura indispensable para la gestión integral de los residuos sólidos.

En el Título Tercero, Capítulo II-Artículo 13. Corresponde al Estado y los Municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias deberán elaborar e instrumentar los programas locales para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos (RSU) y de manejo especial. Dentro de este mismo Título, en el Capítulo III- Artículo 15, los planes de manejo se establecerán para los siguientes fines y objetivos, promover la prevención de la generación y la valorización de los RSU y de manejo especial, así como su manejo integral, a través de medidas que reduzcan costos de su administración, faciliten y hagan más efectivos, desde la perspectiva ambiental, tecnológica, económica y social, los procedimientos para su manejo.

El Título Quinto, en su Capítulo III-Artículo 104 menciona que corresponde a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Guerrero (SEMAREN), y los Ayuntamientos promoverán y contribuirán al establecimiento de la Bolsa de Subproductos, a través de la cual se incentivará la valorización de los materiales contenidos en los RSU y de manejo especial, susceptibles de aprovechamiento.

## 3.2 Estudios de Campo

### 3.2.1 Selección del Sitio para Ubicación del Relleno Sanitario (Gutiérrez, 2006)

Con el propósito de seleccionar el sitio más adecuado para ubicar el relleno sanitario intermunicipal, se efectuaron reuniones con los presidentes y representantes de los municipios participantes: Atoyac de Álvarez, Benito Juárez y Técpan de Galeana.

La selección de sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales, se basó en la normatividad correspondiente y vigente: la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Como se señaló anteriormente, la decisión de la ubicación del sitio en donde se alojarán los residuos sólidos es de vital importancia para el entorno ecológico, además de los intereses tanto de autoridades como de los habitantes de las localidades aledañas al lugar.

Describir y tomar criterios de acuerdo a las condiciones ambientales del sitio y cualidades de la región considerando a esta como la porción de territorio determinada por caracteres geográficos, étnicos, lingüísticos y administrativos. Al considerar los aspectos de ingeniería, es necesario introducir los estudios adecuados que contribuyan a la determinación óptima de ubicación del relleno sanitario, las características de la zona como lo son la fisiografía, geología, vegetación y uso actual del suelo, temperatura, humedad relativa, vientos dominantes y precipitación, todos ellos representan los componentes ambientales y proporcionarán las cualidades de las zonas para la decisión de selección de sitios alternativos incluyendo los resultados obtenidos de los estudios de campo de mecánica de suelos y topografía, entre otros, y así llegar a la elección final del sitio que fungirá como el lugar de depósito de residuos sólidos considerados no peligrosos.

Las principales consideraciones técnicas tomadas en cuenta fueron:

- Distancia con respecto a áreas generadoras
- Tenencia de la tierra
- Superficie y vida útil del sitio
- Topografía
- Aguas superficiales y subterráneas
- Suelos
- Geología
- Bancos de material para cobertura
- Vegetación y fauna
- Acceso al sitio
- Uso de suelo
- Clima

Es importante mencionar que en la actualidad es factible construir y operar rellenos sanitarios en sitios en donde no se cumplen al 100% los requisitos señalados en la normatividad vigente, sin embargo, en estas circunstancias, se implementan obras de ingeniería para garantizar que el entorno ambiental no sea impactado, o en su defecto, que las afectaciones sean mínimas. Evidentemente, los costos de estas obras incrementan costos de construcción y operación de los sitios.

Se proponen alternativas para la localización del Sitio de Disposición Final, las cuales deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Cuando un sitio de disposición final se pretenda ubicar a una distancia menor de 13 km del centro de la(s) pista(s) de un aeródromo de servicio al público o aeropuerto, la distancia elegida se determinará mediante un estudio de riesgo aviario.
- Respetar derecho de vía de autopistas, ferrocarriles, caminos principales y caminos secundarios.
- No se deben ubicar sitios dentro de áreas naturales protegidas.
- Se deben respetar los derechos de vía de obras públicas federales, tales como oleoductos, gasoductos, poliductos, torres de energía eléctrica, acueductos, etc.
- Debe estar alejado a una distancia mínima de 500 m, a partir de la traza urbana de la población por servir, así como de poblaciones rurales de hasta 2,500 habitantes. En caso de no cumplirse con esta restricción, se debe demostrar que no existirá afectación alguna a dichos centros de población.
- Se debe localizar fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años. En caso de no cumplir lo anterior, se debe demostrar que no exista la obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves o erosión que provoquen arrastre de los residuos sólidos.
- El sitio de disposición final de residuos sólidos municipales no se debe ubicar en zonas de pantanos, marismas y humedales.
- La distancia de ubicación del sitio, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, debe ser de 500m como mínimo.
- Debe estar a una distancia mínima de 60m de una falla activa que incluya desplazamiento en un periodo de un millón de años.
- Se debe localizar fuera de zonas donde los taludes sean inestables, es decir, que puedan producir movimientos de suelo o roca, por procesos estáticos y dinámicos (sismicidad).
- Se deben evitar zonas donde existan o se puedan generar asentamientos diferenciales que lleven a fallas o fracturas del terreno, que incrementen el riesgo de contaminación al acuífero.

- Todos los sitios de disposición final deben contar con una barrera geológica natural o equivalente, a un espesor de 1 m y un coeficiente de conductividad hidráulica, de al menos  $1 \times 10^{-7}$  cm/s sobre la zona destinada al establecimiento de las celdas de disposición final; o bien, garantizarla con un sistema de impermeabilización equivalente.
- La distancia mínima del sitio a pozos para extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero tanto en operación como abandonados, debe estar a una distancia de la proyección horizontal por lo menos de 100 m de la mayor circunferencia del cono de abatimiento, siempre que la distancia resultante sea menor a 500 m, esta última será la distancia a respetar.

Para poder elegir los sitios que cumplan con las exigencias anteriores, fue necesario recabar información bibliográfica, de campo, de cartas topográficas, geológicas e hidrológicas de la zona, principalmente; para tal efecto, se realizó una inspección de la zona para poder seleccionar varias alternativas (Gutiérrez, 2006).

En la visita realizada a los municipios de Atoyac de Álvarez, Benito Juárez y Técpan de Galeana, para la selección de los posibles predios para la ubicación del Relleno Sanitario Intermunicipal; junto con personal de los H. Ayuntamientos de Benito Juárez y Técpan de Galeana, se vieron diversos sitios que podrían cumplir con los requisitos de la norma; de los cuales, los primeros seis lugares fueron indicados de común acuerdo entre los comités de Benito Juárez y Técpan de Galeana, y los últimos dos sólo los sugirió el comité de Técpan.

Con base en lo anterior, los presidentes municipales participantes propusieron los siguientes sitios ubicados en el municipio de Técpan de Galeana y que se mencionan a continuación:

- Sitio 1. El Jovero
- Sitio 2. Kilometro 94 Carretera Acapulco Zihuatanejo
- Sitio 3. Carretera a Tetitlán
- Sitio 4. El Jovero 2ª
- Sitio 5. El Jovero 2B
- Sitio 6. Los tamarindos
- Sitio 7. La soledad
- Sitio 8. Camino a Chiota

### 3.2.1.1 Metodología para la Selección del Sitio

De acuerdo con la información recabada en la visita, la observación de los sitios y las cartas del INEGI, se lleva a cabo un análisis de forma cualitativa y cuantitativa de las ocho alternativas. En donde básicamente se procede a ubicarlas en el plano y así referirlas a ciertos parámetros que permitan elegir el lugar que mejor se apegue a las exigencias del proyecto; tales como distancias a vialidades principales, a asentamientos humanos, a cabeceras municipales y a fallas geológicas; accesibilidad al lugar, tipo de suelo, costo del predio, etc.

Con base a estos datos, se realizó un análisis de cada uno de los sitios. Se asignó una calificación a cada uno de los parámetros descritos en el párrafo anterior, con un rango de 0 a 5, en donde 0 es el más desfavorable y 5 es el óptimo. Las tablas donde se resume este análisis se presentan en el ANEXO 1.

1. Sitio 6, Jovero 2B (Pozo Seco)
2. Sitio 5, Jovero 2A (junto a Jovero 2B)
3. Sitio 2, Kilómetro 94 de la carretera Acapulco – Zihuatanejo
4. Sitio 1, Camino a Chiota, Jovero
5. Sitio 4, Jovero 2.
6. Sitio 3, Carretera a Tetitlán
7. Sitio 7, Los Tamarindos (Técpan)
8. Sitio 8, La Soledad (Técpan)

De estos sitios, se seleccionó el predio que está ubicado en el Kilómetro 94 de la Carretera Acapulco-Zihuatanejo, por lo siguiente:

Cumple en mayor medida con las condiciones establecidas por la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003

La superficie del terreno es de aproximadamente 11.13 ha no tiene problemas de tenencia de la tierra. Los propietarios accedieron a la venta del terreno.

Se encuentra ubicado adyacente a la carretera Acapulco-Zihuatanejo y ello reduce el costo de obras de acceso adicionales. Existe un camino de acceso al predio ya construido.

Está ubicado a distancias muy accesibles de las poblaciones a servir: a 21km de Atoyac de Álvarez, a 11km de Benito Juárez y a 10km de Técpan de Galeana.

En un radio de 100km del sitio, no se encuentra ningún aeródromo o aeropuerto.

Los vientos predominantes de la región de estudio se desplazan del noreste al suroeste con vientos menores de 5% de frecuencia. Lo anterior significa que los habitantes no se verán perjudicados por el relleno sanitario, así mismo las emisiones a la atmósfera generadas por la operación del relleno sanitario, se considera que serán ocasionadas por:

- 1) La descomposición biológica de la materia orgánica que llegará al sitio, siendo parte de esta descomposición, la formada por el biogás, el cual es una mezcla de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Este será dispersado a la atmósfera en la etapa de operación del relleno sanitario por medio de pozos de extracción ubicados a una equidistancia de 15m.
- 2) Las emisiones de polvos por el manejo de materiales y tráfico de transportes, el cual presenta poca significancia, si se compara con las distintas localidades a las que se les brindará el servicio. Las emanaciones que estos vehículos, principalmente serán de hidrocarburos, tales como: monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ).

Las operaciones tan reducidas que presentan estos vehículos y los contaminantes emitidos por los mismos, no tendrán efecto sobre las variables del clima.

En lo que respecta al ruido ocasionado por la maquinaria y los vehículos que operarán en el sitio, la normatividad específica que los límites de esta contaminación se situarán a 400m del sitio de producción, por lo que no existe ningún problema de afectación a la mancha urbana más próxima al sitio (Técpán de Galeana, 11km).

Con el fin de minimizar estos contaminantes así como el factor imagen, se establecerá alrededor del predio la construcción de una cortina verde para mitigar los posibles impactos ambientales negativos, originados por el ruido y la emanación de polvo que se pueda originar por las operaciones dentro de las instalaciones. Así mismo, esta área verde constituida con pasto y palmeras de altura mayor a 10 metros y con copa frondosa, contribuirá a formar un paisaje natural estético y agradable.

En la Figura 1 se muestra una vista panorámica del predio en la cual se puede observar que abunda una vegetación abundante. En la Figura 2 se puede observar que el predio se encuentra cercano a la carretera Acapulco – Zihuatanejo, lo que representa una vía de fácil acceso al sitio en cualquier época del año; este sitio a su vez deberá de contar con una franja de amortiguamiento para evitar que el ruido sea molesto a poblaciones aledañas y evitar dar una mala imagen.



**Figura 1** Vista del predio El Jovero desde la parte superior  
Fuente: Imagen tomada de (Gutiérrez, 2006)



**Figura 2** Vista del predio El Jovero adyacente a la carretera Acapulco Zihuatanejo  
Fuente: Imagen tomada de (Gutiérrez, 2006)

### 3.2.2 Estudio Topográfico (Niño, 2008)

#### 3.2.2.1 Levantamiento Topográfico

Los trabajos de topografía en el predio donde se pretende construir el relleno sanitario, consistieron en el levantamiento con una estación total “Leica TC 500” y con un Teodolito “Wild-T1A” con aproximación de 5” de la poligonal cerrada del sitio en las 11. 13 ha marcadas como área total del terreno. Los estudios en el terreno consistieron en una poligonal envolvente de 21 vértices que comprende el sitio, además de trabajos de planimetría y altimetría, de los cuales a continuación se comentan.

#### 3.2.2.2 Planimetría

En primer lugar, se levanto la superficie total del predio, la cual arrojó una poligonal irregular cerrada de 21 vértices con una extensión de 11.13 ha.

La orientación de la poligonal se realizó magnéticamente. La tolerancia marcada para este tipo de trabajo fue:

Tolerancia angular =  $1' \sqrt{N}$ , donde: N en el número de vértices de la poligonal.

Tolerancia lineal = 1/10,000

El levantamiento de la poligonal que engloba la superficie total del predio se dibujó en escala 1:1000.

#### 3.2.2.3 Altimetría

La representación de la altimetría de esta superficie, se dibujó en un plano escala 1:1000 con curvas de nivel a cada metro, la diferencia del punto más alto con el punto más bajo del terreno fue de 35.00 m.

Dentro de los trabajos de altimetría, se realizó el levantamiento de secciones en el predio, orientadas de este a oeste (transversales) y de sur a norte (longitudinales), las escalas utilizadas para representar las secciones fueron: horizontal 1:1000 y vertical 1:1000.

### 3.2.2.4 Metodología empleada para el levantamiento topográfico

Trazo: partiendo de puntos de referencia o bancos de nivel, se procede al replanteo de los trazos necesarios que consiste en la ubicación de trompos y estacas como testigos, cada 20.00 m. y puntos importantes con tachuelas tanto para tangentes como para curvas.

Nivel: se toma como base un banco de nivel para “correr” un perfil sobre las estaciones replanteadas y detalles intermedios sobresalientes.

Secciones: el levantamiento de sección en una línea auxiliar perpendicular (de preferencia) al eje principal a la estación correspondiente en la cual serán detectados todos los detalles importantes los cuales serán detectados con distancias vertical y horizontal partiendo de la estación.

Topografía: la configuración se realizara a partir de los datos obtenidos en campo tales como trazo, nivel y secciones digitalizándose en computadora en paquete autocad.

#### Desarrollo del levantamiento topográfico

Trazo de poligonal abierta del eje principal y eje secundario con trompos, y estacas numeradas con esmalte a cada 20 metros y puntos intermedios necesarios.

Partiendo de dos puntos conocidos del eje principal con sus valores de x, y y z, proporcionados por la dependencia.

La lectura de los ángulos horizontales será en posición directa e inversa, la tolerancia angular permisible será de  $t = (1/n) (1/2)$  en donde n es el numero de vértices medidos, la tolerancia lineal permisible será de;  $t = 1/10,000$ .

Nivelación de perfil poligonal partiendo de un banco conocido proporcionado por la dependencia. Se nivelara con nivel fijo de lecturas al centímetro en cada uno de los trompos y puntos intermedios con comprobación de lecturas al milímetro y con procedimiento de ida y vuelta. la tolerancia permisible será de  $t = + / - 0.01/n$  siendo n el recorrido de ida y vuelta en km. los bancos de nivel se colocaran fuera del derecho de vía sobre lugares fijos o en mojoneras.

Levantamiento de radiaciones para configuración: La estación total será ubicada en puntos estratégicos para el levantamiento de radiaciones con distancia horizontal y vertical de los puntos necesarios para la configuración de terreno.

Radiaciones con distancia horizontal para obtener detalles planimétricos. De no emplearse el sistema anunciado en el punto anterior por condiciones de topografía de terreno o vegetación en la

cual no sea posible el uso de estación total por falta de visibilidad, se recurrirá al sistema de nivelación de ejes transversales al eje principal y secundario con nivel fijo.

### 3.2.3 Estudio Geotécnico (Couttolenc, 2008)

Como se menciona dentro del apartado de la NOM-083-SEMARNAT-2003, el estudio geotécnico tiene como finalidad, obtener los elementos de diseño necesarios y garantizar con ello, la protección del suelo, subsuelo, agua superficial y subterránea, estabilidad de las obras civiles, entre otros factores.

#### 3.2.3.1 Trabajos de campo

Dentro de los trabajos de campo realizados para determinar la composición del sitio en estudio, se realizó la primera etapa que fue de exploración y muestreo que consistió de:

##### *Sondeos de Penetración Estándar*

La investigación de campo se estableció mediante la realización de tres sondeos de exploración geotécnica empleando la herramienta de técnica de penetración estándar (SPT-1 a SPT-3) y tres pozos a cielo abierto (PCA-1 a PCA-3). Los sondeos de penetración estándar se llevaron hasta una profundidad máxima de 14.55 m, a continuación se presentan los resultados obtenidos en los tres sondeos de penetración estándar.

#### **SONDEO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR SPT-1**

<b>Profundidad (m)</b>	<b>Descripción</b>
0.00 – 2.40	Arena limosa café claro, suelta a media, con gravas aisladas y poco carbonato de calcio, su contenido natural de agua promedio es de 11% y contenido de finos de 50%.
2.40 – 6.80	Arena fina café claro, muy compacta, con poco limo y algunas gravas aisladas; presenta un contenido natural de agua promedio del 12% y un porcentaje de finos de 6%.
6.80 – 10.60	Arena limosa café claro, muy compacta, con algunas gravas aisladas, su contenido natural de agua medio es de 14%, y con un porcentaje de finos de 35%.
10.60 – 14.55	Arena limosa gris verdoso muy compacta con un contenido natural de agua del 19% y un porcentaje de finos de 33%.

### SONDEO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR SPT-2

Profundidad (m)	Descripción
0.00 – 0.60	Arena limosa café claro de compacidad media. El contenido natural de agua es de 7% y el contenido de finos de 44%.
0.60 – 5.40	Arcilla arenosa café claro y gris verdoso, muy dura con carbonato de calcio; se obtuvo un contenido natural de agua promedio de 13%, y un porcentaje de finos de 53%.
5.40 – 12.00	Arena limosa gris verdoso, muy compacta, con lentes de limo y carbonato de calcio, presentando un contenido natural de agua promedio del 10%, y con un porcentaje de finos de 20%.

### SONDEO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR SPT-3

Profundidad (m)	Descripción
0.00 – 0.60	Arena limosa café claro, de compacidad media, con un contenido natural de agua de 7% y un porcentaje de finos de 43%.
0.60 – 12.22	Arena limosa café claro, muy compacta, con grumos cementados, su contenido natural de agua medio es de 8%, y un porcentaje de finos medio de 29%.

#### *Pozos a Cielo Abierto*

Adicionalmente, para conocer con detalle la secuencia estratigráfica de los suelos superficiales se excavaron tres pozos a cielo abierto PCA-1 a PCA-3, llevados hasta una profundidad máxima de 3.00 m respecto al nivel de terreno actual, y de los cuales se obtuvieron muestras alteradas de los suelos representativos de los pozos y no se pudieron extraer muestras volumétricas.

La estratigrafía presenta uniformidad en los pozos PCA-2 y PCA-3, encontrándose prácticamente el mismo material en ellos, consistente en un arcilla café claro y café rojizo, firme a dura, hasta la máxima profundidad explorada, le sobreyace un limo arenoso y un arena limosa. El contenido natural de agua medio es de 10%. En el PCA-1 se detectó una arena limosa café claro, muy compacta a la cual le sobreyace un limo café claro.

Los materiales encontrados no tienen ni el volumen ni las características de permeabilidad que pudieran requerirse para ser utilizados como base de impermeabilización del relleno, por lo que esta condición podría lograrse mediante el empleo de un material geosintético que permita la

impermeabilización de los mismos. Las características completas de cada muestreo se presentan a continuación:

**POZO A CIELO ABIERTO PCA-1**

<b>Profundidad (m)</b>	<b>Descripción</b>
0.00 – 0.30	Limo café claro, con un contenido natural de agua de 7% y con un peso volumétrico $\gamma=1.73 \text{ t/m}^3$
0.30 – 2.00	Arena limosa café claro, compacta. El contenido natural de agua es de 2% y el porcentaje de finos de 10%, con un peso volumétrico $\gamma=2.10 \text{ t/m}^3$

**POZO A CIELO ABIERTO PCA-2**

<b>Profundidad (m)</b>	<b>Descripción</b>
0.00 – 0.30	Arena limosa café claro, con un contenido natural de agua de 2% y un porcentaje de finos de 34% y con un peso volumétrico $\gamma=2.2 \text{ t/m}^3$
0.30 – 2.00	Arcilla arenosa café claro, muy dura, con carbonato de calcio, el contenido natural de agua es de 10%, con un resistencia a la compresión simple $q_u=3.39 \text{ kg/cm}^2$ y con un peso volumétrico $\gamma=1.90 \text{ t/m}^3$ ; en pruebas de resistencia triaxial se obtuvo una cohesión $c=1.11 \text{ kg/cm}^2$ y un ángulo de fricción de $\phi=24^\circ$ .
2.00 – 3.00	Arena limosa café claro, muy compacta, con carbonato de calcio, el contenido natural de agua es de 4% y con un peso volumétrico $\gamma=2.2 \text{ t/m}^3$

**POZO A CIELO ABIERTO PCA-3**

<b>Profundidad (m)</b>	<b>Descripción</b>
0.00 – 0.20	Limo café claro, con un contenido natural de agua de 14%
0.20 – 2.00	Arcilla de alta plasticidad café rojizo, de consistencia firme, con contenido natural de agua de 10%, con un resistencia a la compresión simple $q_u=2.84 \text{ kg/cm}^2$ y con un peso volumétrico $\gamma=1.85 \text{ t/m}^3$ ; en ensayos de resistencia triaxial se obtuvo una cohesión $c=0.58 \text{ kg/cm}^2$ y un ángulo de fricción de $\phi=29^\circ$
2.00 – 3.00	Arena limosa gris verdoso, muy compacta, con un contenido natural de agua de 6% y un porcentaje de finos de 22% y con un peso volumétrico $\gamma=1.85 \text{ t/m}^3$ .

3.2.3.2 Capacidad de Carga

Para el cálculo de la capacidad de carga se consideraron las propiedades mecánicas correspondientes a la arena limosa muy compacta localizada por debajo de la capa arenosa de compactación encontrada superficialmente, sólo se considerara las propiedades cohesivas. Este material reúne las características de resistencia y compresibilidad adecuadas para el desplante del relleno sanitario, por lo cual deberá retirarse la capa de arena media localizada en la superficie.

La capacidad de carga admisible se determinó con la siguiente expresión:

$$q_a = \frac{cN_c}{FS} + p_v \dots\dots\dots Ec. (1)$$

Donde:

- $q_a$ : Capacidad de carga admisible
- $c$ : Cohesión del suelo
- $N_c$ : Factor de capacidad de carga, 5.7
- $D_f$ : Profundidad de desplante, m
- $FS$ : Factor de seguridad, 3
- $P_v$ : Presión vertical total a la profundidad de desplante

De acuerdo a los valores obtenidos para cada variable, la capacidad de carga obtenida es la siguiente:

$$q_a = 42 \text{ t/m}^2 \dots\dots\dots Ec. (2)$$

3.2.3.3 Capacidad del Relleno Sanitario

Tomando en cuenta que el peso volumétrico estimado de los depósitos puede llegar hasta  $PV=900 \text{ kg/m}^3$ , y considerando una altura unitaria, se tiene un esfuerzo inducido del relleno igual a:

$$E_i = h \times PV \dots\dots\dots Ec. (3)$$

Donde:

- $H$ : altura
- $PV$ : Peso Volumétrico

Entonces, la capacidad del relleno será de:

$$E_i = 1.0 \text{ m} \times 0.9 \text{ t/m}^3 = 0.9 \text{ t/m}^2$$

A fin de alcanzar un factor de seguridad mínimo de diseño ( $FS=q_a/E_i$ ) de 2.0, la altura máxima admisible del relleno (h) sería de:

$$h = \frac{q_a}{FS * PV} \dots \dots \dots \text{Ec. (4)}$$

Donde:

*h*: Altura

*q<sub>a</sub>*: Capacidad de carga

*FS*: Factor de seguridad

*PV*: Peso Volumétrico

$$h = \frac{42 \text{ ton/m}^2}{2.0 \times 0.9 \text{ ton/m}^3} = 23.0 \text{ m}$$

Bajo esta condición se asegura que el talud es estable puesto que la carga máxima esperada no rebasará a la capacidad de carga admisible.

#### 3.2.3.4 Análisis de Geología y Geotecnia del sitio

Se realizó un análisis respecto a la geología y geotecnia del suelo, con esto se logró determinar si el sitio donde se emplazará el relleno sanitario presentará problemas debido a las sobrecargas generadas por los residuos dispuestos a lo largo de la vida útil.

Respecto a la geología, se determinó que el tipo de roca que predomina en el Estado de Guerrero es de composición: sedimentaria (35.8%), metamórfica (28.62%) e ígnea (23.54%). Para el sitio donde se llevará a cabo el relleno sanitario se encontró que cuenta con rocas predominantes sedimentarias y de acuerdo a los análisis realizados se encontró que este tipo de rocas no presentan problemas en cuanto a sobre esfuerzos de importancia debido a cargas extremas.

Las características índice obtenidas en las diferentes muestras recuperadas de los pozos realizados se muestran gráficamente en el ANEXO 2, y se resume a continuación en la Tabla 2.

**Tabla 2      Resultados de pruebas índice**

Sondeo	Muestra	Prof m	ω %	Ss %	A %	F %	LI %	Lp %	Ip %	SUCS
SPT-1	M-2	0.90	5		50	50	39	12	27	CL
	M-4	2.00	16		28	72	37	12	25	CL
	M-5	2.60	12		95	5				
	M-8	4.40	13		93	7	43	13	30	CL
	M-12	6.75	12		89	11				
	M-14	7.95	13		75	35				
	M-15 y 16	8.80	12		74	26				
	M-17	9.75	13		55	45				
	M-18	10.35	17		69	31				
	M-19	11.50	21		69	31				
SPT-2	M-23	14.50	18		64	36				
	M-1	0.30	7		56	44				
	M-6 y 7	3.40	13		47	53				
	M-10	5.45	10		82	18				
	M-12	7.85	10		48	52				
SPT-3	M-13	8.45	11		78	22				
	M-1	0.30	7		57	43				
	M-2	0.80	5		57	43				
	M-3	1.40	6		65	35				
	M-5	2.45	4		88	12				
	M-6	4.25	13		72	28				
PCA-1	M-7	5.25	9		74	26				
PCA-2	M-2	1.15	2		91	9	43	18	25	CL
	M-1	0.15	1		66	34				
	M-2	1.10	10	2.44						
PCA-3	M-3	2.50	4		89	11				
	M-2	1.10	10	2.41			45	14	31	CL
	M-3	2.50	6		78	22				

ω    Contenido de agua	LI    Límite líquido
A    Arena	Lp    Límite plástico
F    Finos	Ip    índice plástico
Ss    Densidad de sólidos	SUCS    Sistema Unificado de clasificación Suelos



### 3.2.4 Estudio Geohidrológico (Consultores, 2008)

#### 3.2.4.1 Climatología

El clima en la región presenta en la parte alta del municipio un clima semicálido-subhúmedo, mientras que en la parte baja el cálido-subhúmedo. Los registros de las estaciones climatológicas: 00012011 Atoyac de Álvarez (SMN), 00012161 Atoyac, Atoyac (DGE) y 00012233 Técpan, Técpan de Galeana; que son las representativas de la zona de estudio muestran temperaturas medias anuales de 26.8°C; la temperatura media del mes más cálido es de 27.7°C y pertenece a mayo, siendo la temperatura máxima extrema de 42.5 °C registrada en mayo de 1979; el mes más frío es enero con temperaturas medias de 26.1°C, siendo la temperatura mínima extrema de 13.5 °C registrada en marzo de 1986. Se observa gran uniformidad en la temperatura media en la región, en donde se tiene una oscilación térmica media de 1.6 °C en un ciclo anual.

La precipitación total anual es de 1,199.2mm, con un valor medio anual de 99.9 mm; la temporada de lluvias va de junio a octubre, la precipitación media mensual más alta comúnmente se presenta en septiembre con una altura promedio de 328.5mm. Los meses más secos son de noviembre a abril, siendo febrero, marzo y abril los meses de menor precipitación con un promedio de 1.0 mm y múltiples registros sin lluvia. La evaporación total registra un valor medio anual de 1,696.65 mm, que es superior a la precipitación.

#### 3.2.4.2 Hidrografía

De acuerdo con la división hidrológica de la República Mexicana hecha por la extinta SARH, el municipio de Técpan de Galeana está incluido en la Región Hidrológica No. 19, Costa Grande, entre los ríos Técpan y Atoyac. En la actualidad la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha hecho una nueva división administrativa de las regiones hidrológicas, y en este caso le corresponde a la región en estudio ubicarse dentro de la Región IV, Pacífico Centro.

Los terrenos en que se ubicará el Relleno Sanitario se localizan en una pequeña cuenca propia con un área de 1.87 km<sup>2</sup> que escurre hacia las zonas de marismas del Estero Cucuyachero, el cual a su vez descarga al Río Técpan poco antes de su descarga al mar, en la Laguna de Bocachica. La distancia más próxima a la zona de marisma es de 1,100 m.

La distancia más próxima de este sitio al Río Técpan es de 7.6 km, se ubica sobre el puente de la carretera Acapulco-Zihuatanejo sobre la corriente. El origen del Río Técpan se halla en la Sierra Madre del Sur, a una altitud de 2,500 msnm en una corriente que baja de Norte a Sur llamada Arroyo Magueyes o Tepalcatepec, la que después de unos 25 km de recorrido cambia de dirección

hacia el Sureste. Entre sus afluentes se encuentran el Río Carrizal y los ríos Frío y Moreno, así como el Río Chiquito que viene desde el Cerro Naranjo, en el parteaguas de la Sierra Madre, y el Arroyo Ajuquiaque. El Río Técpan tiene una cuenca de captación de 1,363 km<sup>2</sup>, con un volumen escurrimiento medio de 1,094 millones de m<sup>3</sup>, y un gasto máximo de 1,034 m<sup>3</sup>/s, desemboca en la Laguna de Bocachica.

Respecto del Río Atoyac se encuentra a 12.5 km. Este sitio se ubica en el poblado de San Jerónimo, en el puente de la carretera Acapulco-Zihuatanejo sobre el Río Atoyac, Las corrientes formadoras del Río Atoyac son el Río Piloncillo, originado a unos 3,000 m de altitud y el Río Grande a 3,250 msnm, en la Sierra Madre del Sur. Los cuales descienden con dirección Suroeste hasta unirse en las proximidades de los poblados Valles y Camarón. Sus principales afluentes son el Arroyo Cacao, el Arroyo Mezcaltepec y el Arroyo Castillo. Esta corriente cruza primero la población de Atoyac de Álvarez y después por la de San Jerónimo. El río Atoyac es una corriente perenne con una cuenca de captación de 914 km<sup>2</sup>, presenta un escurrimiento medio anual de 835.6 millones de m<sup>3</sup>; la avenida máxima registró un gasto de 473 m<sup>3</sup>/s, su desembocadura se encuentra en el Océano Pacífico.

El aprovechamiento de agua subterránea más próximo al sitio consiste en una noria ubicada en el Rancho El Jovero, la distancia a este sitio es de 250 m, por lo tanto cumple con la recomendación de que, la distancia del Relleno Sanitario a pozos para extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero debe ser por lo menos de 100m.

En conclusión, se puede destacar que el sitio se localiza fuera de zonas de inundación, tampoco se ubica en zonas de pantanos o marismas, la distancia de ubicación del sitio, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, cumple sobradamente con la restricción de que esta distancia no debe ser menor de 500m al sitio que fungirá como relleno sanitario.

### 3.3 Tipos de Relleno Sanitario

El diseño y el dimensionamiento del relleno sanitario son fundamentales para la realización del proyecto ejecutivo. En este punto se presentará la información básica para la construcción de un relleno sanitario, este se verá condicionado por las condiciones topográficas, geológicas y geotécnicas; es por ello que dependiendo de estas, se tendrán alternativas de solución para cada sitio. Es en este punto donde la ingeniería básica juega un papel muy importante.

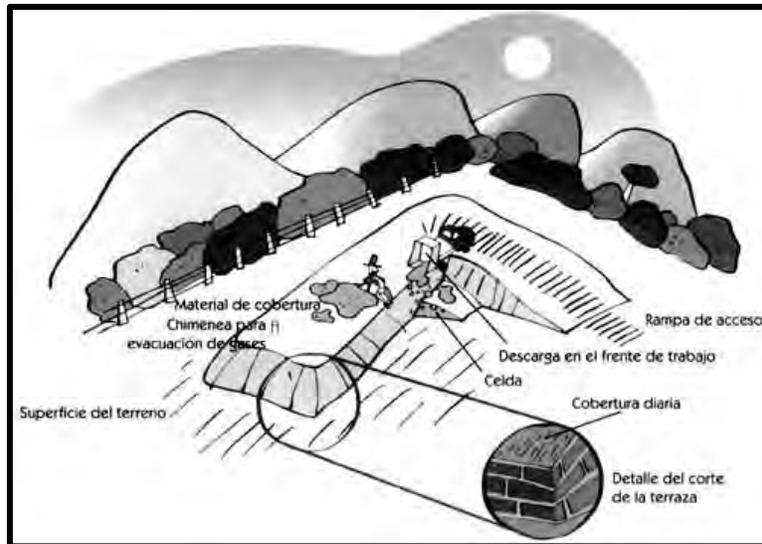
Los tipos de relleno sanitario de uso común son básicamente de dos tipos (área y trinchera), un tercer tipo que formará parte de una combinación de los otros dos.

#### 3.3.1 Método de área

Este método constructivo consiste básicamente en la formación de las celdas de residuos sobre el terreno natural debido a la imposibilidad de realizar excavaciones por las características del sitio, generalmente esto se debe a mantos freáticos cerca a la superficie. El material de cubierta se obtendrá de laderas en caso de encontrarse en una depresión o de lo contrario, de bancos de materiales cercanos al sitio.

Otra forma de realizar este método se realiza cuando existan depresiones naturales o canteras abandonadas de algunos metros de profundidad, teniendo en cuenta para esta opción la aportación de aguas que puedan llegar a provocar inundaciones al sitio. La operación de descarga y construcción de las celdas debe iniciarse desde el fondo hacia arriba.

El relleno se construye apoyando las celdas en la pendiente natural del terreno, es decir, los residuos se colocan en la base del talud, se extiende y se compacta para posteriormente cubrir dichos residuos de forma diaria con una capa de tierra de 0.10 a 0.20m de espesor; continuando la operación avanzando sobre el terreno, conservando una pendiente suave. En la Figura 3 se muestra un ejemplo del método de área.



**Figura 3 Construcción de Relleno Sanitario “Método de Área”**  
 FUENTE: Tomada de (Jaramillo, 2002)

### 3.3.2 Método de Trinchera o Zanja

Consiste en excavar el terreno natural para aprovechar al máximo el espacio disponible, para esto se debe de realizar un estudio de mecánica de suelos y geología para determinar el tipo de suelo que se tiene, su capacidad de carga y la profundidad del manto freático para así evitar una posible contaminación potencial del agua subterránea. Regularmente las pendientes que deben tener este tipo de sitios es de 2:1 y el material de cubierta se toma de la misma excavación.

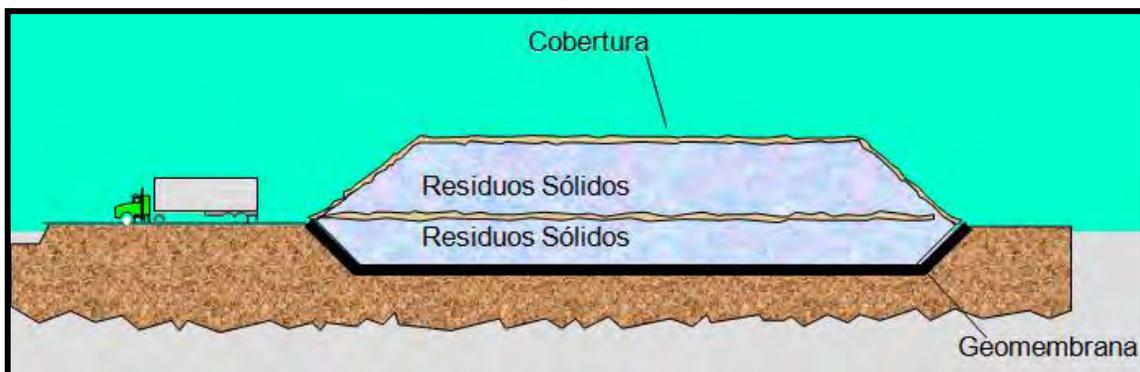
La excavación de zanjas exige condiciones favorables tanto en lo que respecta a la profundidad del nivel freático como al tipo de suelo. Los terrenos con nivel freático alto o muy próximo a la superficie del suelo no son apropiados por el riesgo de contaminar el acuífero. Los terrenos rocosos tampoco lo son debido a las dificultades de excavación. La **Figura 4** muestra un ejemplo del método de trinchera.



**Figura 4 Construcción del Relleno Sanitario “Método de Trinchera”**  
FUENTE: Tomada de (Conama, 2005)

### 3.3.3 Método combinado

El tercer y último método de construcción es el llamado “método combinado”. Este consiste en aprovechar al máximo la capacidad del sitio ya que se obtiene un volumen mayor que se pudiera tener en cualquiera de los dos métodos descritos anteriormente, teniendo como resultado una mayor vida útil (Jaramillo, 2002). El método combinado es que actualmente se utiliza más en distintos Estados de nuestro país y en el resto del mundo debido a que existe un ahorro el transporte del material de cubierta. La Figura 5 muestra un ejemplo del método combinado.



**Figura 5 Construcción del Relleno Sanitario “Método Combinado”**

#### 3.3.4 Método Seleccionado para el Relleno Sanitario Intermunicipal

El método constructivo y la secuencia de operación del relleno sanitario en cuestión, estuvieron determinados primordialmente por la topografía y los resultados de los estudios de mecánica de suelos del terreno (Ver ANEXO 2). En base a lo anterior y revisando las condiciones naturales del terreno seleccionado, se realizará la construcción de las celdas utilizando el método de área. Esto se debe a las recomendaciones dadas a partir del estudio de mecánica de suelos el cual indicaba que no debe excavarse más allá de 2m de profundidad por las condiciones estratigráficas que presentaba el sitio, estas indicaban que hasta esta profundidad se tenía una alta capacidad de carga y una moderada susceptibilidad de presentar asentamientos de consideración; aunado a esto, resultaría más costoso realizar las excavaciones para aprovechar el predio y aumentar su vida útil, esto originado a que de acuerdo a los resultados de los estudios se encontraron formaciones rocosas de manera aleatoria durante los muestreos de campo.

El sitio seleccionado es de planta rectangular, con una superficie aproximada de 11.13 hectáreas. Debido a que dentro del predio se encuentra una formación rocosa (cerro) que limitará el espacio en el cual se dispondrán dichos residuos, es por ello que la construcción del relleno se realizará de forma vertical y no horizontal como frecuentemente se realiza.

Las celdas de disposición quedarán desplantadas sobre la arena limosa muy compacta localizada a partir de una profundidad que varía de 0.60 a 2.0 m, teniendo un contenido de humedad promedio de 15% con permeabilidad estimada de  $1 \times 10^{-3}$  cm/seg. La altura máxima que alcanzará dicho relleno será de 16m, esto a pesar de que dentro de los resultados de geotecnia indicaban que este podría alcanzar hasta los 23m de altura. Las condiciones limitantes fueron, las dimensiones del predio y el cerro que se encuentra dentro de este que limitan de manera importante la forma de construcción del sitio de disposición final.

La continuidad de la geomembrana en pisos y taludes de las celdas, y cárcamos de lixiviados se logra haciendo un traslape de 20cm de ancho mínimo entre lienzos de geomembranas, las uniones entre las láminas de geomembrana se realizarán mediante cualquiera de las técnicas empleadas en la actualidad para tal fin: termofusión o extrusión. Los cárcamos de recolección de lixiviados se ubicarán en el extremo de las celdas al pie del talud, en el extremo más bajo.

### 3.4 Métodos de Generación de Lixiviados

#### 3.4.1 Modelo de Tchobanoglous (Tchobanoglous, y otros, 1993)

Este método tiene una gran certeza en cuanto a la estimación de formación de lixiviados, considera una gran cantidad de conceptos que otros métodos no hacen, resultando de gran interés realizar la predicción. Dentro de los factores que toma en cuenta y que superan otros métodos son:

En cuanto a los residuos se requieren datos sobre la altura que tendrán estos por celdas, el peso volumétrico de estos así como su peso al final de cada año. Respecto al suelo, requiere de la altura del material de cubierta, peso volumétrico del suelo y de la misma forma el peso que tendrá este al final de cada año. En cuestión de infiltración, el método de Tchobanoglous realiza el mismo procedimiento que el empleado por Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), considerando solamente una parte de este método; posteriormente es necesario tomar en cuenta la cantidad de agua que ocupará un  $m^2$ , su peso volumétrico y el peso de esta por año.

En cuanto a las características del biogás, se considerará la tasa de producción anual, producción, peso volumétrico del biogás, peso del gas que estará en función de la producción de este así como de su peso volumétrico, agua consumida en la producción de este así como la cantidad de vapor de agua que se desprende junto con el biogás a la atmósfera.

Los factores que estarán en mayor medida involucrados en la generación de lixiviados son: contenido de humedad de los residuos, peso de los residuos en base seca, humedad total, capacidad de campo, lixiviado, agua que permanece remanente en los residuos y el área que se ocupa por año.

Todos estos factores forman una parte fundamental para la determinación exacta de lixiviados y así poder tomar en cuenta todos los factores para su extracción, recirculación, tratamiento entre otros factores.

#### 3.4.2 Método de Thornthwaite y Mather (Thornthwaite, y otros, 1979)

Este fue desarrollado a partir de datos de precipitación y esorrentía para diversas cuencas de drenaje. El resultado es básicamente una relación empírica entre la ETP y la temperatura del aire. A pesar de la simplicidad y las limitaciones obvias del método, funciona bien para las regiones húmedas. No es necesariamente el método más exacto ni tampoco el que tiene las bases teóricas más profundas. Por el contrario, probablemente esas características corresponden a aquellas que

involucran flujo de vapor y balance de calor. Entre las diferencias más notorias del método de Thornthwaite se encuentra la suposición de que existe una alta correlación entre la temperatura y algunos de los otros parámetros pertinentes tales como radiación, humedad atmosférica y viento. Mientras que tales limitaciones pueden ser poco importantes bajo ciertas condiciones, a veces pueden resultar relevantes.

El método puede utilizarse para estimar la infiltración neta, la cual puede definirse como la cantidad de agua que anualmente percola por la zona no saturada hacia el acuífero, previa deducción de la porción de agua que escurre superficialmente y la que se evapotranspira. La infiltración neta aproximadamente se corresponde con el total de la recarga subterránea.

La metodología de Thornthwaite y Mather contempla la estimación de la evapotranspiración mensual y el escurrimiento superficial mensual puede estimarse aplicando el método de la Curva Número del Servicio de Conservación de Suelos.

Thornthwaite y Mather, quienes conocieran que la radiación solar y la turbulencia atmosférica son factores de importancia en la ETR, han establecido que el problema de desarrollar una fórmula para la ETP permanece aún sin resolver. Los métodos que incluyen flujo de vapor y balance de calor requieren datos meteorológicos que, o no son medidos o son observados en pocos puntos, muy espaciados. Por el contrario, la fórmula empírica de Thornthwaite puede ser usada para cualquier zona en la cual se registran la Temperatura máxima y Temperatura mínima diarias.

La formula de Thornthwaite es la siguiente:

$$ETP = 16 \left( \frac{10T}{I} \right)^a \dots \dots \dots Ec. (5)$$

Donde:

ETP: evapotranspiración en mm.

I: índice calórico, constante para la región dada y es la suma de 12 índices mensuales  $i$ , donde

$i$  es función de la temperatura media normal mensual  $\left[ i: \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514} \right]$

T: temperatura media mensual (no normal) en °C

a: exponente empírico, función de I

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1792 \times 10^{-5} I + 0.49239 \dots \dots \dots Ec. (6)$$

## 3.5 Métodos de generación de Biogás

### 3.5.1 Método de Tchobanoglous

Este procedimiento consiste básicamente en tomar la fracción de los residuos que se descomponen de forma rápida y lenta. A cada una de estas fracciones se les considera su contenido de humedad y porcentaje en peso seco (consideraciones que no se toman en otro método de predicción), para con estos pesos, poder determinar la composición de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y cenizas de cada elemento. Con la composición en kg de cada uno de estos elementos y con los pesos moleculares de cada uno de los elementos químicos se procede a obtener su peso molar para así llegar a obtener su fórmula química.

Posteriormente con esta fórmula aproximada se procede a estimar los volúmenes que se generarán de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . Así mismo se obtendrá la cantidad de agua consumida en la formación del biogás así como la pérdida de agua en forma de vapor.

Para estimar la cantidad de biogás generado, este método se basa en un modelo triangular el cual supone que la tasa máxima de producción se lleva a cabo al final del primer año y esta decrece conforme se va acercando al final de la vida útil del sitio, esto se toma en cuenta para la fracción orgánica rápidamente degradable; para el caso de la materia lentamente degradable, también se basa en un modelo triangular pero con la diferencia de que el tiempo de descomposición empieza a partir del primer año de clausura del sitio teniendo como horizonte 20 años para su degradación completa.

### 3.5.2 Modelo EPA (EPA, 2000)

Este modelo toma en consideración un balance estequiométrico el cual se basa a diferencia del modelo de Tchobanoglous, en que considera la fracción rápida, media y lentamente degradables; toma en cuenta el contenido de humedad de los residuos para con esto obtener la cantidad de materia orgánica en base seca; posteriormente se toma en cuenta la descomposición de los productos en base seca, esto se realiza teniendo la suma de los porcentajes correspondientes a la fracción orgánica, también se toma en cuenta que solo el 75% de los residuos provenientes de jardinería se descomponen y que el 5% del contenido de la materia permanece como ceniza.

Considerando que los residuos orgánicos en cuestión son los principales formadores del metano y dióxido de carbono, de estudios efectuados en zonas cercanas se obtuvieron los porcentajes de humedad de cada uno de los siguientes elementos: *C H O N S*.

Con los datos obtenidos anteriormente se puede determinar la fórmula aproximada para la formación de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> distinta que el método presentado anteriormente. Con la obtención de la fórmula se procede a determinar la cantidad en peso y volumen de metano y dióxido de carbono.

Para la obtención de la producción de biogás se toma en cuenta la siguiente expresión en la cual se basa este modelo:

$$Q = 2L_o R [e^{-kc} - e^{-kt}] \dots \dots \dots Ec. (7)$$

Donde:

Q = Tasa de generación de biogás en el tiempo, en m<sup>3</sup>/año.

Lo = Capacidad potencial de residuos sólidos para generar metano, en m<sup>3</sup>/ton.

R = Tasa de aceptación promedio de residuos sólidos durante la vida activa del sitio de disposición final, en ton/año.

k = Tasa de generación de metano, se supone constante, en año<sup>-1</sup>.

c = Tiempo desde la clausura del sitio de disposición final, en años.

t = tiempo desde el inicio de disposición de residuos sólidos en el sitio, en años.

## 3.6 Planeación del proyecto

### 3.6.1 Proyección de Población

Debido a que las proyecciones tanto de generación como de población son parte fundamental en el diseño de un relleno sanitario, debe de prestar especial atención. En este caso, la proyección de población a lo largo de la vida útil del sitio.

La proyección de población de los tres municipios en estudio se realizó tomando en cuenta las proyecciones realizadas por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), estas serán como un instrumento indispensable para calcular los requerimientos futuros.

Para alcanzar un mayor grado de certeza con respecto a la proyección demográfica, estas requieren estar actualizadas a medida de que surgen evidencia acerca de los niveles y tendencias

de los factores de cambio demográfico. Las proyecciones de población que se presentan en este documento están basadas en los resultados definitivos del II Censo de Población y Vivienda 2005 del INEGI.

Las proyecciones se elaboraron con el método de “componentes demográficos”. En este procedimiento, primero se establecen las premisas sobre el futuro comportamiento de los factores de cambio demográfico (fecundidad, mortalidad y migración); después se aplican esas previsiones a la población base (inicial), de tal manera que los sobrevivientes durante cada año de la proyección se van reproduciendo para generar nuevas cohortes que se incorporan a la población residente. En la Tabla 6 se presenta la proyección de población para los tres municipios durante el horizonte del proyecto.

**Tabla 6 Proyección de Población para el Horizonte del Proyecto**

	<b>Atoyac</b>	<b>Benito Juárez</b>	<b>Técpán de Galeana</b>	<b>Total</b>
2008	56,566	13,873	56,418	126,857
2009	55,951	13,688	55,949	125,588
2010	55,343	13,505	55,484	124,332
2011	54,741	13,325	55,023	123,089
2012	54,146	13,147	54,565	121,858
2013	53,557	12,972	54,112	120,640
2014	52,975	12,798	53,662	119,435
2015	52,399	12,628	53,216	118,242
2016	51,829	12,459	52,774	117,062
2017	51,266	12,293	52,335	115,893
2018	50,708	12,128	51,900	114,737
2019	50,157	11,967	51,469	113,592

Fuente: Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2008)

### 3.6.2 Producción de Residuos Sólidos

La proyección de la generación de los residuos sólidos durante el horizonte de proyecto (12 años), proporcionará la información sobre la demanda del servicio que se tendrá así como saber si el sitio de disposición final seleccionado cubrirá la demanda de residuos. Para determinar la cantidad de dichos residuos fue necesario realizar estudios de generación en los tres municipios, obteniendo con esto la generación por habitante al día así como una clasificación de subproductos para con ello, en un futuro, poder integrarlos a un programa de reciclaje. En la Tabla 7 se presenta la proyección de generación de residuos por día para el horizonte del proyecto.

**Tabla 7 Proyección de Residuos Generados por día**

	<b>Atoyac (Ton/día)</b>	<b>Benito Juárez (Ton/día)</b>	<b>Técpan de Galeana (Ton/día)</b>	<b>Total (Ton/día)</b>
2008	31.22	7.63	31.09	69.94
2009	31.35	7.64	31.29	70.28
2010	31.47	7.65	31.50	70.62
2011	31.60	7.66	31.70	70.96
2012	31.72	7.67	31.91	71.31
2013	31.85	7.69	32.12	71.65
2014	31.97	7.70	32.33	72.00
2015	32.10	7.71	32.54	72.35
2016	32.23	7.72	32.76	72.70
2017	32.36	7.73	32.97	73.06
2018	32.48	7.74	33.19	73.41
2019	32.61	7.75	33.41	73.77

En la Tabla 8. Se muestra la proyección de la generación de residuos por año considerando la cobertura del servicio por municipio.

**Tabla 8 Proyección de Residuos por año**

	<b>Atoyac (Ton/año)</b>	<b>Benito Juárez (Ton/año)</b>	<b>Técpan de Galeana (Ton/año)</b>	<b>Total (Ton/año)</b>
2008	7,084	2,228	6,698	16,010
2009	7,521	2,231	7,221	16,973
2010	7,960	2,234	7,750	17,945
2011	8,403	2,238	8,286	18,928
2012	8,850	2,241	8,829	19,920
2013	9,300	2,244	9,379	20,923
2014	9,337	2,247	9,441	21,025
2015	9,374	2,251	9,503	21,127
2016	9,411	2,254	9,565	21,230
2017	9,448	2,257	9,628	21,333
2018	9,485	2,261	9,691	21,437
2019	9,523	2,264	9,755	21,541

---

## 4 PROYECTO DEL RELLENO SANITARIO INTERMUNICIPAL

---

Para la elaboración del proyecto del relleno sanitario es necesario conocer además de la cantidad de residuos a disponer durante el horizonte del proyecto, la capacidad volumétrica del sitio de acuerdo con los métodos de constructivos; con esto se podrá determinar la vida útil del sitio, el dimensionamiento de la celda diaria (sí como el número de celdas por etapa), la calendarización para el llenado de celdas, producción de lixiviados y biogás, entres otros factores que a continuación se describirán.

### 4.1 Requerimientos Volumétricos del Sitio

El peso volumétrico es de gran importancia debido a que este dato sirve de base para proyectar las necesidades de espacio para el diseño del relleno sanitario, además de ser de ayuda para determinar el número de unidades para el transporte en función de la capacidad de éstas. El peso volumétrico de los residuos sólidos en promedio esta en los  $250 \text{ kg/m}^3$ , este peso aumenta al ser compactados en el relleno sanitario. En este caso se considerará un peso volumétrico de  $600 \text{ kg/m}^3$  de basura compactada considerando que el equipo a utilizar es 1 Tractor de cadenas D6 y un cargador frontal tipo CAT-950. El material de cobertura se estima de acuerdo con el espesor de la capa de cubierta diaria, que si bien se puede cubicar fácilmente, para efectos prácticos conviene determinar su valor como un porcentaje de la cantidad de los residuos por cubrir. En este proyecto se utilizará 20cm en volumen de material de cobertura.

En la Tabla 1 se muestra el volumen de residuos y de material de cobertura que se espera recibir para cada uno de los años de vida útil del relleno, considerando los municipios de Atoyac de Álvarez, Benito Juárez y Técpan de Galeana como aportadores de residuos al relleno. El incremento en la generación de RSU se considero de 1.5% anual (INE, 1997) de acuerdo a estudios realizados a nivel nacional en nuestro país, este incremento considera tanto generación domiciliaria como la originada en otras fuentes tales como comercios, hospitales, industrias, barrido en vías públicas, etc. La cobertura del servicio de recolección para los municipios es del 67%, que es muy baja y que se pretende aumente al 80% cuando mínimo para el año 2013. Los residuos ingresados a lo largo de cada año se obtienen del volumen ocupado por las celdas sin considerar el material de cubierta que habrá de emplearse en dichas celdas.

**Tabla 1 Volumen Total de Residuos y Cubierta a 14 años**

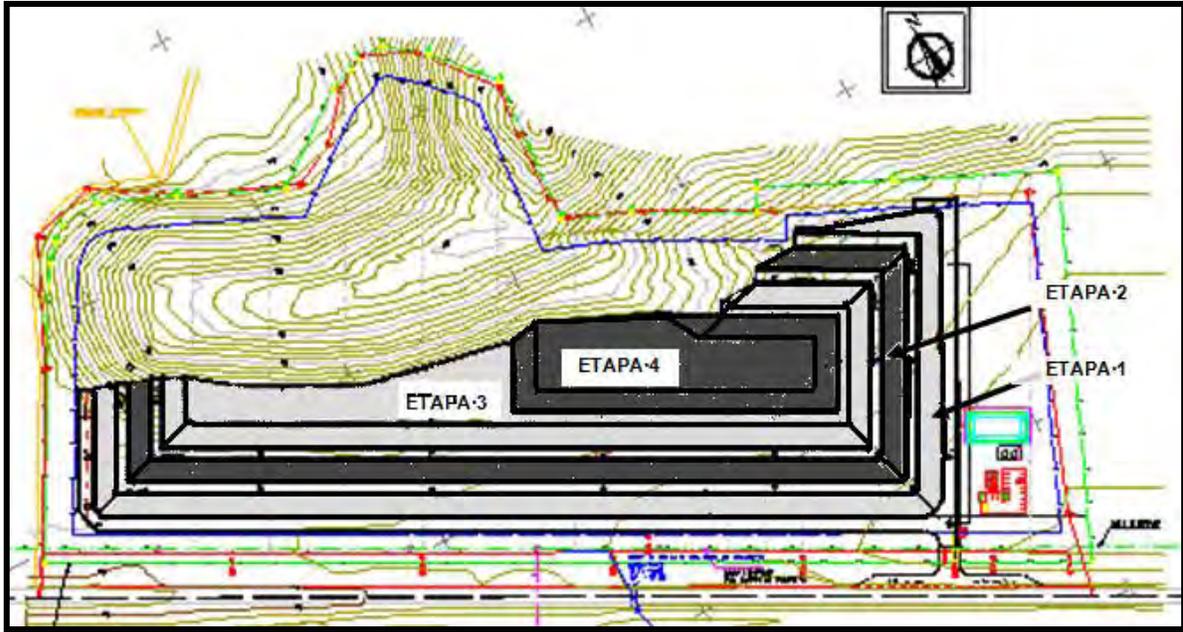
	Población	Residuos (kg/día)	Cobertura	Residuos (Ton/año)	Residuos Ingresados (m <sup>3</sup> /año)	Cubierta (m <sup>3</sup> /año)	Volumen (m <sup>3</sup> )
2008	126,857	69,940.83	0.67				
2009	125,588	70,279.73	0.70	17,866.86	29,778.10	5,955.62	35,733.72
2010	124,332	70,620.48	0.72	18,620.41	31,034.02	6,206.80	37,240.82
2011	123,089	70,963.08	0.75	19,380.90	32,301.50	6,460.30	38,761.80
2012	121,858	71,307.55	0.77	20,148.39	33,580.65	6,716.13	40,296.78
2013	120,640	71,653.90	0.80	20,922.94	34,871.56	6,974.31	41,845.87
2014	119,435	72,002.14	0.80	21,024.62	35,041.04	7,008.21	42,049.25
2015	118,242	72,352.28	0.80	21,126.86	35,211.44	7,042.29	42,253.73
2016	117,062	72,704.33	0.80	21,229.66	35,382.77	7,076.55	42,459.32
2017	115,893	73,058.30	0.80	21,333.02	35,555.04	7,111.01	42,666.05
2018	114,737	73,414.21	0.80	21,436.95	35,728.25	7,145.65	42,873.90
2019	113,592	73,772.06	0.80	21,541.44	35,902.40	7,180.48	43,082.88

Como se mencionó anteriormente, el método de operación del relleno sanitario se hará mediante el método de área según las características del sitio. En la Tabla 2 se resume la capacidad volumétrica por cada etapa.

**Tabla 2 Capacidad Volumétrica en el método de área**

Etapa	Área promedio m <sup>2</sup>	Volumen m <sup>3</sup>	Volumen acumulado m <sup>3</sup>
1	39,840.50	159,362.00	159,362.00
2	28,171.00	112,684.00	272,046.00
3	17,885.00	71,540.00	343,586.00
4	6,615.00	26,460.00	370,046.00

En la Figura 1 se presenta la configuración de las etapas del relleno sanitario en el horizonte del proyecto.



**Figura 1** Etapas del Relleno Sanitario en el horizonte del proyecto (Vista en Planta)

Resumiendo lo anterior, tenemos que la capacidad volumétrica que se tiene en el Relleno por el método de área será de 370,046.00m<sup>3</sup>.

Con la capacidad total de terreno incluyendo el material de cubierta; se determinó que el terreno tiene una capacidad para captar los residuos durante un periodo de aproximadamente 12 años considerando los municipios de Atoyac de Álvarez, Benito Juárez y Técpan de Galeana como aportadores de residuos; basados en el supuesto de que los servicios de recolección cumplirán con las metas de cobertura propuesta en el capítulo de mejora y que de no ser así se incrementaría la vida útil.

#### 4.2 Dimensionamiento de la Celda Diaria

Para poder conocer las dimensiones que tendrá la celda diaria es necesario primero conocer otros valores como: los residuos generados, la cobertura que se tendrá durante el horizonte del proyecto, compactación que deberán de tener los residuos y la cobertura que llevarán dichos residuos al final de cada día; con estos datos se podrá conocer el volumen diario de residuos.

**Ahora para saber las dimensiones que tendrá dicha celda será necesario determinar el número de vehículos que se tendrán en la hora pico, el ancho de dichos vehículos y el tiempo de descarga de estos. En la**

Tabla 3 se presentan los cálculos para la determinación del volumen diario.

**Tabla 3 Volumen Diario de Residuos Sólidos en los tres municipios**

Población	Residuos Generados Actualmente Ton/día	Residuos Generados Ton/día	Cobertura %	Residuos Dispuestos Ton/día	Compactación Kg/m <sup>3</sup>	Volumen de Residuos m <sup>3</sup> /día	Relación S/R	Volumen de Cubierta m <sup>3</sup> /día	Volumen Diario m <sup>3</sup> /día
Atoyac de Álvarez	31.22	32.11	76.51%	24.56	600.00	40.94	0.200	8.19	49.13
Benito Juárez	7.63	7.71	80.00%	6.17	600.00	10.28	0.200	2.06	12.33
Técpan de Galeana	31.09	32.56	75.96%	24.73	600.00	41.22	0.200	8.24	49.46
								18.49	110.92

Ahora para poder determinar las dimensiones de la celda diaria como se mencionó anteriormente, es necesario conocer el número de vehículos, este número se obtuvo de los estudios diagnóstico que se realizaron en los tres municipios en cuestión (7 volteos y 4 compactadores de carga trasera); el tiempo de descarga que se considera para estos vehículos es de 5 min y su ancho de 3m; con estos datos y con el volumen generado diariamente se puede estimar dichas dimensiones las cuales se presentan en la Tabla 4:

**Tabla 4 Dimensiones de la Celda Diaria**

Etapas	Ancho m	Largo m	Alto m	Volumen 1 m <sup>3</sup>	Volumen 2 m <sup>3</sup>	Volumen 3 m <sup>3</sup>	Volumen Total m <sup>3</sup>
Celda Diaria	6.00	4.03	1.90	32.49	45.94	32.49	110.92

#### 4.2.1 Cobertura de la celda diaria

El material de cubierta a base de tierra común tendrá las siguientes funciones: impedir la entrada, salida y proliferación de fauna nociva, reducir los malos olores y ayudar al control de incendios así como también evitar la entrada de agua a la masa de residuos. La aplicación diaria de la cubierta

reduce gradualmente la atracción de los desechos sobre las aves y los roedores en busca de alimento y es esencial para mantener una buena apariencia del relleno sanitario.

Muchos tipos de suelo cuando están debidamente compactados muestran baja permeabilidad, no se contraen y pueden ser usados para poder controlar el agua que pudiera entrar al relleno e incrementar el volumen de lixiviado.

El control de la emanación de gases es también una función esencial del material de cubierta. Dependiendo de la profundidad planeada para el terreno recuperado por el relleno, los gases pueden ser bloqueados o ventilados a través del material de cubierta. Un suelo permeable que no tenga mucha agua puede servir como un buen material para ventilar los gases.

El cubrir los desechos también evita los riesgos de incendio de los residuos. Casi todos los suelos son incombustibles por lo que la cubierta y los taludes de cada una de las celdas del relleno ayudan a evitar que los residuos puedan ser consumidos por el fuego.

La celda diaria los residuos deberán cubrirse con tierra compactada, tanto en la superficie como en los taludes, de tal manera que al final del día no quede residuos sin tapar.

En la Tabla 5 se muestran los volúmenes de material de cubierta calculado para el año 2008 y posterior, hasta el 2019. Los volúmenes se expresan en: Volumen de material de cubierta por celda diaria, volumen anual y volumen total acumulado.

**Tabla 5 Cálculo del Volumen necesario de Material de Cobertura**

<b>Año</b>	<b>Volumen de material de cubierta por celda diaria m<sup>3</sup></b>	<b>Volumen anual necesario m<sup>3</sup></b>	<b>Volumen total acumulado m<sup>3</sup></b>
2008			
2009	15.50	4,650.05	4650.05
2010	16.39	4,916.48	9,566.53
2011	17.29	5,185.65	14,752.18

Tabla 20 Cálculo del Volumen necesario de material de cobertura “Continuación”

Año	Volumen de material de cubierta por celda diaria m <sup>3</sup>	Volumen anual necesario m <sup>3</sup>	Volumen total acumulado m <sup>3</sup>
2012	18.19	5,457.59	20,209.77
2013	19.11	5,732.31	25,942.08
2014	19.20	5,760.17	31,702.25
2015	19.29	5,788.18	37,490.43
2016	19.39	5,816.35	43,306.78
2017	19.48	5,844.66	49,151.44
2018	19.58	5,873.14	55,024.58
2019	19.67	5,901.76	60,926.34

El material que se empleará para cubierta, se obtendrá de un banco de materiales que está en el municipio de Benito Juárez (uno de los tres municipios de estudio), se midieron los volúmenes aproximados con la ayuda de un GPS y otras herramientas para poder determinar si el sitio tendría los volúmenes requeridos en el relleno sanitario. Con base en lo anterior, se obtuvo un volumen aproximado de 75,000m<sup>3</sup> lo cual será suficiente para abastecer de este material al relleno sanitario durante su vida útil.

Además de satisfacer los volúmenes necesarios, se realizaron pruebas de laboratorio para determinar si este material cumplía con las características que la norma pide. Las pruebas fueron efectuadas en dos condiciones: estado natural y estado compactado. Para esta última condición se efectuaron pruebas de compactación Proctor estándar al 95%, asumiendo que el material podría ser colocado bajo estas características de compactación.

Los resultados de las pruebas de permeabilidad, efectuadas en el permeámetro de carga variable, para las dos condiciones mostradas se presentan la Tabla 6 .

**Tabla 6 Resultados de permeabilidad del material**

	Material en estado natural	Material compactado al 95%
Ensaye 1	4.94x10 <sup>-8</sup> cm/seg	4.36x10 <sup>-10</sup> cm/seg
Ensaye 2	4.90x10 <sup>-08</sup> cm/seg	5.18x10 <sup>-09</sup> cm/seg
Ensaye 3	4.92x10 <sup>-07</sup> cm/seg	

Fuente: Grupo de Ingeniería OPALO (Couttolenc, 2008)

Como resultado de las pruebas, se determino que el material ubicado en el municipio de Benito Juárez, Gro., proporciona las condiciones de permeabilidad exigidas por la norma, al menos de  $1 \times 10^{-07}$  cm/seg.

### 4.3 Cálculo de la Vida Útil del Sitio

El cálculo de la vida útil del sitio deberá obtenerse por medio de la capacidad volumétrica total del sitio, la cantidad de residuos a disponer y el volumen de material de cubierta requerida.

La capacidad volumétrica total del sitio según los cálculos realizados en la tabla 10, es de  $370,046 \text{ m}^3$ , mientras que la cantidad de residuos a disponer en conjunto con el volumen del material de cubierta es en promedio de  $103 \text{ m}^3/\text{día}$ , entonces la vida útil del sitio se puede obtener de:

$$U = \frac{V}{300 * G_t} \dots \dots \dots \text{Ec. (8)}$$

Donde:

U: Vida útil

V. Capacidad volumétrica total

G<sub>t</sub>: Volumen de material de cubierta

$$U = \frac{370,049 \text{ m}^3}{300 \text{ días} \times 103 \text{ m}^3} = 12 \text{ años}$$

### 4.4 Calendarización de la Vida Útil del Sitio

Para poder conocer los tiempos en los cuales se irán llenando las celdas por etapa, se puede obtener mediante el volumen que se tendrá en cada etapa del sitio (en este caso serán cuatro etapas), entre los volúmenes por año que se tendrán de residuos a disponer a lo largo de la vida útil. Esto se puede ver resumido en la Tabla 7 presentada a continuación.

**Tabla 7 Vida útil de cada etapa**

Etapa		Área m <sup>2</sup>	Alto m	Volumen m <sup>3</sup>	Duración años
Etapa I	Inferior	43,888.00	4.0	159,362	5.4
	Superior	35,793.00			
Etapa II	Inferior	31,857.00	4.0	112,684	3.5
	Superior	24,485.00			
Etapa III	Inferior	21,049.00	4.0	71,540	2.2
	Superior	14,721.00			
Etapa IV	Inferior	8,473.00	4.0	26,460	0.9
	Superior	4,757.00			

#### 4.4.1 Secuencia de Llenado de Celdas

La secuencia de operación consistirá en la habilitación de celdas desde 0.6 a 4 hectáreas aproximadamente, donde se depositarían los residuos sólidos en sub-celdas que van desde 0.6-1.2 ha. Parte de la lluvia que cae sobre la celda se evapora en proporción a la temperatura y el viento, y el balance se infiltra en esta área, contribuyendo a producir lixiviados. En el balance de la celda donde no se depositan residuos sólidos, se construyen zanjas temporáneas para captar y acarrear la escorrentía que no se infiltra.

Luego que la primera celda está a punto de llenarse, se comienza a abrir una segunda celda, para cerrar la primera y minimizar la infiltración y producción de lixiviados. De este modo, se mantiene solamente una celda abierta. En la primera celda ya cerrada, la infiltración de lluvia se minimiza cubriendo la celda con arcilla. Los lixiviados generados en la primera celda se limitan a los resultantes de la descomposición de la materia orgánica en los desperdicios sólidos, que van reduciéndose con el tiempo. A medida que se avanza en el uso del relleno sanitario, la producción de lixiviados aumenta debido a la combinación de la infiltración de la celda abierta y el residual por descomposición de las celdas cerradas. El punto de mayor producción de lixiviados ocurre cuando la última celda está abierta y las demás cerradas. Luego que se cierra la última celda, la producción de lixiviados comienza a mermar rápidamente.

#### 4.4.2 Volumen de lixiviado y método de manejo

Luego de determinar la generación máxima para el relleno sanitario, se procede a determinar el volumen de almacenaje para los lixiviados. El volumen de almacenaje necesario está directamente relacionado al método de operación del relleno sanitario y manejo de los lixiviados. Es decir, dependiendo de la estrategia de manejo de los lixiviados, podría variar el volumen requerido de almacenaje. Alternativas disponibles para el manejo de lixiviados son: recirculación, solidificación,

evaporación y descarga a planta de tratamiento de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (AAA).

La recirculación consistiría en infiltrar el lixiviado mediante una tubería vertical (inyectando el lixiviado que será suministrado de un tanque de almacenamiento) sobre la cubierta diaria de los residuos sólidos mediante tuberías horizontales que aumentan la tasa de evaporación.

En el análisis aquí presentado, se utiliza la alternativa de recirculación y evaporación como criterio de diseño, con esto se flexibilizará el manejo de los lixiviados y reducir la cantidad de almacenaje necesario para los lixiviados.

Para determinar la cantidad de almacenaje óptimo, se realizó un balance de masa anual por un periodo de 18 años (6,570 días). El balance de masa utilizado se presenta a continuación:

$$V_i = V_{i-1} + L_i + P - E - L_{or} + X L_{or} \dots\dots\dots Ec.(9)$$

Donde:

$V_i$  = volumen de almacenaje en día  $i$ ,  $m^3$

$V_{i-1}$  = volumen de almacenaje en día  $i-1$ ,  $m^3$

$L_i$  = volumen de lixiviados generados por día,  $m^3$

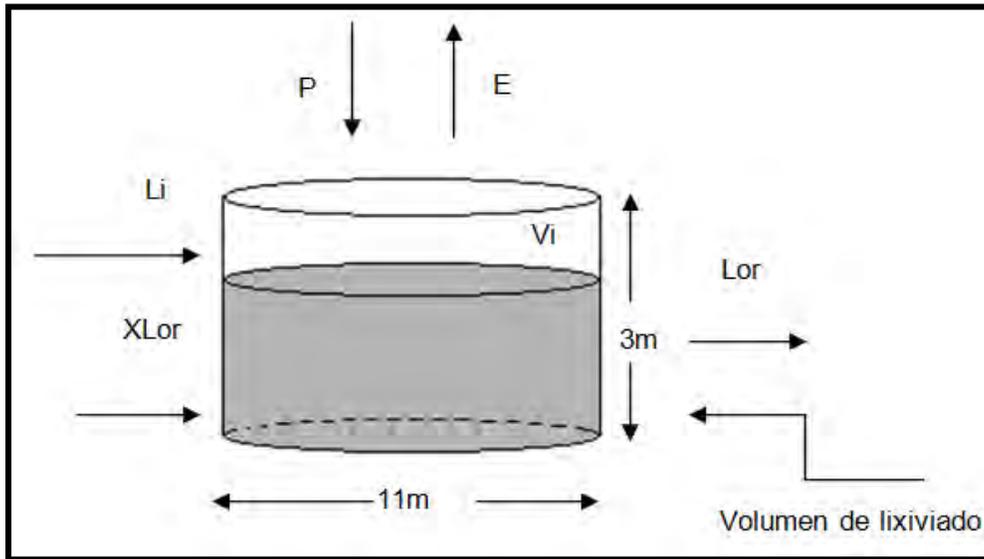
$P$  = precipitación diaria entrando al tanque de almacenamiento (computado utilizando el área superficial del tanque abierto) y los 18 años de datos de precipitación,  $m^3$ .

$E$  = evaporación diaria del área superficial del tanque, calculada utilizando como base una evaporación de 1.4 metros por año según datos del Servicio Meteorológico Nacional, referentes a las estaciones climatológicas: 00012011 Atoyac de Álvarez (SMN), 00012161 Atoyac, Atoyac (DGE) y 00012233 Técpan, Técpan de Galeana.,  $m^3$ .

$L_{or}$  = volumen de lixiviados recirculados por día especificado como 50% del total almacenado,  $m^3$ .

$XL_{or}$  = porcentaje del volumen de lixiviados recirculados que regresa al tanque de almacenamiento (es decir, no es evaporado), estimado en 65% según experiencia operacional (es decir, 35% se evapora),  $m^3$ .

Un diagrama esquemático del balance de masa se presenta en la Figura 2:



**Figura 2 Tanque de almacenamiento de lixiviados**

Para el balance de masa, se evaluaron varias configuraciones de tanques de almacenamiento. Basado en este análisis, se recomienda la construcción de un almacenaje total de  $1,200 \text{ m}^3$ . (De dimensiones aproximadas de 3m de altura y 11m de diámetro). El tanque debe ser abierto para aprovechar las altas tasas de evaporación en el área. Los resultados del balance de masa demuestran que en los 6,570 días de simulación, se excedió el total de almacenamiento ( $1,200 \text{ m}^3$ ) cero (0) % del tiempo.

#### 4.5 Producción de Lixiviados

La estimación del volumen potencial de lixiviados es de suma importancia para analizar el posible efecto al subsuelo y a los cuerpos de agua subterránea. Los líquidos a lo largo de su escurrimiento sobre los residuos sólidos, absorben y diluyen compuestos contaminantes presentes, que si se logran infiltrar a través de las capas del suelo y llegar a los mantos freáticos, pueden contaminar y degradar su calidad. De aquí que se deba estimar el volumen de dichos líquidos percolados.

Por otra parte, dicha estimación también es importante para el diseño y dimensionamiento de los sistemas de control y monitoreo del mismo. En el presente trabajo se aplicó el método de C.W.

Thornthwaite y Tchobanoglous para determinar la generación de lixiviados. En la Tabla 8 se presenta la composición típica de los lixiviados.

**Tabla 8 Composición Típica de los lixiviados**

Elemento	Valores, mg/L		
	Rellenos Nuevos (menores a 2 años)		Rellenos Maduros (mayores a 10 años)
	Rango	Típico	
DBO <sub>5</sub>	2,000 a 30,000	10,000	100 a 200
COT (carbón orgánico total)	1,500 a 20,000	6,000	80 a 160
DQO (Demanda química de oxígeno)	3,000 a 60,000	18,000	100 a 500
SST (sólidos suspendidos totales)	200 a 2,000	500	100 a 400
Nitrógeno Orgánico	10 a 800	200	80 a 120
Nitrógeno Amoniacal	10 a 800	200	20 a 40
Nitrato	5 a 40	25	5 a 10
Fósforo total	5 a 100	30	5 a 10
Orto fósforo	4 a 80	20	4 a 8
Alcalinidad como CaCO <sub>3</sub>	1,000 a 10,000	3,000	200 a 1,000
pH	4.5 a 7.5	6	6.6 a 7.5
Dureza total como CaCO <sub>3</sub>	300 a 10,000	3,500	200 a 500
Calcio	200 a 3,000	1,000	100 a 400
Magnesio	50 a 1,500	250	50 a 200
Potasio	200 a 1,000	300	50 a 400
Sodio	200 a 2,500	500	100 a 200
Cloro	200 a 3,000	500	100 a 400
Sulfato	50 a 1,000	300	20 a 50
Hierro total	50 a 1,200	60	20 a 200

Fuente: (Tchobanoglous, y otros, 1993)

4.5.1 Método de Thornthwaite

4.5.1.1 Precipitación Pluvial

La información de precipitación total anual y total mensual se tomó de los registros proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional, referentes a las estaciones climatológicas: 00012011 Atoyac de Álvarez (SMN), 00012161 Atoyac, Atoyac (DGE) y 00012233 Técpan, Técpan de Galeana (Nacional, 2008). Para los datos de lluvia y temperatura se utilizó quince años de datos históricos de precipitación (correspondientes a los años desde 1994 al 2008) de la estación meteorológica. Debido a la proximidad del relleno sanitario a la estación meteorológica, se determinó que los datos de precipitación serían consistentes con la lluvia esperada. En la Tabla 9 se muestran los datos obtenidos.

**Tabla 9 Valores Promedio de las Temperaturas**

Estación												
Temp.°C	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	26.10	26.40	26.70	27.20	27.70	27.20	27.00	27.20	26.50	27.00	26.70	26.20

**Promedio Anual = 26.8°C**

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, Gro.

En la Tabla 10 se presentan las precipitaciones registradas en las estaciones meteorológicas antes mencionadas.

**Tabla 10 Precipitaciones Registradas en las estaciones meteorológicas**

Estación												
Precipitación mm	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Promedio	9.3	1.2	1.4	0.4	28.3	242.6	196.6	220.3	328.5	151.8	14.2	4.6

**Anual= 1199.2mm**

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, Gro.

4.5.1.2 Escurrimiento Superficial

El primer cálculo necesario para determinar el volumen del lixiviado es el escurrimiento superficial que se determina con la expresión:

$$E = K_e * P \dots\dots\dots Ec.(10)$$

Donde:

- E = Escurrimiento superficial mensual, en mm.
- Ke = Coeficiente de escurrimiento, adimensional.
- P = Precipitación pluvial, en mm.

Para el empleo de la expresión anterior, es preciso determinar el coeficiente de escurrimiento, factor determinado por el tipo de suelo colocado como cubierta final.

El tipo de suelo se considera, para fines de cálculo, como suelo impermeable con pendiente del 2 a 7%, lo cual nos sugiere un coeficiente de 0.13 para época de secas y 0.17 para época de lluvias. Lo anterior, con el propósito de simular condiciones muy desfavorables a fin de determinar el volumen potencial máximo de líquido percolado, así como el material y espesor de la cubierta final para el máximo control de la producción de lixiviados.

4.5.1.3 Evapotranspiración

Es necesario conocer la evapotranspiración que ocurre en la zona, que a manera de análisis se interpreta como una pérdida de humedad en el suelo, por la acción de evaporación y transpiración de los vegetales. En el balance hídrico se toma como salida de agua hacia la atmósfera causada principalmente por las temperaturas alcanzadas en el lugar. Para el cálculo de este parámetro, se utiliza en primer término, la fórmula de C.W. Thornthwaite que se expresa en índices mensuales "i":

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5}\right)^{1.514} \dots\dots\dots Ec.(11)$$

Donde:

- i<sub>j</sub> = índice mensual.
- T<sub>j</sub>=Temperatura media mensual, en °C

Y por la fórmula

$$EP_j = 16 \left( \frac{10T_j}{I} \right)^a \dots \dots \dots Ec. (12)$$

Donde:

EP<sub>j</sub> = Evapotranspiración potencial mensual, en mm (no ajustada)

T<sub>j</sub> = Temperatura media mensual, en °C

I = Sumatoria de los índices mensuales i<sub>j</sub>.

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1792 \times 10^{-5} I + 0.49239 \dots \dots \dots Ec. (13)$$

$$EC_j = Kc_j * EP_j \dots \dots \dots Ec. (14)$$

Donde:

EC<sub>j</sub> = Evapotranspiración potencial ajustada, en mm.

EP<sub>j</sub> = Evapotranspiración potencial mensual no ajustada en mm.

Kc<sub>j</sub> = Factor de corrección que depende de la latitud del lugar, adimensional.

#### 4.5.1.4 Evapotranspiración Real

La evapotranspiración real es la estimación de la evaporación y transpiración que se da en la zona de estudio por las temperaturas alcanzadas en el suelo y su vegetación. Para esto es necesario tomar en cuenta factores tales como la humedad del suelo, la infiltración, y la evapotranspiración potencial “ajustada” de acuerdo a la latitud.

Para que esto suceda es necesario que la infiltración que ocurre en el suelo sea mayor que la evapotranspiración potencial ajustada. Es entonces, cuando la evapotranspiración real se iguala a la evapotranspiración potencial ajustada. Por otro lado, si consideramos que la evapotranspiración ajustada (EC<sub>j</sub>) es mayor a la infiltración (I<sub>j</sub>); entonces la evapotranspiración real (ER<sub>j</sub>) se determina mediante:

$$ER_j = I_j - DHS_j \dots \dots \dots Ec. (15)$$

Si I<sub>j</sub> - EC<sub>j</sub> > 0 ; o bien,

$$ER_j = EC_j \dots \dots \dots Ec. (16)$$

Si  $I_j - EC_j < 0$

Donde:

$ER_j$  = Evapotranspiración real, en mm.

$EC_j$  = Evapotranspiración potencial ajustada, en mm.

$DSH_j$  = Variación de la humedad del suelo, en mm.

$I_j$  = Infiltración, mm.

La Tabla 11 presenta un resumen de la aplicación del método de Thornthwaite. En la misma se muestra la evapotranspiración real, potencial de infiltración, almacenamiento según el tipo de suelo a emplear como material de cobertura y déficit de agua entre otros.

**Tabla 11      Resumen Método de Thornthwaite**

Parametro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación	9.3	1.2	1.4	0.4	28.3	242.6	196.6	220.3	328.5	151.8	14.2	4.6
Evap Corregida	112.47	124.03	136.34	155.18	174.25	166.89	160.81	158.10	135.12	136.62	124.07	111.59
Pot de Infiltración	-104.38	-122.99	-135.12	-154.83	-150.76	34.47	2.37	24.74	137.54	-10.62	-111.72	-107.59
Almacenamiento	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	40.00	40.00	40.00	40.00	29.38	0.00	0.00
Déficit de agua	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	5.53	43.16	58.42	0.00	10.62	40.00	40.00
Evap. Real	8.09	1.04	1.22	0.35	23.49	166.89	160.81	158.10	135.12	136.62	43.58	4.60
Percolación	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	39.12	0.00	0.00	0.00

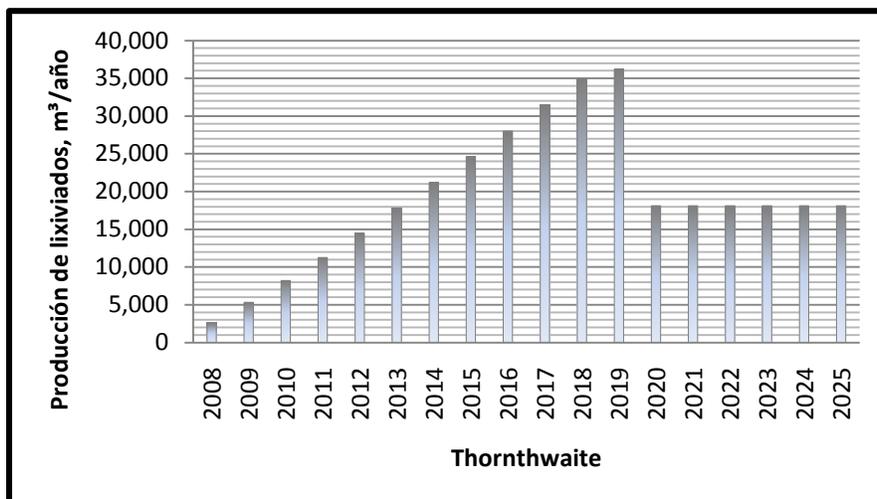
Esto quiere decir que, el volumen de agua que se percola a través del material de cubierta a lo largo de un año es de 39.12mm que equivale a 391.2m<sup>3</sup>/ha.

Por lo tanto el volumen de lixiviados que se generaran por año de acuerdo al área que ocuparán dichos residuos por año se presenta en la Tabla 12.

**Tabla 12 Generación de lixiviados en el horizonte del proyecto**

año	m <sup>3</sup> /año*ha	Hectáreas	m <sup>3</sup> /año	l/s
2008	391.20	6.58	2,574.10	0.09
2009	391.20	13.56	5,302.72	0.19
2010	391.20	20.93	8,187.82	0.29
2011	391.20	28.71	11,230.57	0.40
2012	391.20	36.89	14,432.93	0.51
2013	391.20	45.49	17,796.47	0.63
2014	391.20	54.13	21,176.44	0.75
2015	391.20	62.81	24,572.84	0.88
2016	391.20	71.54	27,985.67	1.00
2017	391.20	80.31	31,415.32	1.12
2018	391.20	89.12	34,861.79	1.24
2019	391.20	92.51	36,189.91	1.29
2020	195.60	92.51	18,094.96	1.29
2021	195.60	92.51	18,094.96	1.29
2022	195.60	92.51	18,094.96	1.29
2023	195.60	92.51	18,094.96	1.29
2024	195.60	92.51	18,094.96	1.29
2025	195.60	92.51	18,094.96	1.29

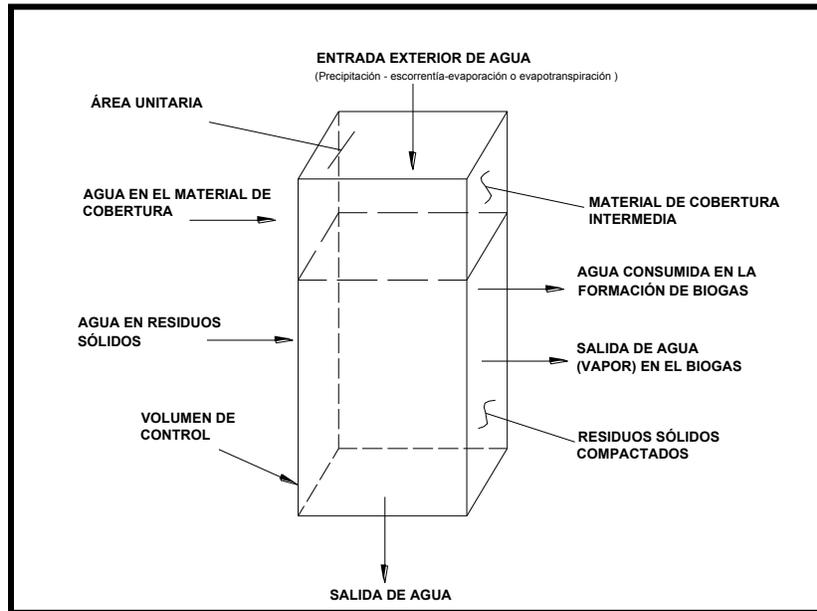
En la Figura 3 se observa gráficamente la producción anual de los lixiviados según el método de Thornthwaite.



**Figura 3 Generación de lixiviados. Thornthwaite**

4.5.2 Método de Tchobanoglous

Para el cálculo de los lixiviados, se debe de realizar un balance hídrico al interior de cada una de las etapas del relleno sanitario el cual está en función de: La infiltración, el contenido de humedad de los residuos, el agua que se pierde en la formación de biogás y vapor y la capacidad de campo. Este balance se presenta de manera esquemática en la Figura 4.



**Figura 4 Balance Hídrico al Interior de un Relleno**

Fuente: Integrated Solid Waste Management (Tchobanoglous, y otros, 1993)

Como se puede ver en la figura la cantidad de lixiviado formado, es la diferencia entre la capacidad de campo (agua que puede ser retenida por los residuos) menos la húmeda neta, la cual resulta ser la diferencia entre la húmeda de los residuos más la infiltración menos el agua que se pierde en la formación de biogás y vapor, como muestra la siguiente expresión.

$$W_{B(L)} = (C_w) - (W_{sw} + W_{a(R)} - W_{LG} - W_{wv}) \dots\dots\dots Ec. (17)$$

Donde:

- $W_{b(L)}$  = Agua que sale como lixiviado
- $C_w$  = Capacidad de campo
- $W_{sw}$  = Agua contenida en los residuos
- $W_{a(R)}$  = Agua de infiltración lluvia o nieve
- $W_{LG}$  = Agua perdida en la formación de biogás
- $W_{wv}$  = Agua perdida en la formación de vapor

Para el diseño del relleno se considero que la humedad de los residuos sólidos es de 30%, y que en la formación de biogás y vapor pierden 0.256 kg y 0.034 Kg de agua respectivamente por cada metro cúbico de biogás. Cabe mencionar que se tomaron los mismos registros de precipitación y temperaturas obtenidos de las estaciones meteorológicas citas al principio de este subtema.

Para la determinación de la cantidad de lixiviados generados al termino de cada año fue necesario realizar un balance hídrico hasta que el flujo de lixiviados se estabilizo, además de conocer datos precisos para la predicción de estos como: residuos sólidos (altura de la celda, peso volumétrico y peso), material de cobertura (altura de la cobertura, peso volumétrico del material y peso total de este), infiltración (infiltración de agua, volumen de agua en un m<sup>2</sup>, peso volumétrico del agua y peso total del agua), biogás (tasa de producción anual, peso volumétrico, peso total, agua consumida en la generación y vapor de agua generado en el proceso) y por último lixiviados (contenido de humedad de los residuos, contenido de humedad total, peso de los residuos en base seca, peso promedio, capacidad de campo, agua que puede ser almacenada en los residuos, lixiviado, agua remanente y pesos total remanente de lixiviados). En el ANEXO 3 se presenta la hoja de cálculo para la determinación de lixiviados del sitio. En la Tabla 13 se presenta el resumen de este método.

La fórmula para conocer la capacidad de campo de los residuos se determino mediante:

$$FC = 0.6 - 0.55 \left( \frac{W}{10,000 + W} \right) \dots \dots \dots EC. (18)$$

Donde:

FC: Capacidad de campo (fracción de agua en los residuos basada en el peso seco de los mismos).

W: sobre peso calculado a la mitad de la celda de residuos.

**Tabla 13 Proyección de la generación de Lixiviados. Método de Tchobanoglous**

	<b>Lixiviados Kg/m<sup>2</sup></b>	<b>Área ocupada m<sup>2</sup></b>	<b>Ton/año</b>	<b>PV Ton/m<sup>3</sup></b>	<b>m<sup>3</sup>/año</b>	<b>L/s</b>
2008	45.91	6,580	302.12	1.00	302.12	0.01
2009	199.14	13,555	2,699.36	1.00	2,699.36	0.09
2010	189.70	20,930	3,970.38	1.00	3,970.38	0.13
2011	190.91	28,708	5,480.65	1.00	5,480.65	0.17

Tabla 28 Proyección de la generación de Lixiviados, Método de Tchobanoglous “Continuación”

2012	191.74	36,894	7,074.09	1.00	7,074.09	0.22
2013	188.94	45,492	8,595.04	1.00	8,595.04	0.27
2014	203.12	54,132	10,995.20	1.00	10,995.20	0.35
2015	192.23	62,814	12,074.72	1.00	12,074.72	0.38
2016	285.42	71,538	20,418.55	1.00	20,418.55	0.65
2017	204.28	80,305	16,404.47	1.00	16,404.47	0.52
2018	355.74	89,115	31,702.22	1.00	31,702.22	1.01
2019	204.89	92,510	18,954.15	1.00	18,954.15	0.60
2020	195.34	92,510	18,071.11	1.00	18,071.11	0.57
2021	196.14	92,510	18,144.84	1.00	18,144.84	0.58
2022	196.06	92,510	18,137.93	1.00	18,137.93	0.58
2023	196.05	92,510	18,136.19	1.00	18,136.19	0.58
2024	196.26	92,510	18,156.14	1.00	18,156.14	0.58
2025	196.20	92,510	18,150.28	1.00	18,150.28	0.58

La Figura 5 muestra la representación gráfica de la producción de lixiviados obtenidas mediante este método.

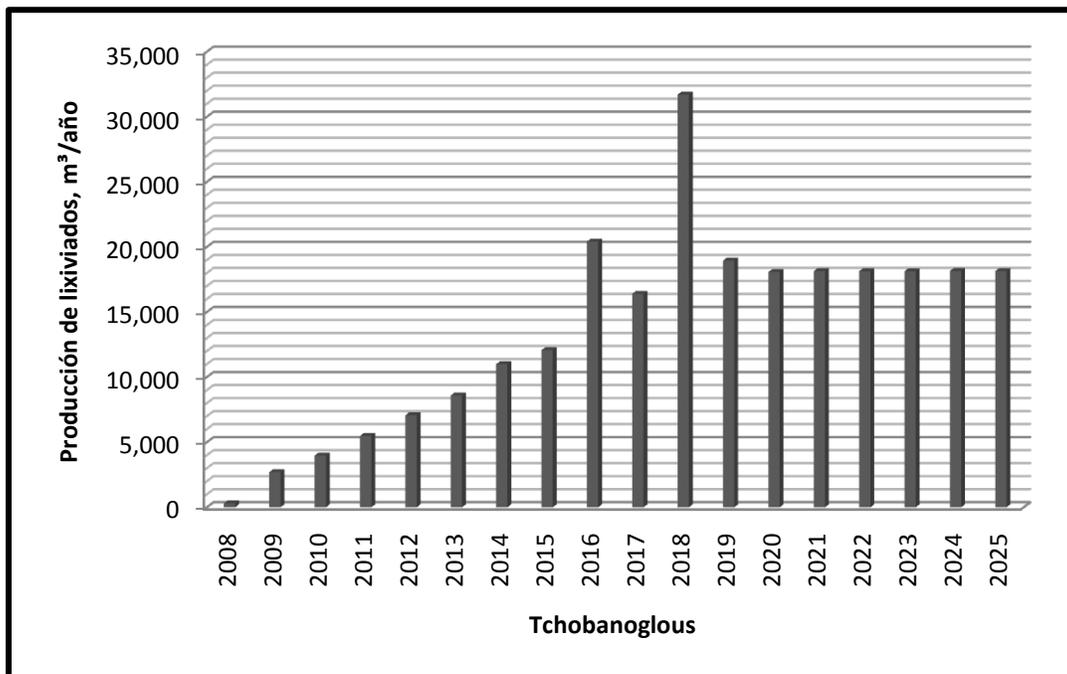
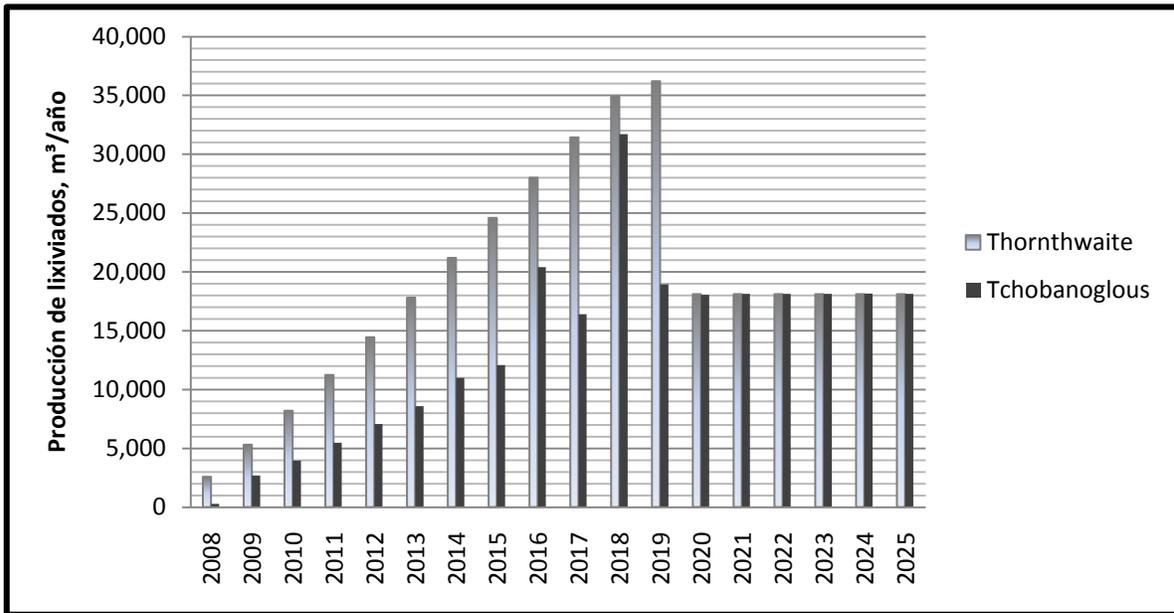


Figura 5 Proyección de la generación de lixiviados. Método de Tchobanoglous

4.5.3 Análisis de ambos métodos

Como se puede observar en cada una de las proyecciones se obtuvieron resultados similares en cuanto al comportamiento que tomarán al transcurso de la vida útil del relleno; por otro lado si observamos los valores obtenidos en cada uno se puede notar que el método de Thornthwaite arroja valores más grandes que los que presenta Tchobanoglous, esto se puede asumir por los datos que utiliza este para poder hacer la proyección, aunque son datos precisos, son escasos en comparación con los utilizados por Tchobanoglous y es por esto que se pueden observar las diferencias ya que un método sobre estima la generación y el otro al ser más preciso por la cantidad de datos utilizados nos da los valores más cercanos a la realidad. Estos resultados se verán reflejados a la hora de tomar en cuenta los materiales, características y almacenamiento temporal de los lixiviados. La Figura 6 que se observa a continuación presenta los dos métodos donde se puede notar claramente la diferencia que presenta cada uno de estos.



**Figura 6 Comparación entre ambos métodos de proyección de lixiviados**

4.5.4 Cárcamo de bombeo

El flujo de lixiviados obtenido por medio del balance de agua en el Relleno Sanitario es de 23.94 m<sup>3</sup>/d. Por esta razón, dicho cárcamo tendrá una capacidad para almacenar el volumen de lixiviados generados durante un día de 24 m<sup>3</sup>/d.

Se propone llevar a cabo un ciclo de bombeo diario, con duración de una hora, lo que implica que el equipo de bombeo deberá tener la siguiente capacidad:

$$\frac{24,000 L}{3,600 s} = 6.67 \text{ lps}$$

También se debe de tomar en cuenta que el 100% de los lixiviados serán recirculados al relleno sanitario, por lo que la carga estática que deberá vencer la bomba será de 16m, mas las pérdidas por fricción generadas a lo largo de aproximadamente 60m de tubería de PEAD de 3" (76mm) de diámetro.

Del principio de continuidad y de la fórmula de Hazen-Williams se tiene que para una tubería circular:

$$Q = \frac{1}{4} \pi D^2 0.849 C \left(\frac{D}{4}\right)^{0.63} S^{0.54} \dots \dots \dots Ec. (19)$$

En donde:

- Q= Gasto (m<sup>3</sup>/s)
- D= diámetro de la tubería (m)
- C= coeficiente de Hazen-Williams (145; PEAD)
- S= pendiente hidráulica (m/m)

Por otro lado:

$$S = \left(\frac{h_f}{L}\right) \dots \dots \dots Ec. (20)$$

En donde:

- h<sub>f</sub> = Perdidas por fricción (m)
- L = longitud de la tubería (m)

Sustituyendo (18) en (19) y despejando h<sub>f</sub> se tiene que:

$$h_f = \left[\frac{3.597Q}{D^{2.63} C}\right]^{1.852} L \dots \dots \dots Ec. (21)$$

En donde:

- Q= 0.0067 m<sup>3</sup>/s
- D= 0.076 m
- C= 145

L= 60m

Sustituyendo datos en (3) se tiene que:

$$h_f = 1.69\text{m}$$

Por lo tanto la carga dinámica de bombeo se tomará como de 24m.

De tal manera, se propone el uso de una bomba sumergida marca IMPEL, modelo AC-52-76, de 5 HP de potencia, con una descarga de 3" (76mm) y un punto de operación de 24m y 6.67 lps (se anexan curvas del fabricante).

## 4.6 Producción de Biogás

### 4.6.1 Modelo EPA

#### 4.6.1.1 Análisis de la Composición de los Residuos

Para el sitio seleccionado, la estimación de la cantidad de biogás que se generarán por peso de residuos sólidos, considera la información obtenida de los estudios de generación relativa a la composición física de los residuos sólidos que se producen en los tres municipios en estudio.

Por otro lado, de acuerdo a las condiciones climatológicas predominantes en la zona de estudio, se considera para los residuos confinados un porcentaje de humedad del 30 % de acuerdo a información proporcionada por los municipios.

**La fracción de los RSU susceptibles a descomponerse son: residuos alimenticios, el papel (higiénico, periódico y revistas), el pañal desechable, el trapo, el cartón, el hueso, el hule, el plástico y los residuos de jardinería, lo que se traduce en el 85.6% del total de los residuos sólidos depositados en los tiraderos actuales. Ver**

Tabla 14.

**Tabla 14 Composición de los Residuos Sólidos Generados por los tres Municipios.**

Tipo de Residuo	Subproducto	Porcentaje (%)	Kg en una tonelada
Rápidamente degradable	Res. De jardinería	32.17	321.17
	Res. Alimenticios	23.08	230.8
Moderadamente degradable	Cartón	5.42	54.2
	Papel	2.85	28.5
	Pañal desechable	6.58	65.8
	Trapo	1.74	17.4
Lentamente degradable	Hueso	0.5	5.0
	Hule	0.96	9.6
	Plástico	12.29	122.9
<b>Total</b>		<b>85.60</b>	<b>856.0</b>
		<b>0.856</b>	

En la aplicación del método estequiométrico, sólo se considera aquellos subproductos de los residuos sólidos que se encuentren dentro de la gama de materia rápida, mediana y lentamente degradable, así como del porcentaje de humedad de los mismos.

El procedimiento de aplicación del método estequiométrico es como sigue:

Se determina la cantidad de residuos sólidos orgánicos que se descomponen en base seca asumiendo que el contenido de humedad está asociado con los componentes orgánicos. Como se mencionó el 85.6 % del peso total de residuos es materia orgánica.

Para el caso específico del sitio, se tiene que:

- Una tonelada de R.S.M. contiene 85.6 % de materia orgánica, es decir 856 kg de M.O.
- Una tonelada de R.S.M contiene el 30% de humedad, es decir 300 kg de agua.
- Una tonelada de R.S.M. contiene  $(856-300)=556$  kg de materia orgánica en base seca (M.O.B.S.).

Se determina la cantidad de residuos orgánicos putrescibles o susceptibles a descomponerse, asumiendo que estos residuos putrescibles son los residuos alimenticios, el cartón, el pañal desechable, el trapo, el hueso, el hule, el plástico y el 75% de los residuos de jardinería. Además se considera también que de la materia que se descompone el 5% permanece como cenizas.

De la composición de subproductos indicada en la tabla 9, se tienen los siguientes porcentajes de residuos: 23.08% de residuos alimenticios, 2.85% de papel, 5.42% de cartón, 32.17% de residuos de jardinería, 1.74% de trapo, 6.58% de pañal desechable, 0.5% de hueso, 0.96% de hule y 12.29% de plástico.

Descomposición de residuos  
(base seca)

$$= \frac{[(\text{cartón} + \text{papel} + \text{pañal des} + \text{trapo} + \text{hueso} + \text{hule} + \text{plástico} + \text{alim}) + 0.75(\text{jard})] * 0.95 \text{ kg de MOBS}}{\text{kg de M.O.}}$$

Descomposición de residuos  
(base seca)

$$= \frac{[(54.2+28.5+65.8+17.4+5+9.6+122.9+230.8)+0.75(321.7)]*0.95(556) \text{ de MOBS}}{856 \text{ kg de M.O.}}$$

(M.O.D.B.S.) = 478.51kg de residuos sólidos degradables en base seca efectivos

Debido a que las poblaciones que dispondrán sus residuos sólidos en el relleno sanitario son eminentemente rurales, implica altos porcentajes de materia orgánica. De estudios efectuados en zonas similares, se tienen los siguientes valores para el carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre en la Tabla 15.

**Tabla 15**      **Valores de CHON de las muestras de residuos sólidos**

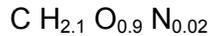
	% Peso Húmedo
C	40
H	7
O	28
N	1

Para poder obtener la fórmula aproximada para la obtención de la generación de metano y dióxido de carbono, se consideran los porcentajes mostrados en la tabla anterior como gramos totales obtenidos en una muestra de 100gr. Posteriormente, al dividirlos entre el peso molecular de cada uno de estos elementos poder obtener los subíndices.

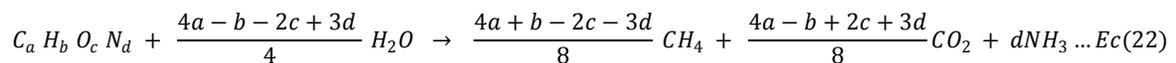
Por lo que la fórmula empírica es:



Expresando estos valores en relación con las moles de carbono, se obtiene:



Por tanto la fórmula empírica es  $C H_{2.1} O_{0.9} N_{0.02}$ , que es la que representa la composición de la materia orgánica presente al inicio de su disposición en el relleno. La fórmula empírica  $CaHbOcNd$  representa la materia orgánica al final de la estabilización cuando se libera  $CO_2$  y  $CH_4$ . Por lo anterior se establece teóricamente que la estabilización completa de los residuos orgánicos en el relleno sanitario corresponde a la siguiente expresión:



Donde:

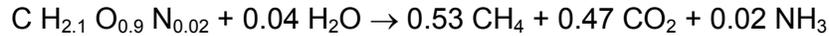
$$a = 1$$

$$b = 2.1$$

$$c = 0.9$$

$$d = 0.02$$

Sustituyendo los valores de a, b, c y d, tenemos:



La estimación del peso de metano y del dióxido de carbono se da a continuación:

$$CH_4 = \frac{8.48 \times 478.51 \text{ kg}}{28.78}$$

$$CH_4 = 140.99 \text{ kg}$$

Es decir, que por 478.51 kg de residuos orgánicos secos degradables se generan 140.99 kg de metano, o su equivalente a un kilogramo de residuos orgánicos en base seca degradable generará 0.2946 kg de metano.

$$CO_2 = \frac{20.68 \times 478.51 \text{ kg}}{28.78}$$

$$CO_2 = 343.836 \text{ kg}$$

En base seca a estas estimaciones, por cada 478.51 kg de residuos orgánicos secos degradables se generan 343.836 kg de dióxido de carbono ó 1 kg de residuo orgánico degradable genera 0.719 kg de CO<sub>2</sub>.

La densidad del metano es de 0.7169 kg/m<sup>3</sup> y la densidad del dióxido de carbono es de 1.9763 kg/m<sup>3</sup>

Por tanto el volumen del metano y el dióxido de carbono es el siguiente:

$$\text{Metano } (CH_4) = \frac{140.99 \text{ kg}}{0.7169 \text{ kg/m}^3} = 196.66 \text{ m}^3$$

$$\text{Dióxido de Carbono } (CO_2) = \frac{343.836 \text{ kg}}{1.9763 \text{ kg/m}^3} = 173.98 \text{ m}^3$$

El volumen total de los gases por cada tonelada de residuo sólido municipal dispuesta es de 370.64 m<sup>3</sup> en condiciones estándar de presión y temperatura.

El porcentaje de la composición de los gases resultantes, se define enseguida:

$$CH_4 (\%) = \frac{\text{Volumen de metano}}{\text{Volumen total}} \times 100 \dots \dots \dots \text{Ec. (23)}$$

$$CH_4 (\%) = \frac{196.66 \text{ m}^3}{370.64 \text{ m}^3} \times 100 = 53.06\%$$

$$CO_2 (\%) = \frac{\text{Volumen de dióxido de carbono}}{\text{Volumen total}} \times 100 \dots \dots \dots \text{Ec. (24)}$$

$$CO_2 (\%) = \frac{173.98 \text{ m}^3}{370.64 \text{ m}^3} \times 100 = 46.94\%$$

La cantidad total del biogás generado por unidad de peso de residuos se determina como sigue:

Basado en el peso seco de materia orgánica:

$$\frac{370.64 \text{ m}^3 \text{ de biogás}}{478.51 \text{ kg}} = 0.7746 \text{ m}^3/\text{kg} = 774.6 \text{ m}^3/\text{ton de M.O.D.B.S.}$$

Finalmente la composición teórica del biogás generado por una tonelada de residuos sólidos se presenta en la Tabla 16y Tabla 17.

**Tabla 16 Composición del Biogás por Tonelada**

Compuesto	Peso (kg)	Porcentaje (%)
Metano	140.99	29.08
Bióxido de carbono	343.84	70.92
Biogás	484.83	100.00

**Tabla 17 Composición del Biogás por Volumen**

Compuesto	Volumen (m <sup>3</sup> )	Porcentaje (%)
Metano	196.66	53.06
Bióxido de carbono	173.98	46.94
Biogás	370.64	100.00

De acuerdo a las tablas anteriores, se deduce que el potencial teórico de producción de metano,  $L_0$ , para los residuos sólidos para el sitio de disposición final es de:

$$L_0 = 196.66 \text{ m}^3/\text{ton de residuos sólidos dispuesta.}$$

Entonces, para el cálculo de la tasa de generación de biogás “Q” se usarán los parámetros que se presentan a continuación:

Parámetros considerados

$$L_0 = 196.66 \text{ m}^3/\text{ton de residuos sólidos dispuesta.}$$

Por otra parte el modelo que recomienda la Agencia de Protección al Ambiente (EPA) para la proyección de la generación de biogás es el presentado anteriormente como *Ec. (7)*:

$$Q = 2L_0R[e^{-k_1c} - e^{-k_2t}]$$

Para el caso del relleno intermunicipal que se propone:

$$R = 21,672 \text{ ton/año}$$

$$K_1 = 0.07 \text{ año}^{-1} \text{ (hasta el año 2019)}$$

$$K_2 = 0.1 \text{ año}^{-1} \text{ (a partir del año 2020)}$$

La proyección de la generación de biogás durante la operación y post clausura se presenta resumida en la Tabla 18 presentada a continuación:

**Tabla 18 Proyección Teórica de la Generación de Biogás EPA**

Año	Residuos (ton/año)	Residuos Acumulados (ton)	c (años)	t (años)	volumen en millones de m <sup>3</sup>		
					Biogás (m <sup>3</sup> /año)	Metano (53.06%) m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /año	Bióxido de Carbono (46.94%) m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> /año
2008	16,010		0	0	0	0	0
2009	16,973		0	1	0.43	0.23	0.20
2010	17,945		0	2	0.87	0.46	0.41
2011	18,928		0	3	1.34	0.71	0.63
2012	19,920		0	4	1.82	0.96	0.85
2013	20,923		0	5	2.31	1.23	1.09
2014	21,025		0	6	2.82	1.50	1.32
2015	21,127		0	7	3.20	1.70	1.50
2016	21,230		0	8	3.56	1.89	1.67
2017	21,333		0	9	3.90	2.07	1.83
2018	21,437		0	10	4.22	2.24	1.98
2019	21,541		0	11	4.53	2.40	2.13
2020			1	12	4.01	2.13	1.88
2021			2	13	3.53	1.87	1.66
2022			3	14	3.10	1.64	1.45
2023			4	15	2.71	1.44	1.27
2024			5	16	2.37	1.26	1.11
2025			6	17	2.07	1.10	0.97
2026			7	18	1.80	0.96	0.85
2027			8	19	1.57	0.83	0.74
2028			9	20	1.36	0.72	0.64
2029			10	21	1.17	0.62	0.55
2030			11	22	1.00	0.53	0.47
2031			12	23	0.86	0.46	0.40
2032		21,672.00	13	24	0.73	0.39	0.34
2033			14	25	0.62	0.33	0.29
2034			15	26	0.52	0.27	0.24
2035			16	27	0.43	0.23	0.20
2036			17	28	0.35	0.19	0.17
2037			18	29	0.29	0.15	0.14
2038			19	30	0.23	0.12	0.11
2039			20	31	0.18	0.10	0.08
2040			21	32	0.14	0.07	0.06
2041			22	33	0.10	0.05	0.05
2042			23	34	0.07	0.03	0.03
2043			24	35	0.04	0.02	0.02
2044			25	36	0.01	0.01	0.01

La Figura 7 presenta el comportamiento que tendrá el biogás a lo largo de la vida útil (12 años), así como después de la clausura del sitio, también se presenta el comportamiento tanto del CH<sub>4</sub> como del CO<sub>2</sub>.

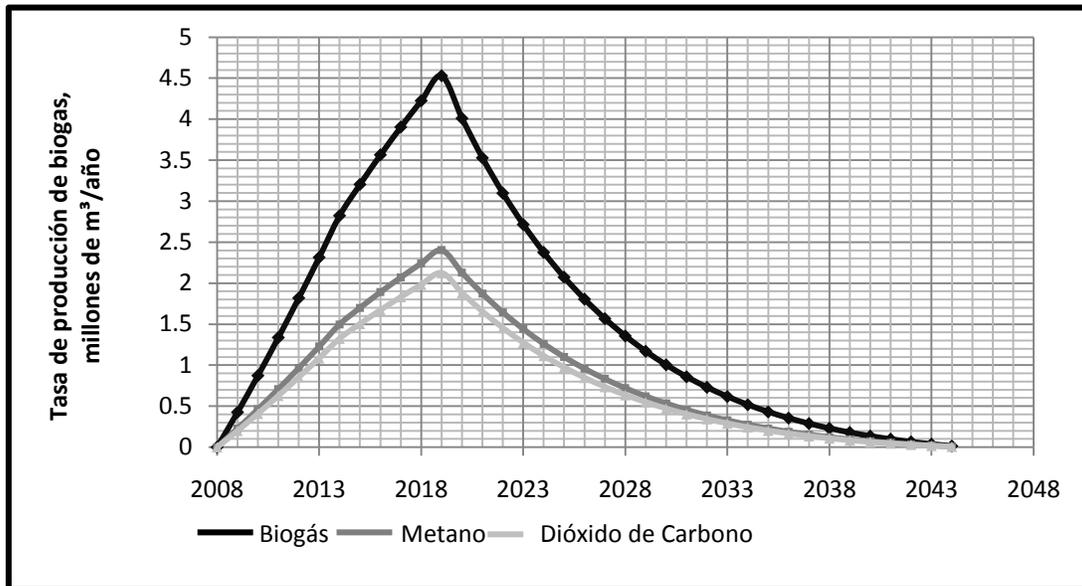


Figura 7 Proyección de biogás para el relleno intermunicipal. EPA

4.6.2 Modelo Tchobanoglous

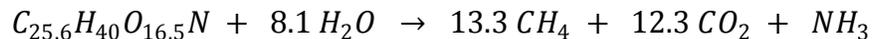
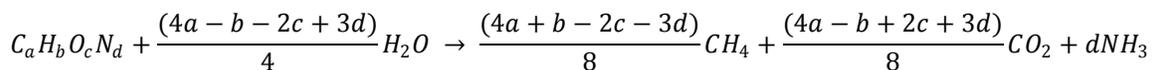
Este modelo se basa en la hipótesis de que la producción de biogás a lo largo de la vida útil de un relleno sanitario será una distribución triangular y que la tasa de descomposición alcanza un pico dentro de los dos primeros años y posteriormente tiende a decaer. Toma en consideración solamente la descomposición de la materia orgánica rápida y lentamente degradable. Para poder obtener la distribución de estas cantidades de materia orgánica se obtiene su peso en base seca mediante porcentajes de humedad de cada uno de los componentes (residuos orgánicos, papel, residuos de jardín, etc.); cabe resaltar que estos porcentajes darán mayor precisión en el cálculo de la producción ya que son específicos de cada elemento y no como un todo, tal como lo considera el modelo de la EPA y muchos otros más. En la

Tabla 19 se presenta la composición en kg de base seca de cada uno de los residuos considerados en este análisis.

**Tabla 19 Composición en peso seco de la fracción rápida y lentamente degradable**

Componente	Peso Húmedo kg	Humedad	Peso Seco kg	Porcentaje en peso (base seca)						Composición en peso, kg					
				C	H	O	N	S	Cenizas	C	H	O	N	S	Cenizas
<b>Residuos Orgánicos Rápidamente Degradables</b>															
Residuos Orgánicos	23.1	70%	6.9	48.0%	6.4%	37.6%	2.6%	0.4%	5.0%	3.3	0.4	2.6	0.2	0.0	0.3
Papel	4.8	6%	4.5	43.5%	6.0%	44.0%	0.3%	0.2%	0.6%	2.0	0.3	2.0	0.0	0.0	0.0
Cartón	2.9	5%	2.7	44.0%	5.9%	44.6%	0.3%	0.2%	5.0%	1.2	0.2	1.2	0.0	0.0	0.1
Residuos de Jardín*	<u>19.3</u>	60%	<u>7.7</u>	47.8%	6.0%	38.0%	3.4%	0.3%	4.5%	<u>3.7</u>	<u>0.5</u>	<u>2.9</u>	<u>0.3</u>	<u>0.0</u>	<u>0.3</u>
Total	50.1		21.9							10.2	1.3	8.7	0.5	0.1	0.9
<b>Residuos Orgánicos Lentamente Degradables</b>															
Textiles	1.7	10%	1.6	55.0%	6.6%	31.2%	4.6%	0.2%	2.5%	0.9	0.1	0.5	0.1	0.0	0.0
Hule	1.0	2%	0.9	78.0%	10.0%		2.0%		10.0%	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
Piel	0.2	10%	0.2	60.0%	8.0%	11.6%	10.0%	0.4%	10.0%	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Residuos de Jardín**	12.9	60%	5.2	47.8%	6.0%	38.0%	3.4%	0.3%	4.5%	2.5	0.3	2.0	0.2	0.0	0.2
Madera	<u>0.8</u>	20%	<u>0.6</u>	49.5%	6.0%	42.7%	0.2%	0.1%	1.5%	<u>0.3</u>	<u>0.0</u>	<u>0.3</u>	<u>0.0</u>	<u>0.0</u>	<u>0.0</u>
Total=	16.6		8.5							4.5	0.6	2.7	0.3	0.0	0.4

Posteriormente se hace una suma de las cantidades en peso seco de cada uno de los elementos constituyentes de la materia orgánica C H O N S, con esto y con los pesos moleculares de cada uno de los elementos mencionados anteriormente se obtiene una fórmula aproximada de la generación de metano y dióxido de carbono. El cálculo para la proyección de biogás se presenta en el Anexo 4.



$$625.3 + 146 \quad 213.5 + 541.3 + 17$$

Con esta fórmula se procede a determinar el peso del CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> tomando en cuenta el peso de cada uno de estos a partir de la fórmula anterior, el peso de CHON y el peso en base seca de los residuos orgánicos:

Determinación del volumen de metano y dióxido de carbono producido considerando las densidades de estos como se hizo anteriormente se obtiene que:

$$\text{CH}_4 = \frac{(213.5)(21.9)}{(625.3)(0.717627)} = 10.42 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 = \frac{(541.3)(21.9)}{(625.3)(1.97828)} = 9.58 \text{ m}^3$$

Para obtener la cantidad teórica de gas generada por unidad de peso seco de materia orgánica destruida:

$$\text{Vol/kg} = \frac{10.42\text{m}^3 + 9.58\text{m}^3}{21.9\text{kg}} = 0.91 \text{ m}^3/\text{kg}$$

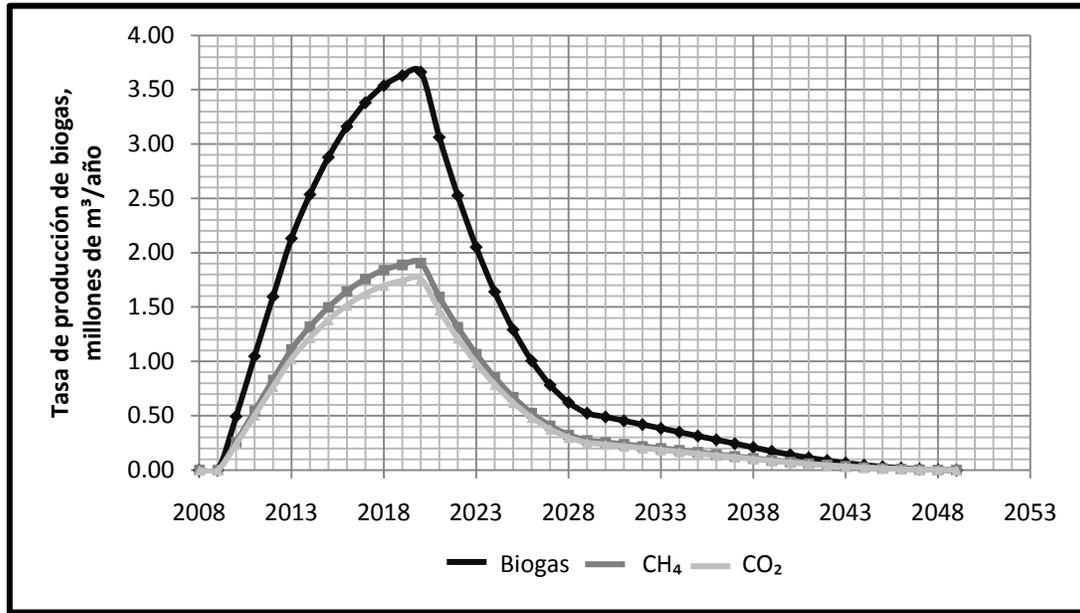
Los resultados de la proyección se muestran en la Tabla 20:

PROYECTO DEL RELLENO SANITARIO INTERMUNICIPAL

**Tabla 20 Proyección teórica de la generación de Biogás “Tchobanoglous”**

Fin de año	Rapidamente biodegradable		Lentamente biodegradable		Total (rápida + lenta)	
	Tasa de generación m <sup>3</sup> /año	Volumen de gas m <sup>3</sup>	Tasa de generación m <sup>3</sup> /año	Volumen de gas m <sup>3</sup>	Tasa de generación m <sup>3</sup> /año	Volumen de gas m <sup>3</sup>
0	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.000	0.014	0.0000	0.0001	0.0000	0.0138
2	0.027	0.026	0.0003	0.0004	0.0275	0.0263
3	0.025	0.023	0.0005	0.0007	0.0251	0.0238
4	0.022	0.020	0.0008	0.0009	0.0226	0.0214
5	0.019	0.018	0.0011	0.0012	0.0202	0.0189
6	0.016	0.015	0.0013	0.0015	0.0177	0.0165
7	0.014	0.012	0.0016	0.0017	0.0152	0.0140
8	0.011	0.010	0.0019	0.0020	0.0128	0.0115
9	0.008	0.007	0.0021	0.0023	0.0103	0.0091
10	0.005	0.004	0.0024	0.0025	0.0078	0.0066
11	0.003	0.003	0.0027	0.0028	0.0054	0.0055
12	0.000	0.000	0.0029	0.0028	0.0029	0.0028
13	0.000		0.0028	0.0027	0.0028	0.0027
14			0.0026	0.0025	0.0026	0.0025
15			0.0025	0.0024	0.0025	0.0024
16			0.0023	0.0022	0.0023	0.0022
17			0.0022	0.0021	0.0022	0.0021
18			0.0020	0.0019	0.0020	0.0019
19			0.0018	0.0018	0.0018	0.0018
20			0.0017	0.0016	0.0017	0.0016
21			0.0015	0.0015	0.0015	0.0015
22			0.0014	0.0013	0.0014	0.0013
23			0.0012	0.0012	0.0012	0.0012
24			0.0011	0.0010	0.0011	0.0010
25			0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
26			0.0008	0.0007	0.0008	0.0007
27			0.0006	0.0005	0.0006	0.0005
28			0.0005	0.0004	0.0005	0.0004
29			0.0003	0.0002	0.0003	0.0002
30			0.0002	0.0001	0.0002	0.0001
31			0.0000		0.0000	
<b>Total</b>		<b>0.151</b>		<b>0.0439</b>		<b>0.1953</b>

En la Figura 8 se presenta el comportamiento de la producción teórica de biogás según el método de Tchobanoglous:



**Figura 8 Producción de biogás. Método de Tchobanoglous**

#### 4.6.3 Análisis de ambos modelos

Como se puede observar para ambos casos se obtuvieron gráficos diferentes, esto se debe a que cada autor considera según su modelo comportamientos distintos aunque en teoría la cantidad de biogás producida debería ser la misma para ambos casos. Cabe señalar que a pesar de que ambos modelos se basan en los mismos datos para la obtención de la fórmula aproximada, el modelo de la EPA considera la materia orgánica rápida, media y lentamente degradable mientras que Tchobanoglous solo considera la rápida y lenta.

Cabe señalar que como se presento en los lixiviados, el modelo que propone Tchobanoglous toma mayor exactitud al momento de utilizar los contenidos de humedad de cada uno de los componentes de la fracción orgánica. La Figura 9 muestra una comparación de ambos métodos.

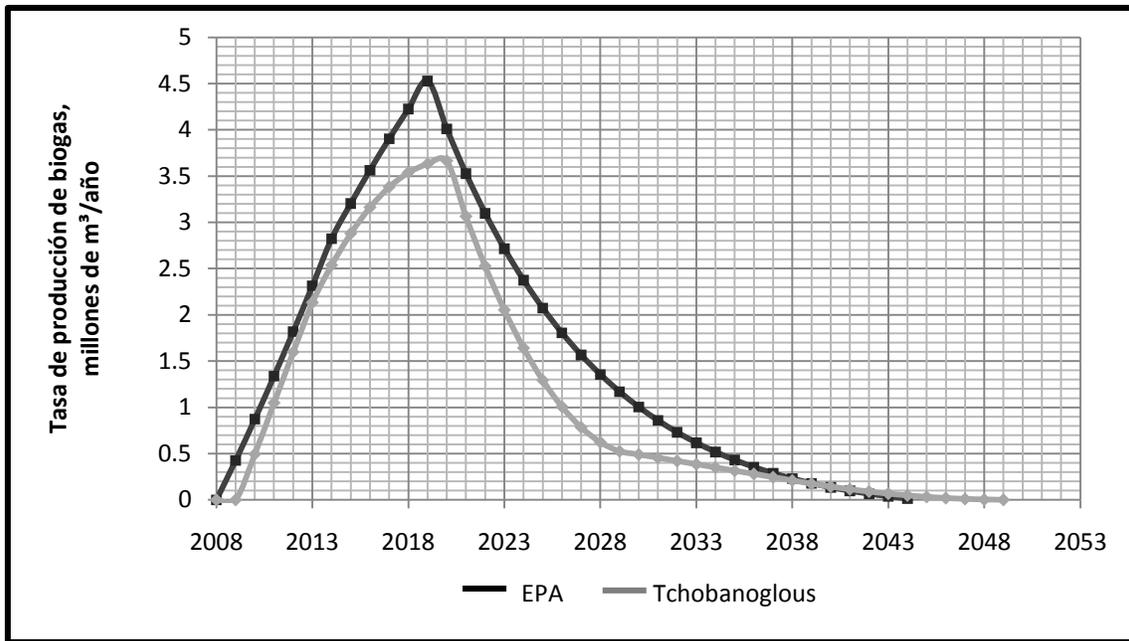


Figura 9 Comparación entre métodos de proyección

#### 4.7 Propuesta como Biorrelleno Metanogénico

Un biorrelleno metanogénico tiene su fundamento en la recirculación de lixiviados para con esto incrementar las tasas de generación de CH<sub>4</sub> y con ello acelerar la producción del gas en el tiempo obteniéndose una gran ventaja ya que el tiempo y los costos del monitoreo se reducirán de forma importante eliminando con esto un pasivo ambiental.

La recirculación de los lixiviados dota de la humedad requerida por los microorganismos para poder realizar una degradación adecuada de los residuos y, a largo plazo lograr un asentamiento de estos mayor para así poder aprovechar aún más la capacidad del sitio. Además de proporcionar humedad a los residuos, la recirculación tiene la función de remover la carga orgánica presente en los lixiviados, aporta nutrientes necesarios para incrementar las tasas de población bacteriana.

Para poder maximizar el proceso de degradación anaerobia, los niveles de pH de los residuos debe ser neutral o ligeramente ácido; de otra forma la producción de gas cesara sí el pH llega a estar por debajo de 5.5. Los cambios tanto en el volumen del gas y de la demanda química de oxígeno (DQO) son indicadores de proceso de estabilización del relleno; estos incrementos se deben a la dilución debida la recirculación del lixiviado viejo y la introducción a la etapa metanogénica.

Para poder determinar la cantidad de lixiviados a recircular en particular en éste, se tomó en cuenta la fórmula aproximada para la generación de biogás la obtenida por el método de Tchobanoglous:



Tomando la cantidad de agua que será el factor principal para poder determinar la cantidad a recircular:

$$8.1H_2O = 8.1 * [ 2(1) + 16 ] = 146$$

$$\frac{146}{625.3} = 0.23 \text{ de cantidad de gramos de agua requeridos para estabilizar 1gr de residuos.}$$

En otros términos, se requieren de 230 litros de lixiviado por cada tonelada durante el periodo de estabilización.

#### 4.7.1 Recirculación de lixiviados

El transporte y tratamiento de lixiviados representa un costo significativo en la operación de un relleno sanitario. Esto también ocasiona problemas de tránsito dentro y fuera del relleno, el cual es siempre un problema mayor entre residentes a lo largo de la ruta.

Cuando todos los costos asociados al transporte y al tratamiento de lixiviado son considerados, el costo real puede ser tan alto como \$0.20 dólares por galón (Leachate Recirculation System Pays for Itself). Incluido en este costo su manejo, depreciación del vehículo combustible y costos de tratamiento de lixiviados. En un momento donde ciudades y países tratan de reducir costos, la recirculación es una manera bastante económica de reducir los costos en la operación del relleno.

Para lograr una dispersión y una optimización en la humedad que los residuos requieren, es necesario proveer de una red de distribución superficial de tubos para controlar la tasa de inyección de los lixiviados a través de los residuos. Este método proporciona una mejor distribución de lixiviados, elimina los problemas de olores, incrementa la producción de biogás y elimina los costos de tratamiento de lixiviados.

El sistema de recirculación de lixiviados se paga por sí mismo. El sistema puede llegar a reducir los costos de tratamiento por \$11,000 dólares por mes (Leachate Recirculation System Pays for Itself).

#### Objetivos de la recirculación de lixiviados

- Reducir los elevados costos del tratamiento de lixiviados
- Reducir los requerimientos de mano de obra
- Eliminar fugas
- Incrementar la disponibilidad de espacio a través del proceso biológico y compactación de la biomasa
- Incrementar la tasa de generación de biogás para una planta de generación.

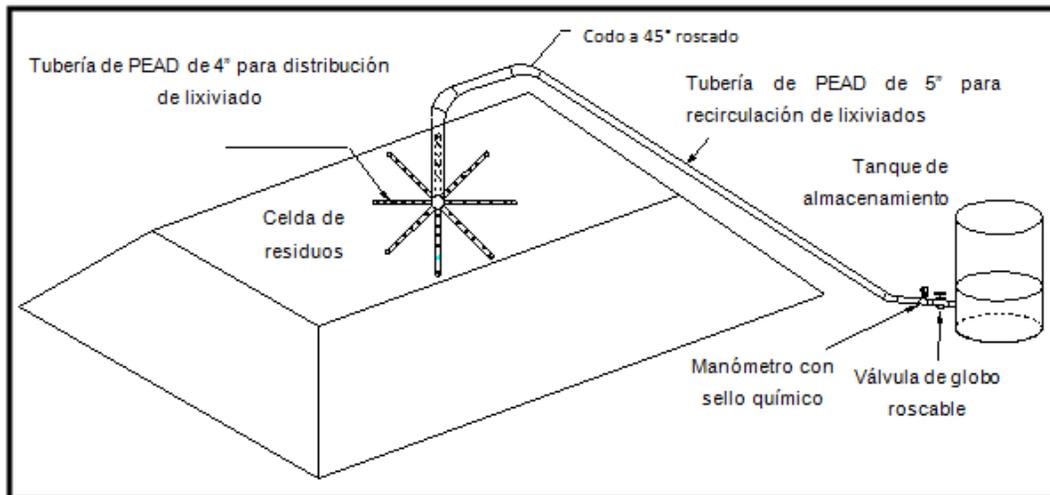
Los beneficios de la recirculación de lixiviados incluyen ahorros en costos de alrededor \$0.11 dólares por galón (Leachate Recirculation System Pays for Itself) de lixiviado que no ha sido tratado (\$0.085 por tratamiento, \$0.025 dólares por transporte). Esto quiere decir que el relleno ahorra \$11,000 dólares por mes (Leachate Recirculation System Pays for Itself) que corresponderían al tratamiento de lixiviados.

Los sistemas de recirculación de lixiviados permiten manejar niveles de humedad a través del proceso de descomposición. Los sistemas de recirculación horizontales consisten en tubos

horizontales colocados en trincheras y a profundidades determinadas dentro de los residuos. Las trincheras son típicamente llenadas con material poroso como agregados o tiras de neumáticos. Los líquidos son bombeados a las trincheras por medio de tuberías de recirculación provenientes de un tanque de almacenamiento. Las aplicaciones por presión son inyectadas bajo presión dentro de los residuos. Los sistemas horizontales no presentan características de sobre saturación como los verticales; tienen mayor vida útil pero están sujetos a daños por los asentamientos; requieren un monitoreo más preciso y estrategias de recirculación. El monitoreo de la recirculación de lixiviados de forma horizontal es crítico ya que se debe de prevenir que se ocasionen problemas ambientales como la infiltración e inestabilidad de taludes.

La Figura 10 muestra una propuesta para una eficiente recirculación, con esto se pretende maximizar la cantidad de humedad en los residuos y por consecuencia, su degradación (Sánchez, 2003).

El diseño consiste en lo siguiente, después de conocer la cantidad de lixiviados a recircular se debe de planear los tiempos en los cuales debe realizarse esta. El método consiste en hacer zanjas al final de cada celda para poder tener la configuración mostrada, posteriormente se colocan las tuberías perforadas que en este caso serían de 4" de diámetro, con el paso del tiempo ya que este llena la etapa se prosigue a realizar una perforación sobre los residuos en donde se introducirá una tubería la cual servirá para distribuir los lixiviados a las demás tuberías previamente instaladas.



**Figura 10** Propuesta de recirculación de lixiviados dentro de las celdas.

#### 4.7.2 Extracción y quema de Biogás

A diferencia de las formas de extracción y quema del biogás que se practican en los rellenos tradicionales, para un relleno metanogénico se plantea una forma más eficiente de poder hacer estas dos actividades de manera sencilla y segura.

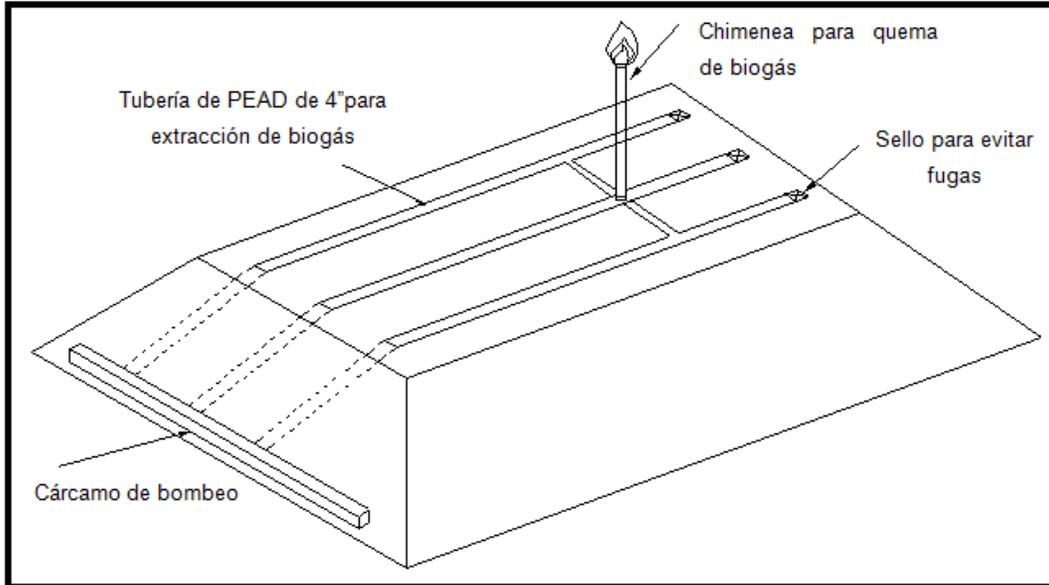
En los rellenos tradicionales, la forma de extracción se realiza mediante la construcción de pozos verticales que van desde la base del relleno (aproximadamente), hasta sobresalir de la celda para su posterior quema, de esta forma, se tenían varios quemadores por celda; estos terminaban siendo muy poco efectivos debido a que el radio de captación de biogás dentro de las celdas es escasamente eficiente, esto es a que solo se puede extraer el biogás circundante a estos pozos, quedando muchas zonas de la celda donde el biogás se quedaba atrapado siendo un gran pasivo.

El procedimiento que se propone para una eficiente captación y quema de dichos gas es, colocar tuberías horizontales sobre los residuos al término de llenado de cada celda, las tuberías (ranuradas) que se recomiendan tanto para extracción de lixiviados y recirculación de biogás son, polietileno de alta densidad PEAD debido a que estas pueden llegar a soportar grandes deformaciones debido a los posibles asentamientos que lleguen a existir ocasionados por la degradación de los residuos (acelerado por la recirculación de lixiviados).

No solo basta con dar una mejor humedad a los residuos aprovechando la recirculación con un método adecuado para que degraden con mayor eficacia y rapidez la materia orgánica que es la principal aportadora en la generación de biogás, también hay que dotar de un sistema de captación y extracción adecuado de biogás ya que como se mencionó, este empieza a generarse a edades tempranas en comparación con un relleno tradicional, es por esto que no basta con realizar la extracción como tradicionalmente se hace mediante tambos colocados según distintos criterios a ciertas distancias unos de otros.

La forma propuesta para una extracción efectiva de este gas es mediante tuberías en forma horizontal (Sánchez, 2003) y que posteriormente se conectarán a una de mayor tamaño que se encargará de ir recolectando el biogás que se va generando por cada celda para su extracción y quema; esta opción se toma debido a que por las cantidades y situación económica de estos sitios es imposible aprovecharla como método de aprovechamiento.

El diseño y propuesta de colocación de las tuberías para la captación y quema de biogás se muestra en la Figura 11.



**Figura 11 Propuesta de captación de biogás (horizontal).**

El método para poder colocar dichas tuberías al igual que en la recirculación consiste en hacer zanjas sobre los residuos al final de cada celda solo con la diferencia de que estas zanjas para la captación de biogás debe estar más próximas a la superficie de las celdas a comparación de las consideradas para la recirculación.

El diseño debe ayudar a maximizar la conversión del metano para poder minimizar la liberación del metano no quemado y cualquier producto de la oxidación incompleta tal como el monóxido de carbono. En la Tabla 21 se presentan los productos indeseables debidos a la combustión del biogás.

**Tabla 21 Productos indeseables de la combustión del biogás.**

Productos Indeseables	Mecanismo de formación
CO	Requiere para una oxidación completa $T > 850^{\circ}\text{C}$ y tiempos de residencia de $> 0.3\text{s}$ a través de la flama.
Oxidación parcialmente HC Dióxidos y Furanos Hidrocarburos policíclicos aromáticos	$T > 850^{\circ}\text{C}$ a través de la flama para prevenir la formación de estas especies a través de reordenamientos moleculares no deseados.
NO <sub>x</sub>	Formados a $T > 1200^{\circ}\text{C}$ por oxidación del N <sub>2</sub> , también formados dentro de la flama por la oxidación del nitrógeno.

Fuente: IEA Bioenergy (Bioenergy, 2000)

Sin embargo para poder maximizar las reacciones deseables y minimizar las indeseables, es necesario proporcionar las siguientes condiciones dentro de un quemador.

- Rangos de temperatura de 850 – 1200°C
- Tiempo de residencia mínimo de 0.3 segundos

Estos parámetros son fundamentales para la selección del quemador adecuado que cumpla con las especificaciones de emisiones liberadas al ambiente por la quema de biogás. Los quemadores son medios para reducir el impacto del biogás, también involucran peligros adicionales o molestias que tienen que ser considerados dentro de los análisis previos al diseño y colocación de un quemador. Las áreas que deben ser cubiertas en cualquier análisis incluyen:

- Calidad del aire local y global, además del efecto indeseable de la reacción de productos.
- Impacto visual
- Impacto auditivo
- Olores desagradables
- Explosión, incendio y asfixia

La regulación de los quemadores es gradual y esto es una anomalía. Un quemador de biogás contiene 50% de metano quemado a 1000m<sup>3</sup>/hora de biogás liberando 5MWTh de calor y esto es comparable con el tamaño de una planta considerable o procesos de incineración donde está bien definido y detallada la normativa y el control. Diversos países han aplicado estándares para los quemadores y estos usualmente toman parte de estándares operacionales y/o controles de emisiones.

#### 4.7.2.1 Normativa y estándares de operación de quemadores de biogás en Europa

El rango de estándares para condiciones de planeación tales como “flama no visibles” (llevan el proceso de operación hacia un quemador cerrado) especifican una temperatura y un tiempo de residencia mínimo para la combustión para poder minimizar la formación de productos indeseables en la combustión. En la Tabla 22 se presentan los tiempos de residencia y temperatura que se emplean en quemadores usados en relleno sanitarios en Europa.

**Tabla 22 Tiempos de Residencia y Temperaturas empleadas en Europa**

<b>Combinaciones de Tiempos de Residencia y Temperatura</b>	
Reino Unido	0.3 segundos a 1,000°C
Estados Unidos	0.6 a 1.0 segundos a 850°C
Holanda	0.3 segundos a 900°C
Alemania	0.3 segundos a 1,200 °C

El monitoreo de emisiones, particularmente de las emisiones más exóticas, no es sencillo y puede ser muy costoso. Alemania reconoce que las normas están basadas en estándares de diseño solamente. Por lo tanto, la mayoría de los países que han hecho normas sobre estándares de emisiones especifican parámetros de combustión simples y límites de emisiones para un rango de producción pequeño (tales como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, cenizas y HCl). En la Tabla 23 se presentan los límites de concentraciones empleadas por el Reino Unido.

**Tabla 23 Límites propuestos para concentración de emisiones de biogás**

<b>Límites de concentración de emisiones</b>	
Monóxido de carbono (CO)	50 mg/Nm <sup>3</sup>
Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	150 mg/ Nm <sup>3</sup>
Hidrocarburos no quemados	10 mg/ Nm <sup>3</sup>

## 4.8 Sistema de Impermeabilización

La condición que tiene un relleno sanitario es el garantizar el control de los factores que puedan causar la contaminación ambiental, entre los que destacan por su importancia los líquidos lixiviados.

El aspecto más importante de la contaminación originada por los lixiviados es el aporte de elementos tóxicos como son el plomo, el cadmio y mercurio que se desprenden de objetos tales como las baterías, residuos de fotografías y otros residuos caseros, comerciales e industriales, entre otros. Estos componentes al ser arrastrados en su forma líquida de no ser controlados de forma adecuada pueden llegar a contaminar los cuerpos de agua subterránea, es por ello que se debe tener especial atención en elegir adecuadamente el material de impermeabilización.

#### 4.8.1 Arcilla

El propósito de las capas impermeabilizantes, como bien se sabe, es minimizar o atenuar el paso de los contaminantes (lixiviados) hacia el agua subterránea. El transporte de los contaminantes a través de las arcillas puede ocurrir por adsorción y difusión. El movimiento de los solutos por adsorción es causado por el gradiente hidráulico, mientras tanto en la difusión, el movimiento es causado por una diferencia de concentración del soluto. Cuando hay una conductividad hidráulica alta, la advección es el modo de transporte dominante; cuando hay conductividad hidráulica baja, la difusión predomina (Bagchi, 2000).

Los diferentes materiales usados para la impermeabilización del sitio, se clasifican en arcillas, geotextil y geomembrana. La arcilla es esparcida en toda la base del relleno, con la ayuda de maquinaria pesada para que esta se vaya compactando; el espesor mínimo que se le dará a la impermeabilización será de 1m (NOM-083-SEMARNAT-2003).

Las propiedades mecánicas de las arcillas dependen de diferentes variables que no siempre se pueden controlar. Por eso es que se debe tener un buen control cuando se usan como sistema de impermeabilización. Los distintos tipos de arcillas que existen son cuatro: *caolinita*, *haloisita*, *illita* y *esmectita*. De estas, se debe elegir la que mejor impermeabilidad nos ofrezca así como la disponibilidad cerca del sitio donde se emplazará el relleno sanitario.

#### 4.8.2 Capacidad de amortiguamiento

La capacidad de amortiguamiento que debe de poseer la impermeabilización de un relleno sanitario debe de ser lo más alta posible para evitar con esto la contaminación de suelo y mantos acuíferos que son una de las fuentes principales de abastecimiento de agua potable de los seres humanos. Es por esto que es importante colocar capas de arcilla en la base de un relleno para evitar que los lixiviados que se generaran puedan infiltrarse hacia los acuíferos. Es por esto que las arcillas poseen la capacidad de filtrar y amortiguar el efecto de sustancias contaminantes que se encuentran suspendidas o en la solución del suelo.

Las arcillas muestran en su superficie cargas negativas por lo que pueden adsorber a ellas cationes (ya sea nutrimentos o contaminantes). Físicamente los contaminantes pueden ser adsorbidos sobre las superficies activas de las partículas pequeñas o químicamente si se forman precipitados insolubles en agua.

Cuanto menor es el tamaño de la arcilla, mayor será la capacidad de intercambio catiónico, debido a que tiene mayor superficie específica, por lo tanto adsorberán más contaminantes.

De esta manera, si el lixiviado llegara a infiltrarse al acuífero, la carga orgánica y el contenido de metales pesados estará drásticamente disminuido, aunado a que el tiempo de filtración será prolongado, por lo que tendrá un impacto ambiental menor.

Considerando todas estas características, el grupo de las arcillas esmectitas son las arcillas que tienen mayores cualidades para la impermeabilización de un relleno sanitario.

El espesor de la capa de arcilla varía según las políticas de cada país, por ejemplo Røben considera que el espesor mínimo que debe cumplir la capa de arcilla debe ser entre 60 y 80 cm, mientras que la NOM-083-SEMARNAT-2003 indica que debe ser de 1m.

#### 4.8.3 Geotextil

El geotextil es un material textil permeable comúnmente hecho a base de poliéster o polipropileno, este es usado como parte integral en la impermeabilización de rellenos sanitarios ya que sirve como barrera para atrapar material granular que pueda obstruir los sistemas de recolección de lixiviados. También sirve de capa protectora entre la geomembrana y suelos granulares debido a que pueden existir objetos dentro de los mismos residuos que por punzonamiento (perforación o desgarre) puedan ocasionar infiltración de lixiviado.

Este material es un producto fabricado a base de fibras sintéticas no biodegradables, enlazadas entre sí por medio de procesos mecánicos y térmicos. Se caracteriza por su estructura permeable, y su gran resistencia a la tensión, desgarre y deterioro químico; cabe resaltar que otra de las funciones básicas que los geotextiles proporcionan es, evitar que se tapen las perforaciones de las tuberías de captación y conducción de lixiviados. En la Figura 12 se muestra el extendido y colocado del geotextil.

Dentro de las ventajas que hacen viable el uso de este tipo de material se encuentran:

- Son versátiles, flexibles, resistentes y se adaptan a las irregularidades de las superficies y condiciones donde se colocan.
- Son de fácil y rápido manejo y aplicación, y no requieren de equipo especializado.
- Tienen una amplia variedad de aplicaciones en la construcción y aumentan la vida útil de las instalaciones donde se colocan.



**Figura 12 Colocación de geotextil**

Fuente: (ML, 2003)

El geotextil a emplear para este relleno sanitario se seleccionó de acuerdo a las características que presentaba tales como: tamaño de poro, permeabilidad, resistencia a la perforación, entre otras. Así también como a los costos entre distintas clases de geotextil fue la que más se adecuó a las necesidades del sitio. Por tanto, el tipo de geotextil será 275 g/m<sup>2</sup> y sus características principales se presentan a continuación en la Tabla 24.

**Tabla 24 Propiedades del GEOTEXTIL 275 gr/m<sup>2</sup>**

PRUEBA	METODO	UNIDAD	GEOTECH 275
Masa por unidad de área	ASTM D-5261	(gr/m <sup>2</sup> )	275.30
Resistencia a la tensión	ASTM D-4632	N	MD 724
Porcentaje de elongación	ASTM D-4632	%	MD 97
Entallamiento Mullen	ASTM D-3786	kPa	1758
Resistencia a la perforación	ASTM D-4833	N	355
Desgarre trapezoidal	ASTM D-4533	N	MN 210
Tamaño de poro	ASTM D-4751	US sieve (mm)	30 (0.090)
Permeabilidad	ASTM D-4491	cm/seg	0.01
Flujo	ASTM D-4491	l/min/m <sup>2</sup>	5923
Resistencia UV (500hr)	ASTM D-4355	%str. ret.	70

FUENTE: ML Ingeniería (ML, 2003)

#### 4.8.4 Geomembrana

Las membranas sintéticas se colocan como sistema de impermeabilización cuando no existe una barrera geológica natural que cumpla con las condiciones de impermeabilidad que exige la norma.

La geomembrana sintética de alta densidad es una combinación de polímeros con diferentes aditivos termoplásticos que producen una lámina de baja permeabilidad ( $1 \times 10^{-10}$  cm/seg), diseñada específicamente para retener sustancias agresivas como los lixiviados. Normalmente los espesores varían de 0.5 a 3mm.

Existen diferentes tipos de geomembranas las cuales cambian sus propiedades mecánicas y físicas según la marca. Las geomembranas en general son de buena calidad y cumplen adecuadamente con su función, pero en algunos casos hay rollos que tienen un porcentaje de error y eso provoca que se vayan haciendo fisuras y el lixiviado vaya percolando.

Estos tipos de geocompuestos se fabrican con baja permeabilidad y un coeficiente de adsorción alto, el cual permite retener por más tiempo el lixiviado, evitando con esto la contaminación de suelos y acuíferos. Además de poder realizar un monitoreo ambiental con el fin de cuidar la contaminación de otros ambientes.

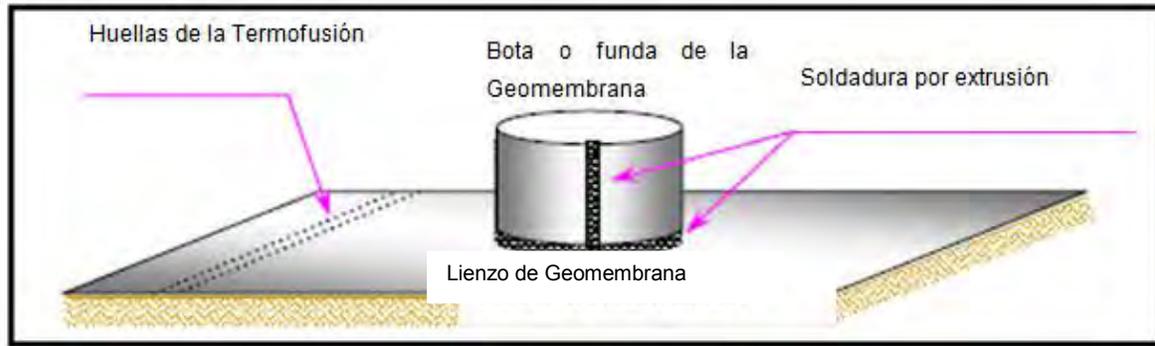
El tipo de geomembrana que se recomienda es de polietileno de alta densidad EML-40, desarrollada para aplicaciones en condiciones severas de sollicitación química y física. Posee una excelente impermeabilidad y, alta resistencia contra el rompimiento causado por agentes químicos agresivos. En la Tabla 25 se presentan las propiedades más importantes que tiene material.

**Tabla 25 Propiedades de la geomembrana EML-40**

Prueba	Método	Unidad	EML-40
Espesor	ASTM D5 199	mm	1.00
Densidad	ASTM D 792	g/cm <sup>3</sup>	≥ 0.94
Tensión elástica		kN/m	15.00
Tensión de ruptura		kN/m	27.00
Resistencia al desgarre	ASTM D 1004	N	125.00
Resistencia al punzonamiento	ASTM D 4833	N	320.00

FUENTE: ML Ingeniería (ML, 2003)



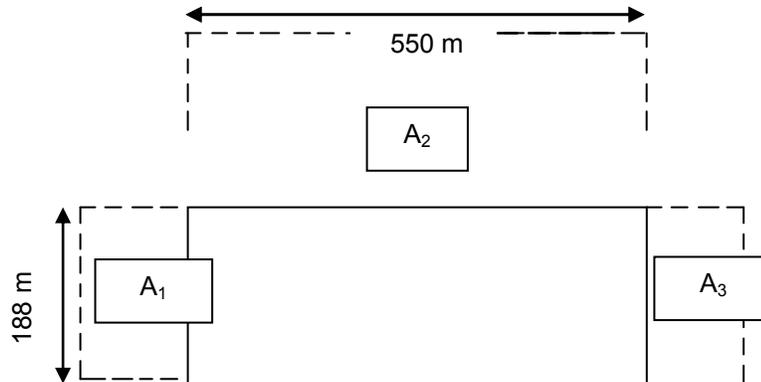


**Figura 15 Soldadura por extrusión**  
Fuente: ML Ingeniería

Con ambas máquinas se realizan pruebas antes de ser utilizadas por el personal técnico comprobando su soldadura a través de un tensiómetro. Las pruebas se denominan PEEL (comprobación de las soldaduras por fusión y extrusión) y SHEAR (comprobación a la tensión y resistencia del material) Método de prueba ASTM D6392.

## 4.9 Manejo de aguas pluviales

El sistema de drenaje diseñado deberá captar las aguas pluviales provenientes de escurrimientos de terrenos aledaños al sitio en donde se construirá el relleno sanitario, considerando para este fin, las áreas de influencia en la periferia del terreno de una magnitud equivalente a la cuarta parte de la destinada para el relleno, como se muestra en la Figura 16.



**Figura 16 Áreas de influencia para el drenaje pluvial**

Las consideraciones realizadas para la propuesta de las áreas de influencia mostradas en la figura, son las siguientes:

El terreno ubicado en la parte norte del sitio donde se emplazará el relleno sanitario, forma parte de una depresión, el flujo de escurrimientos provenientes de ese sitio será escaso.

Las áreas de influencia consideradas tendrán la siguiente superficie:

$$A_1 = A_2 = A_3 = \frac{1}{4}(188 \times 550) = 25,850 \text{ m}^2$$

Los gastos pluviales, se calcularán de acuerdo al Método Racional Americano y al Método de Burkli-Ziegler.

La fórmula aplicada para el Método Racional Americano es la siguiente:

$$Q = 2.778CiA \dots \dots \dots Ec. (24)$$

En donde:

Q= gasto pluvial (lps)

C= Coeficiente de escurrimiento

I= Intensidad de lluvia (mm/h)

A= Área a drenar (ha)

2.778= Coeficiente de uniformización de unidades utilizadas para obtener el gasto en lps

El coeficiente de escurrimiento para el sitio de proyecto es de 0.13, mientras que la intensidad de lluvia de acuerdo a la zona de estudio es de 80mm/h.

De tal manera que:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = 2.778(0.13)(80\text{mm/h})(2.585\text{ha}) = 75 \text{ lps}$$

La fórmula aplicada para el Método de Burkli-Ziegler es la siguiente:

$$Q = 2.778 C_i A^{3/4} S^{1/4} \dots \dots \dots Ec. (25)$$

En donde:

Q= gasto pluvial (lps)

C= coeficiente de escurrimiento

i = intensidad de lluvia (mm/h)

A= área a drenar (ha)

S= Pendiente media en milésimas

Para este caso, la pendiente máxima del terreno es de 19 milésimas, por lo tanto:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = 2.778(0.13)(80)(2.585^{3/4})(19^{1/4}) = 123.41\text{lps}$$

De tal manera, el flujo que se considerará para el diseño de la red de canaletas para el drenaje pluvial será el calculado por medio del Método de Burkli-Ziegler.

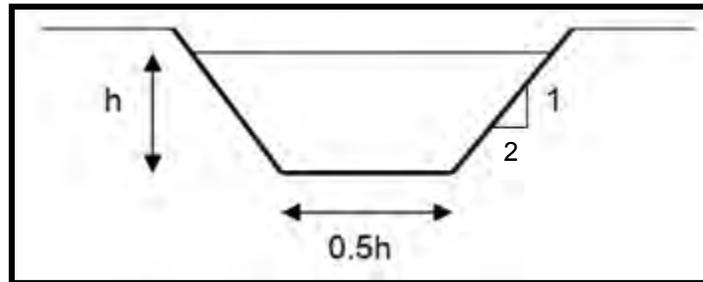
Para calcular una sección de las canaletas que les dé una capacidad hidráulica suficiente para poder desalojar el gasto de aguas pluviales que a ellas llega, se empleará la fórmula de Manning:

$$Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \dots \dots \dots Ec. (26)$$

Donde:

- A: Área hidráulica del canal
- n: Rugosidad de la pared
- $R_h$  : Radio hidráulico
- S: Pendiente

La sección que se propone es del siguiente tipo:



En donde:

$$A = \frac{(0.5h + 4h + 0.5h)h}{2} = \frac{5h^2}{2} = 2.5h^2$$

El perímetro mojado es:

$$P = 0.5h + 2h\sqrt{5}$$

Por lo tanto:

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{5h^2/2}{0.5h + 2h\sqrt{5}} = \frac{5h}{1 + 4\sqrt{5}}$$

$$R_h^{2/3} = 0.63h^{2/3}$$

Sustituyendo en la ecuación de Manning:

$$Q = \frac{2.5h^2}{n} 0.63h^{2/3} S^{1/2}$$

Ecuación que servirá para calcular las secciones de las canaletas para el drenaje del relleno sanitario.

Para la canaleta tipo 1, se tiene que el gasto a desalojar es el acumulado por las áreas 1 y 2 (ver Figura 16), es decir,  $Q = 246.82 \text{ lps} = 0.246 \text{ m}^3/\text{s}$ . La pendiente según las características del terreno será del 0.6%, y la rugosidad “n” será de 0.013 (concreto).

Para la canaleta tipo 3, se tiene que el gasto a desalojar es el acumulado en el área 1, que es igual al de la 2, es decir  $Q = 123.41 \text{ lps} = 0.123 \text{ m}^3/\text{s}$ . La pendiente para este caso será del 1%, y la n será de 0.013 (concreto).

Las dimensiones de las secciones hidráulicas de las canaletas se muestran en la Tabla 26.

**Tabla 26 Dimensiones de la sección hidráulica de las canaletas para el drenaje pluvial**

canaleta	h (m)	5h (m)
Tipo 1	0.26	1.3
Tipo 2	0.10	0.50
Tipo 3	0.18	0.90

La canaleta tipo 2, se pone para desalojar los escurrimientos que pudieran presentarse en la parte norte del terreno, como se menciona, serán mínimos. Adicionalmente, es recomendable considerar un bordo libre de 5cm como medida de seguridad para cualquier eventualidad.

#### 4.10 Selección de Maquinaria

Uno de los pasos más importantes en la construcción de un relleno sanitario es la selección de maquinaria, ya que en la actualidad debido a sus altos costos, son pocos los rellenos que tienen equipos de reserva; por eso las capacidades de respaldo de servicio y repuestos del distribuidor que vende las máquinas es una consideración primordial al comprar el equipo. La versatilidad es otro factor importante en la selección de maquinaria, mientras más trabajo pueda hacer una máquina, menos necesidad hay de adquirir otros equipos.

Para la selección del tamaño, número y combinación de maquinaria, es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Tonelaje y tipos de desechos a manejar. El tonelaje diario es una variable principal al momento de escoger la maquinaria, teniendo principal influencia en el número de máquinas necesarias, por ejemplo en un relleno donde se generen 180 toneladas métricas de residuos diarios, el operador debe considerar un tractor de cadenas de peso y potencia medianos.

- Cantidad, distancia y tipo del material de cobertura. Este factor es de gran importancia para la selección de la maquinaria, tomando en cuenta el material de cobertura que será excavado y el volumen. Por ejemplo, si el material es arenoso y abrasivo, un cargador de ruedas de neumáticos funciona mejor que una máquina de cadenas.
- Tipo de relleno sanitario. El método del relleno puede determinar la adaptabilidad de las máquinas. Por ejemplo, los compactadores de rellenos sanitarios proporcionan una mejor compactación en un terraplén donde el terreno es llano o suavemente ondulado, mientras que un tractor de cadenas puede trabajar en pendientes más pronunciadas y para el método de zanja, el cargador de cadenas es una buena elección.
- Necesidades de compactación. Debido al incremento de residuos, la compactación tiene mayor importancia a medida que se busca alargar la vida útil de los rellenos sanitarios. Por ejemplo cuando se requiere una alta densidad, es recomendable un compactador de rellenos sanitarios.
- Condiciones climáticas. Para las condiciones climatológicas se puede requerir usar máquinas de cadenas, para maniobrar en terrenos húmedos y difíciles, tales como lluvia o nieve.
- Presupuesto. Este es uno de los factores de mayor importancia, ya que de acuerdo al presupuesto se limita la compra del equipo necesario.

Con el fin de tener un solo equipo y tomando en cuenta la cantidad que se disponen de residuos sólidos, se determinó contar con un tractor sobre orugas, el cual por sus características dará una gran independencia al relleno sanitario, lo que se traducirá en mayores niveles de eficiencia durante la operación del mismo.

El tractor de orugas deberá contar con una potencia tal que le permita manejar sin problemas las 55 toneladas por día (2008) que se generan en los municipios de Atoyac, Benito Juárez y Técpan de Galeana; y las 59.7 toneladas para el año 2019. Para determinar las características del equipo mecánico sobre orugas, que debe manejar 50 a 100 toneladas por día de residuos sólidos, se acudirá a estudios donde se reportan eficiencias y rendimientos para este tipo de actividades.

De acuerdo a las experiencias latinoamericanas (A.C., 1997), se señala lo siguiente; *un tractor de 142 HP y 14 toneladas de peso, trabaja una tasa de disposición final: 412 toneladas por día.*

Los datos anteriores sugieren que el rendimiento horario de dicho tractor es aproximadamente de 50 ton/hr, lo cual implica una relación de rendimiento/potencia de: 2.94 HP/ton de residuos sólidos en una hora, de tal manera que si se requieren disponer 55 toneladas de residuos sólidos en un turno de 8 horas, a una tasa de 6.9 ton/hr, se requerirá un tractor con la siguiente potencia:

$$HP = 2.94 \frac{HP}{ton} hora \times 55 \frac{ton}{dia} \times \frac{dia}{8 hora} = 20.21HP$$

Es decir, aparentemente con un equipo de aproximadamente 20.21 HP en el volante, sería suficiente para confinar 55 toneladas de basura en un turno de 8 horas.

Según información reportada por Caterpillar, el tractor sobre carriles más pequeño es el “D-3”, el cual tiene una potencia de 65 HP y un peso de 6.1 toneladas, por lo que puede manejar hasta 35 toneladas en un turno de 8 horas de trabajo continuo, alcanzando compactaciones de 700 a 900 kg/m<sup>3</sup>. Si utilizáramos este tipo de equipos, se necesitarían dos unidades para operar el relleno sanitario en estudio. Lo cual parece no ser acorde con la cantidad que se maneja en los rellenos pequeños.

Asimismo, de acuerdo a la OMS se reporta que para manejar hasta 140 toneladas por hora de basura en un relleno sanitario, se requiere de un tractor de orugas o de neumáticos con un peso bruto de 15 a 30 toneladas.

De todo lo anterior, se desprende que para manejar alrededor de 55 toneladas en un turno de 8 horas de trabajo, en el relleno sanitario en estudio, se requiere un tractor sobre orugas o sobre neumáticos, de por lo menos 60 HP de potencia en el motor y con más de 30 toneladas de peso bruto.

Sin embargo, para precisar en términos de rendimientos las necesidades de equipo para el relleno sanitario, utilizaremos las cifras reportadas para un tractor de orugas de 65 HP (Caterpillar “D-3”), que a continuación se indican:

- Rendimiento con basura: 20 m<sup>3</sup>/hr
- Rendimiento con tierra: 9 m<sup>3</sup>/hr

El volumen de residuos sólidos descargados en el relleno, asignándole un peso volumétrico de 0.60 ton/m<sup>3</sup>, tenemos:

$$PV = \frac{55 \text{ ton/día}}{0.60 \text{ ton/m}^3} = 91.667 \text{ m}^3/\text{día}$$

La cantidad de material de cubierta necesaria para cubrir los residuos sólidos será:

$$\text{Material de cubierta} = \frac{55 \text{ ton/día}}{0.85 \text{ ton/m}^3} = 12.94 \text{ m}^3/\text{día}$$

La relación de rendimiento referida al tractor Caterpillar “D-3” de 65 HP de potencia al volante, será de:

$$\left( \frac{91.67}{20} + \frac{12.94}{9} \right) \times \frac{1}{8} = 0.75$$

Lo anterior implica que se requerirá un tractor “D-3”, para operar el relleno. Con base en las referencias y cálculos determinados anteriormente, se recomienda la adquisición de un tractor sobre cadenas de 130 HP de potencia en el volante, tipo Caterpillar D5H, con 15 toneladas de peso, para la operación del relleno sanitario y las características mencionadas en la Tabla 27.

**Tabla 27 Características del tractor sobre cadenas**

Característica	Unidad	D5H
Potencia en el volante	HP	130
Peso en orden de trabajo	Kg	14,939
Modelo de motor		3304
RPM del motor		2200
Número de cilindros		4
Calibre	mm	121
Carrera	mm	152
Cilindrada	L	7
Rodillos inferiores (cada lado)		6
Ancho de zapata estándar	mm	510
Largo de cadena en el suelo	m	2.31
Área de contacto con el suelo (con zapata estándar)		
Entrevía	m <sup>2</sup>	2.35
	m	1.80
Dimensiones principales		
Altura (parte superior desguarnecida)		
Altura (incluye cabina ROPS)	m	2.13
Longitud total (con hoja S)	m	2.98
(sin hoja)	m	4.53
Ancho (con muñón)	m	3.60
(sin muñón)	m	2.54
Espacio libre sobre el suelo	m	2.31
	mm	390
Tipos y anchos de hoja:		
Recta		
Semiuniversal	m	2.95
Universal	m	-
Capacidad de la hoja (SU con reja para basura)	m	-
Capacidad de llenado del tanque de combustible	m <sup>3</sup>	-
	L	246

Fuente: Caterpillar (Caterpillar, 2008)

El tractor debe estar provisto de hoja topadora, cabina de mandos y bandas de carriles. La hoja topadora, permitirá extender los residuos en capas uniformes, mientras que las orugas los desmenuzan y compactan.

Cabe aclarar que semanalmente, este equipo deberá ser apoyado durante 8 horas, por un vehículo de volteo, para hacer llegar al frente de trabajo, el material de cubierta y para sellar diariamente las celdas con basura.

Por otra parte, con el crecimiento de la zona que se contempla en el relleno sanitario implica una diferencia de 5 ton/día a manejar por el equipo, lo cual será perfectamente cubierto con este equipo.

Además del tractor sobre cadenas, es necesario contar con un compactador pata de cabra para poder dar la compactación requerida de 600kg/m<sup>3</sup> marcada por la norma. También se considera la adquisición de un camión de volteo el cual se encargue de trasladar el material de cobertura hasta el sitio. Las especificaciones de estos dos equipos se presentan en la Tabla 28 y la Tabla 29.

**Tabla 28 Características del compactador pata de cabra**

Característica	Unidad	
Potencia en el volante	HP	315
Peso en orden de trabano	Kg	36,967
Modelo del motor		C15 ACERT
Calibre	mm	137
Carrera	mm	171
Factor de operación	Fo	0.85
Tipo de combustible		DIESEL
Capacidad del cárter	Lt	8
Factor de rendimiento	Fr	0.88
Cambio de combustible	hr	200
Ruedas- Diente de punta cruciforme		
Ancho del tambor	mm	1532
Diámetro con puntas	mm	1850
Puntas con rueda		24

Fuente: Caterpillar (Caterpillar, 2008)

**Tabla 29 Características del camión de volteo**

Característica	Unidad	
Potencia nominal	HP	170
Factor de operación	Fo	0.85
Tipo de combustible		GASOLINA
Capacidad del cárter	Lt	20
Factor de rendimiento	Fr	0.88
Cambio de combustible	hr	200

Fuente: Caterpillar (Caterpillar, 2008)

#### 4.11 Monitoreo Ambiental

Para poder determinar la efectividad de cualquier sistema de control existente, para evaluar la necesidad de instalar otro adicional o para obtener la información requerida para su diseño, es necesario o deseable obtener una medida de la concentración y naturaleza de las emisiones de los rellenos sanitarios.

Este apartado lleva la intención de sugerir los lineamientos de un procedimiento estándar para el estudio de las emisiones provenientes de los rellenos sanitarios. Algunos de estos procedimientos ha sido necesario comenzar a aplicarlos en forma estándar y posteriormente adaptarlos al caso específico de los rellenos sanitarios, de los residuos sólidos o de las condiciones específicas bajo consideración.

El monitoreo ambiental de un relleno sanitario, debe ser un instrumento de vigilancia de las condiciones que pueden afectar la salud pública o el ambiente.

Una vez que se ha decidido establecer un sistema de monitoreo, se debe considerar que los lineamientos establecidos en este documento, están concebidos como ayuda para operadores de rellenos en el diseño e implementación de programas de monitoreo ambiental, tal como lo establecen los criterios internacionalmente aceptados para el manejo de rellenos sanitarios. Además, cabe mencionar que los programas de monitoreo exitosos, pueden posibilitar a los operadores de rellenos para demostrar que sus sitios reúnen dichos criterios de ejecución, y más aún, ayudarán a prevenir los impactos ambientales inaceptables o negativos a lo largo de la vida útil del relleno.

#### 4.11.1.1 Monitoreo de Lixiviados

El monitoreo de lixiviados se debe de llevar a cabo para determinar la composición de este contaminante y compararlo con los datos estándar. Así mismo, se tienen que realizar monitoreo de las aguas subterráneas antes y después del relleno (según la dirección de estas aguas) para poder detectar si estas han sido contaminadas por lixiviados. De esta manera, si se observa un cambio estadísticamente significativo en un parámetro, se podrá iniciar el diseño de un plan para una investigación más exhaustiva y el establecimiento de una acción correctiva.

Los factores que afectan la calidad y cantidad del lixiviado, incluyen:

- Edad de los residuos.
- Tipo y composición química de los residuos.
- Humedad de los residuos.
- Régimen de clima, humedad y precipitaciones (efectos estacionales).
- Compactación, procesamiento y otros aspectos de la operación del sitio de disposición final.
- Temperatura y pH en el sitio.
- Presencia de grandes cantidades de lodos municipales e industriales.
- Espesor de la capa de residuos.
- Permeabilidad, espesor, compactación y pendiente de la capa de cobertura de sello.

#### 4.11.1.2 Parámetros a Monitorear.

1. El control del drenaje de la superficie de los taludes y plataformas del tiradero es de gran importancia, ya que es uno de los factores de los cuales depende la producción de lixiviados, así como la estabilidad de las estructuras.

Debido a esto, es necesario que en el tiradero se evite al máximo la saturación excesiva de los residuos sólidos, mediante la colocación de material de cubierta, y el tendido de drenes, con el fin de:

- Reducir la entrada del agua al sitio.
- Desalojar el agua que se infiltre de manera inevitable.
- Que el agua no circule en cantidades excesivas dentro del mismo, destruyendo el material de cubierta y originando la formación de charcos.
- Que los cortes y taludes no se saturen de agua, ya que pueden originar erosión de la cubierta final, deslizamientos o derrumbes.

Las obras de drenaje superficial consideradas para el sitio seleccionado, comprenden la construcción de canales, aprovechando al máximo las líneas de corriente naturales.

2. Migración de Lixiviados. Un buen desarrollo de clausura del relleno contribuirá a la reducción de la generación de lixiviados. No existe técnica que elimine absolutamente la producción de lixiviados ya que éstos no representan grandes problemas, a menos que migren desde el punto de generación hacia las aguas superficiales o subterráneas, o de forma libre se viertan al suelo.

La migración de lixiviados ocurre cuando se satura una propiedad conocida como la Capacidad de Campo, dicha condición se refiere a la capacidad de un material para retener humedad libre en contra de la fuerza de gravedad. Una vez que se alcanza la Capacidad de Campo, la migración de lixiviados puede iniciarse. La Capacidad de Campo no es lo mismo que Saturación, en donde todos los espacios están llenos de agua.

El lixiviado puede migrar a la superficie del suelo (base del tiradero) o hasta el agua subterránea (normalmente a lo largo de pendientes, escurrimientos o fisuras).

La descarga superficial normalmente ocurre a lo largo de la base de taludes, en el punto más débil en un sistema de cubierta o donde el suelo tiene la mayor permeabilidad. El uso de suelos impermeables como cubiertas diarias o intermedias puede originar escurrimientos a los lados del tiradero. Los escurrimientos superficiales de lixiviados pueden producir:

- Olores y condiciones desagradables.
- Contaminación potencial del agua superficial.
- Infiltración del lixiviado al agua subterránea.
- Impacto a la flora y fauna del sitio.

Si se presenta un escurrimiento, generalmente aparecerá como una descarga oscura de color café rojizo y olor fétido donde, frecuentemente aparecen burbujas. Una vez que la descarga se detiene, el suelo presenta una mancha de color café rojizo.

#### 4.11.1.3 Parámetros y métodos de Análisis Recomendados y Frecuencia

La periodicidad del muestreo, permitirá detectar en corto tiempo, cualquier posible aumento en las concentraciones de las sustancias presentes en el acuífero, lo que favorecerá la oportuna aplicación de medidas tendientes a evitar la contaminación de las aguas subterráneas. En la Tabla 30 se presenta la frecuencia del monitoreo que debe hacerse para determinar cualquier tipo de contaminación.

**Tabla 30 Programa propuesto de monitoreo en lixiviados**

PARÁMETRO	EQUIPO	TÉCNICA RECOMENDADA	FRECUENCIA
pH	Potenciómetro	Lectura directa en campo	Trimestral
Conductividad eléctrica	Conductímetro	Lectura directa en campo	Trimestral
Oxígeno disuelto	Oxímetro	Lectura directa en campo	Trimestral
Metales pesados	Espectrofotómetro de adsorción (dob) atómica con accesorios	Adsorción atómica	Trimestral
DQO y DBO <sub>5</sub>	Equipo y material de laboratorio para determinación de DBO y DQO	DQO-Titulación (NMX-30-1981) DBO-Incubación durante cinco días a 20°C (NMX-AA-28-1981)	Trimestral

Fuente: Solid Waste Association of North America. (America, 1991)

Los componentes principales de los lixiviados y las concentraciones de los mismos encontrados en sitios de disposición final de residuos sólidos municipales se muestran en la Tabla 31 y Tabla 32.

**Tabla 31 Parámetros Indicadores para Monitoreo de Lixiviados.**

PARÁMETRO	INTERVALO (mg/L)
pH	5.3 - 8.5 (u)
DQO	3,00 - 45,000
Cloruros	100 - 3,000
Nitritos	10 - 800
Nitrógeno amoniacal	100 -1,500

Fuente: Solid Waste Association of North America (America, 1991)

**Tabla 32 Ámbitos Encontrados en Lixiviados, Generados**

COMPONENTE	ÁMBITO (mg/L O PPM)
Alcalinidad Total como CaCO <sub>3</sub>	4,000 - 25,540
Arsénico	0.04
Cadmio	0 - 0.025
Calcio	100 - 320
Cianuros	0
Cinc	25- 3.0
Cloruros	1,325 - 8,870
Cobre	0 - 0.6
Conductancia Específica	7,400 - 32,000 en $\mu$ mhos/cm
Cromo Total	0 - 8.7
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	380 - 52,000
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	1,870 - 62,320
Dureza Total	1,800 - 11,000
Fluoruros	0.8
Fósforo Total	
Hierro Total	7- 1,600
Magnesio	396 - 995
Manganeso	5- 4.0
Mercurio	0.008
Nitratos	0
Nitritos	2- 1.2
Nitrógeno Amoniacal	5- 1,420
Nitrógeno Orgánico	46 - 1,889
Oxígeno Disuelto	0
Potencia de Hidrógeno (pH) (sin unidad)	6.3 - 7.9
Plomo	0 - 2.0
Potasio	365 - 1,270
Sólidos Totales	1,700 - 16,460
Sodio	490 - 4,920
Sulfatos	40 - 1,000
Fenol	18
Detergentes (SAAM)	7- 233
Turbiedad	128 - 1,500 en UNT

Fuente: González Urdela J. Lorenzo. (González, 2000)

Para poder evaluar la calidad del lixiviado generado en el relleno sanitario y su afectación potencial a las aguas subterráneas, se debe efectuar el monitoreo para ambos factores. El monitoreo consiste en una serie de programas que incluyen las siguientes actividades:

- Ubicación de pozos.
- Diseño de pozos.
- Selección de métodos y programas de muestreo.
- Selección de parámetros a monitorear y técnicas de laboratorio.
- Toma de muestra.
- Análisis de laboratorio (físico, químico y bacteriológico).
- Evaluación de resultados.

Para la realización de dichos monitoreos, se tiene que contratar un Laboratorio Ambiental Certificado, mismo que realizará el muestreo y análisis correspondiente tomando en cuenta las normas y técnicas analíticas vigentes para dichos análisis.

#### 4.11.1.4 Monitoreo de Biogás

El monitoreo del Gas de los Rellenos (GR) o Biogás tiene la intención de detectar sus emisiones inaceptables, resultantes de las operaciones del relleno. El metano (CH<sub>4</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) son los mayores constituyentes del gas que se genera de la descomposición de los residuos depositados en los rellenos, sin embargo también contiene otros gases en cantidades traza, que incluyen compuestos orgánicos no-metánicos (CODM's), ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), nitrógeno (N<sub>2</sub>), hidrógeno (H<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>).

Todos los sitios de disposición final deben ser monitoreados, para detectar la presencia de biogás y determinar si este se encuentra en concentraciones que signifiquen un riesgo inaceptable para la salud humana y el ambiente. El área entre los sitios de disposición de residuos y las áreas habitacionales vecinas debe monitorearse, para poder determinar si los gases generados en el relleno, están migrando en esa dirección, en concentraciones no aceptables. Es recomendable, monitorear la presencia de los constituyentes del biogás en todos los sitios, antes de que se inicie la disposición de los primeros residuos recibidos. Esto permitirá la identificación de cualquier otra fuente de gas para las condiciones de fondo, evitando así cualquier interpretación errónea de resultados futuros.

#### 4.11.1.5 Parámetros a Monitorear.

1. Desplazamiento del biogás es el movimiento de este dentro de los estratos del relleno y depende de:

- Espesor de los estratos y edad de los residuos sólidos.
- Composición física de los residuos sólidos depositados.
- Características de permeabilidad del terreno y del material de cubierta.
- Características del suelo.
- Porcentaje de compactación de los residuos y del material de cubierta.
- Características de permeabilidad del suelo adyacente al tiradero.

2. Evaluación del suelo para detectar la presencia del biogás es la migración de este hacia zonas no controladas y puede detectarse de la siguiente forma:

- Percibiendo su olor característico.
- Revisando fracturas o grietas de la cobertura mediante una explosímetro.
- Observando incendios o desprendimiento de vapores en el tiradero.
- Muestreando el sitio donde se sospeche que hay emigración de biogás.

Respecto al muestreo, se tiene las siguientes recomendaciones

- Las pruebas iniciales se realizaran normalmente entre 30 y 45 cm, bajo la superficie del suelo del sitio debido a la capacidad limitada del equipo de prueba.
- Las pruebas se deben realizar principalmente, en el perímetro de las zonas habitacionales.
- Monitorear la concentración de esos gases en el aire, a fin de determinar su grado de toxicidad.
- Preferentemente se tomarán muestras a 250 y 500 m en línea recta en la dirección de las zonas habitadas; estas distancias se consideran adecuadas para la medición de la variación en el contenido de metano en el aire, ya que pueden ser suficientes para propósitos de dilución del biogás en la atmósfera.

Existen varios factores que determinan la producción del biogás, entre los que se destacan:

- Contenido orgánico de los residuos.
- Humedad disponible.
- Composición de los residuos.
- Tamaño y densidad de los residuos.
- pH y temperatura.
- Contenido de oxígeno.

El principal riesgo del biogás se presenta cuando éste se mezcla con el aire en concentraciones del 5 al 15%, originando explosiones o incendios. En este sentido, el monitoreo del biogás sirve para determinar si el gas está presente en concentraciones de riesgo para la salud humana y el ambiente. En la Tabla 33 y Tabla 34, se presenta una composición tipo de los gases producidos en un tiradero.

**Tabla 33 Composición de los Gases Producidos en un relleno**

TIEMPO TRANSCURRIDO (MESES)	COMPOSICIÓN DE LOS GASES (%)		
	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
0 – 3	5.2	88	5
3 – 6	3.8	76	21
6 – 12	0.4	65	29
12 – 18	1.1	52	40
18 – 24	0.4	53	47
24 – 30	0.2	52	48
30 – 36	1.3	46	51
42 – 48	0.4	51	48

Fuente: Brunner R. Dirk y Keller J. Daniel. (Brunner, y otros)

**Tabla 34 Componentes Típicos Encontrados en el Biogás.**

COMPONENTE	PORCENTAJE (BASE SECA)
Metano	45-60
Dióxido de Carbono	40-60
Nitrógeno	2-5
Sulfuros, Disulfuros, Mercaptanos, etc.	0.1-1.0
Amoniaco	0-1.0
Hidrógeno	0-0.2
Monóxido de Carbono	0-0.2
Constituyentes Traza	0.01-0.6
CARACTERÍSTICA	VALOR
Temperatura	37-67 °C
Densidad específica	1.02-1.06
Contenido de humedad	Saturado
Poder Calorífico Superior (Kcal/m <sup>3</sup> )	890-1223

Fuente: Tchobanoglous George (Tchobanoglous, y otros, 1993)

El monitoreo de biogás, se debe llevar a cabo como ya se indicó en el interior del tiradero mediante los pozos para venteo, y en el exterior del mismo, mediante las actividades de monitoreo, dependiendo de las características del suelo determinadas en los estudios básicos; con esto se podrá conocer la posible migración de los gases a través de oquedades, fracturas y capas permeables del subsuelo hacia las zonas aledañas al sitio.

#### 4.11.1.6 Métodos de Análisis Recomendados y Frecuencia.

El programa de monitoreo de biogás, incluye los parámetros por analizar, técnica recomendable y periodicidad, los cuales se muestran en la Tabla 35:

**Tabla 35 Parámetros Considerados en el Programa de Monitoreo de Biogás.**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>TÉCNICA RECOMENDADA</b>	<b>NORMA APLICABLE</b>	<b>PERIODICIDAD RECOMENDADA</b>
Composición Metano Dióxido de carbono Oxígeno Nitrógeno	Cromatografía de gases.	No existe	Trimestral
Flujo Explosividad y toxicidad	Lectura en campo con explosímetro digital y flujómetro.	No existe	Mensual

Fuente: (INCREMI, 1996)

#### 4.11.1.7 Mantenimiento del Sitio Clausurado

La última etapa de un plan de clausura incluye las instalaciones de supervisión ambiental, que son necesarias para asegurar el buen funcionamiento del relleno con respecto a la emisión incontrolada de contaminantes al ambiente.

En la mayoría de los casos, la selección de las instalaciones y de los procedimientos que van a incluirse en un plan de clausura estará en función de las instalaciones construidas para el control ambiental, mismas que serán utilizadas durante la clausura y postclausura del tiradero.

El plan de clausura del relleno mostrará la forma en que se van a controlar y a evacuar a la atmósfera el metano y otros gases, como el ácido sulfhídrico, que en determinadas concentraciones y durante un cierto tiempo de exposición pueden resultar fatales. Otros gases tóxicos como el monóxido de carbono o algunos mercaptanos hacen al gas potencialmente peligroso, sobre todo en temporada invernal, cuando las inversiones térmicas impiden la adecuada dispersión del biogás a atmósfera. Por ello, se recomienda monitorear la concentración de esos gases en el aire, a fin de determinar su concentración y grado de toxicidad.

Preferentemente se tomarán muestras a 250 y 500 m en línea recta en la dirección de las zonas habitadas; estas distancias se consideran adecuadas para la medición de la variación en el contenido de metano en el aire, ya que pueden ser suficientes para propósitos de dilución del biogás en la atmósfera.

La supervisión del biogás también se utiliza para valorar el grado de actividad biológica del tiradero. El equipamiento típico utilizado para la supervisión del biogás incluye medidores de explosividad, medidores de sulfuro de hidrógeno y equipamiento para la recolección de muestras, recipientes para su análisis en laboratorio.

#### 4.11.1.8 Supervisión de Asentamientos en el Tiradero.

Es muy importante supervisar los asentamientos diferenciales que en el tiradero se presentan a través del tiempo, ya que los problemas que se crean van desde la acumulación del agua hasta la fuga fuera del tiradero tanto de lixiviados como de biogás, además de generar grietas superficiales a través de las cuales pueden penetrar y salir vectores biológicos y mecánicos transmisores de enfermedades siendo también una vía para la salida de los gases generados.

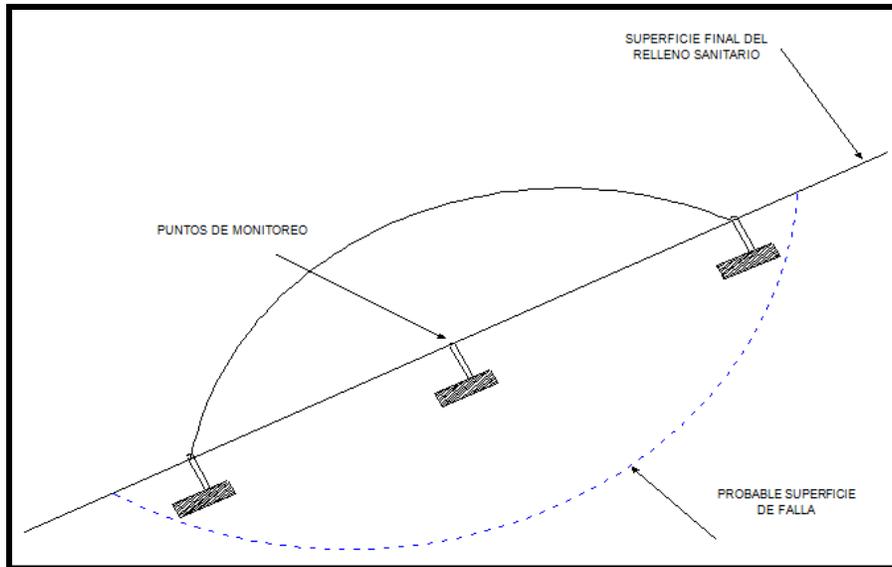
Por todo lo anterior, resulta clara la necesidad de medir y controlar los asentamientos, para lo cual se colocarán dos planchas metálicas de 8" x 8" x 1/4" en el eje central de cada módulo. Con un punto de referencia y un nivel se determinarán mensualmente los asentamientos en ambos módulos.

#### 4.11.1.9 Supervisión del Suelo.

La supervisión ambiental de los suelos incluye la medición de la consolidación superficial del terreno, el deslizamiento del suelo y la erosión de la superficie del terreno. La inspección del tiradero clausurado requiere una formación y un buen juicio para realizar las observaciones visuales y para la utilización de testigo, con la finalidad de controlar los movimientos del terreno.

#### 4.11.1.10 Supervisión de Deslizamientos.

En algunas ocasiones sobre la capa de un sitio de disposición final, se llegan a presentar ciertos problemas provocados por la acción de las lluvias y del viento, como por ejemplo depresiones, grietas, erosión y deslizamiento (Figura 17) Es importante que en caso de que estos fenómenos existan, se reparen lo más pronto posible para evitar que los residuos queden al descubierto y puedan provocar problemas ambientales y sanitarios. La rápida detección permitirá realizar las acciones encaminadas a solucionarlos.

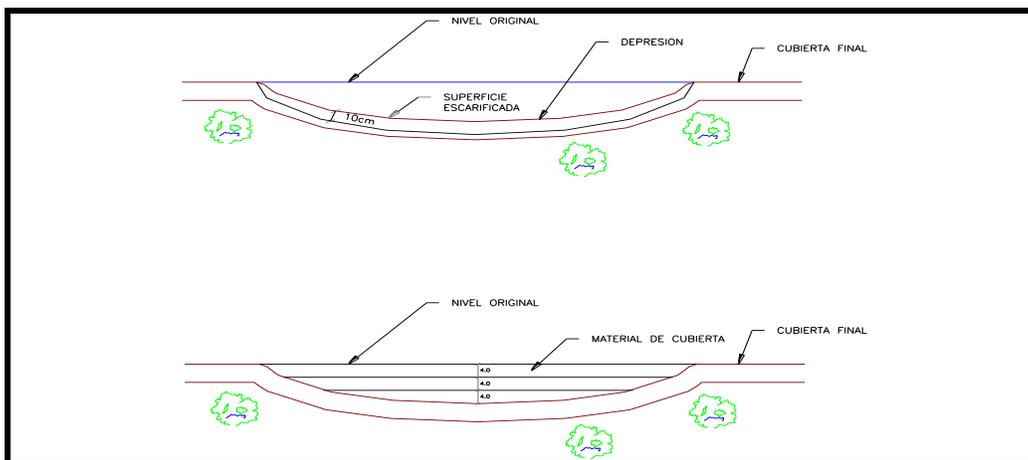


**Figura 17 Monitoreo de Deslizamientos**

Fuente: Proyecto de Residuos Sólidos y Estudio de Impacto Ambiental (SEDESOL, 2000)

4.11.1.11 Supervisión de Depresiones.

Con relación a las depresiones en este tipo de obras podemos comentar que son comunes debido a la compactación natural que sufren los desechos sólidos al paso del tiempo, los cuales tienden a formar en la cubierta final una depresión. Las acciones que deberán tomarse tienen como objetivo el evitar la acumulación del agua de lluvias y por consiguiente la infiltración de ésta a las capas de residuos. En la Figura 18 se observa un esquema para la reparación de depresiones.



**Figura 18 Reparación de Depresiones.**

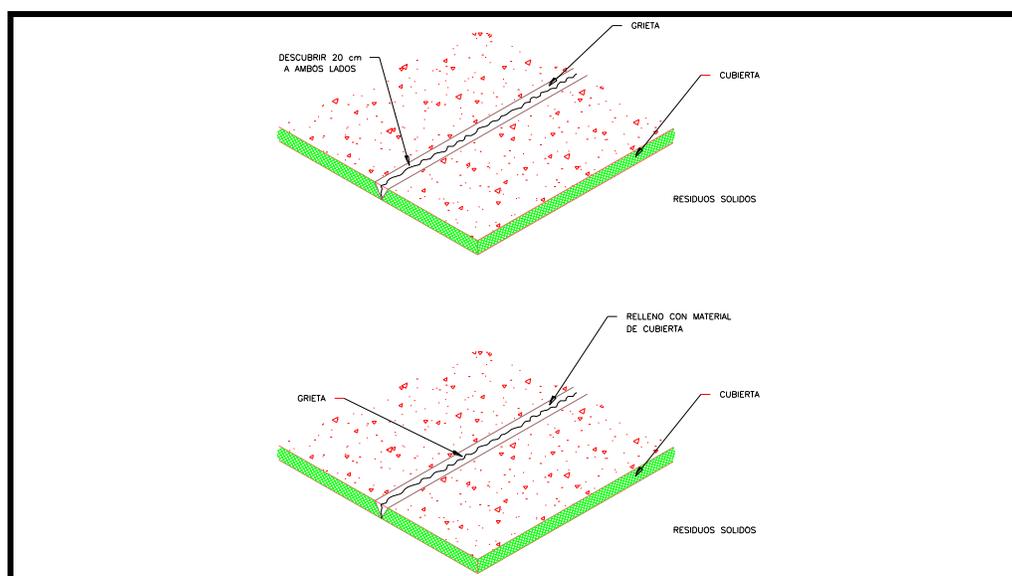
Fuente: Proyecto de Residuos Sólidos y Estudio de Impacto Ambiental (SEDESOL, 2000)

Para realizar la reparación de las depresiones, se deberá seguir el procedimiento que a continuación se presenta:

- Escarificación con pala, rastrillo o zapapico, del área afectada a la profundidad de 0.10 m. En caso de que sea un área extensa se puede usar la escarificadora de la motoniveladora.
- Colocación de material de cubierta en capas de 0.15 m como máximo y compactando cada capa con material húmedo hasta lograr la superficie original.

En el caso de las grietas, éstas se originan por efecto de los cambios de temperatura o por la mala calidad del material de cobertura. El procedimiento de reparación es el siguiente:

- Se descubrirá a cada lado de la grieta 0.20 m aproximadamente y a la profundidad que tenga la misma, posteriormente se humedecerá
- Se colocará material de cubierta húmedo y se procederá a compactar con pisón de mano hasta llegar a la superficie original. (Figura 19).



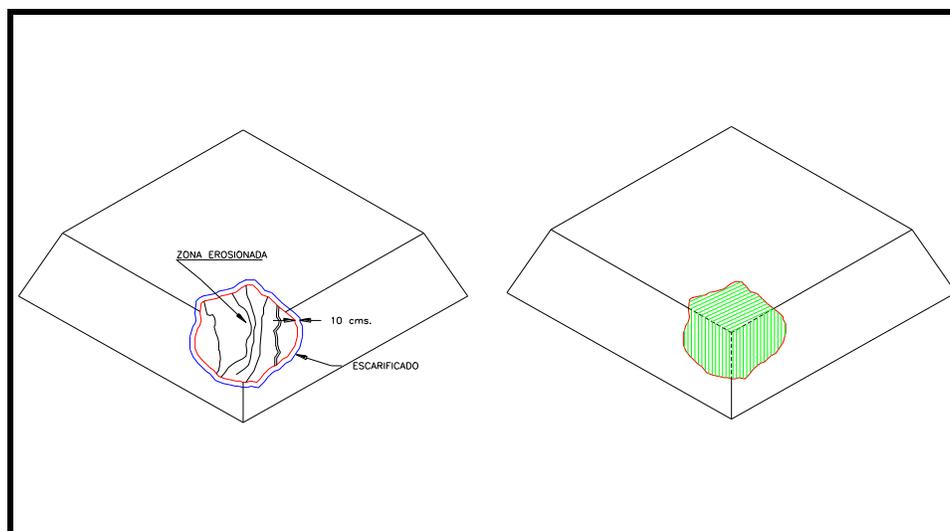
**Figura 19 Reparación de Grietas.**

Fuente: Proyecto de Residuos Sólidos y Estudio de Impacto Ambiental (SEDESOL, 2000)

#### 4.11.1.12 Supervisión de Erosión Pluvial.

La erosión se debe tanto a la acción de la lluvia como del viento, éste fenómeno provoca que en taludes y terraplenes del sitio queden descubiertos los residuos sólidos. La Figura 20, muestra la erosión y la reparación de una celda. El procedimiento de reparación es el siguiente:

- Escarificar 0.10 m en la zona erosionada, ya sea con maquinaria o con herramientas manuales.
- Humedecer el área erosionada.
- Rellenar con material de cubierta hasta llegar a la superficie original.



**Figura 20 Erosión de Celdas.**

Fuente: Proyecto de Residuos Sólidos y Estudio de Impacto Ambiental (SEDESOL, 2000)

Con respecto al mantenimiento de los caminos internos, la supervisión ambiental se centrará en los siguientes aspectos:

- Se deberán rellenar los baches para luego compactar con pisón de mano.
- Se efectuará periódicamente el riego de los caminos con aceite quemado o agua tratada para evitar la generación de polvo.
- Las cunetas de los caminos deberán estar siempre libres de rocas, arena o residuos para evitar su azolvamiento.

## 4.12 Costos de Inversión y operación del Relleno Sanitario

Los costos de inversión y operación son fundamentales para la realización de un proyecto, es por esto que el resultado de estos análisis determine de forma importante el diseño propuesto. Los costos referidos a estos conceptos fueron estimados mediante la cotización de materiales, salarios y maquinaria de diversas fuentes. Con estos datos, se obtuvieron las cantidades aproximadas que se generarían por la construcción y operación del relleno sanitario intermunicipal.

### 4.12.1.1 Costos por construcción

Para conocer los costos de inversión por construcción se tienen que tomar en cuenta entre otros aspectos, las instalaciones necesarias tales como las obras para el acondicionamiento del terreno (limpieza, despalme, nivelación, drenaje, caminos de acceso, etc.); las edificaciones que serán de utilidad para la operación del relleno sanitario (oficinas, caseta de vigilancia, almacén, taller y servicios) y por último la adquisición de maquinaria. En la Tabla 36 se presenta un resumen de los costos que se estimarían en la construcción del relleno sanitario. Los costos presentados en esta tabla fueron determinados mediante la cotización de cada uno de los conceptos considerando los elementos más representativos para la construcción de un relleno sanitario.

**Tabla 36 Costos por construcción**

PROYECTO	CONCEPTO	P.U.	Cantidad	COSTO TOTAL (\$)
Obra Civil	Cerca de alambre	\$36.68	1,564m	\$57,378.00
	Fosa Séptica			\$10,000.00
	Cisterna			\$10,000.00
	Drenaje Pluvial			\$123,046.44
	Caminos interiores y entronque			\$318,558.80
	Geomembrana	\$66.82	135,000m <sup>2</sup>	\$9 020,700.00
	Geotextil	\$161.72	43,888m <sup>2</sup>	\$7 097,567.36
	Tubería PEAD 5"	\$91.00	1,000m	\$91,000.00
	Tubería PEAD 4"	\$48.88	7,500m	\$366,600.00
	Sistema de control de biogás			\$255,950.24
	Sistema de control de lixiviados			\$1 651,725.66
		<b>SUBTOTAL</b>		
Equipo	Tractor D-5	\$2 816,010.00	1	\$2 816,010.00
	Compactador pata de cabra	\$6 111,937.00	1	\$6 111,937.00
	Camión de volteo	\$552,433.00	1	\$552,433.00
	Báscula electrónica	\$165,124.00	1	\$165,124.00
		<b>SUBTOTAL</b>		
Instalaciones Eléctricas	Iluminación			\$677,250.00
	Obra civil para instalaciones eléctricas			\$15,000.00
		<b>SUBTOTAL</b>		<b>\$692,250.00</b>
Arquitectónico	Caseta de vigilancia			\$104,520.50
	Edificio de operación y mantenimiento			\$63,845.00
	Oficinas y área de servicios			\$1 178,765.00
	Proyecto paisajístico			\$70,000.00
	Señalamientos			\$95,000.00
		<b>SUBTOTAL</b>		

4.12.1.2 Costos por operación

Para estimar los costos de operación se deben de conocer el salario y prestaciones del personal (operadores, administrativos, entre otros); el costo de equipo y maquinaria; combustibles y lubricantes; reparaciones y mantenimiento preventivo; material de cubierta.

4.12.1.3 Costos de salarios y prestaciones de operadores

Para poder obtener los costos correspondientes a este concepto, primero se debe de identificar el número de operadores a emplear durante esta etapa. Se considero 1 jefe de operación, 4 operadores de maquinaria con sus ayudantes que laboraran durante dos turnos de 8 horas por día. También se considera un operador de camión de volteo para el acarreo del material de cobertura. Los sueldos estimados se presentan en la Tabla 37.

**Tabla 37 Salarios de personal de campo**

<b>Personal</b>	<b>Salario día (\$)</b>	<b>Salario Anual (\$)</b>	<b>Prestaciones</b>	<b>TOTAL</b>
Jefe de Oper. (1)	\$255.34	\$93,199.00	\$27,959.73	\$121,158.83
Operadores (4)	\$250.00	\$365,000.00	\$109,500.00	\$474,500.00
Ayudantes (4)	\$84.95	\$124,027.00	\$37,208.10	\$161,235.10

**Salarios de personal de campo anuales \$756,893.93**

NOTA: Se considero un 30% anual para prestaciones del personal, adicional al salario, de acuerdo a lo establecido a la Ley Federal del Trabajo.

4.12.1.4 Costo de arrendamiento de equipo y maquinaria

Se considera dentro de este concepto la renta de una pipa de agua de 6m<sup>3</sup> de capacidad, con la cual se llenará la cisterna para dar servicio a las oficinas, sanitarios, duchas y otros servicios que lleguen a ser necesarios. El costo semanal del servicio es de \$2,600 que incluye el costo del viaje.

4.12.1.5 Costos de combustibles y lubricantes

Para el cálculo del costo de combustible, se consideró un costo de \$5.09 por litro de diesel, un costo de \$7.72 por litro de gasolina (magna) y el de los lubricantes \$30.00 el litro, de acuerdo a las especificaciones de los fabricantes.

- Tractor de orugas

Para poder obtener los costos anuales para este equipo de combustibles y lubricantes (Tabla 38), es necesario conocer los siguientes datos:

Precio de combustible	(Pc) = \$7.83 lt
Factor de combustible	(Fc) = 0.103
Capacidad del cárter	(Cc) = 8 Lt
Tiempo de cambio de aceite	(Ca) = 200 hr
Factor lubricante	(Fa) = 0.0034
Precio del aceite	(Pa) = \$26.77 /lt
Factor de operación	(Fo) = 0.85
Potencia nominal	(Pn) = 130 Hp

El costo de combustible se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$E = c * Pc ; \quad c = Fc * Pn * Fo$$

El costo de lubricante se calcula con la siguiente expresión:

$$Al = [ (Fa * Pn * Fo) + Cc / Ca ] * Pa$$

**Tabla 38 Costos de combustible y lubricante para tractor de orugas**

Equipo	Costo hora (\$)	Costo día (\$)	Costo Anual (\$)
Tractor de orugas	\$100.24	\$801.96	\$292,716.67

- Compactador pata de cabra

Para poder obtener los costos anuales para este equipo de combustibles y lubricantes (Tabla 39) se utilizarán las mismas formulas, solo cambiará la potencia nominal del equipo (315 Hp).

**Tabla 39 Costos de combustible y lubricante para compactador pata de cabra**

Equipo	Costo hora (\$)	Costo día (\$)	Costo Anual (\$)
Compactador pata de cabra	\$165.82	\$1,326.56	\$484,194.40

- Camión de volteo

De igual manera para poder obtener los costos tanto de combustible y lubricantes (Tabla 40) por año, se utilizarán las mismas expresiones citadas anteriormente, los conceptos que hay que considerar ahora son:

- Potencia nominal (Pn) = 170 Hp
- Precio del combustible (Pc) = \$7.72 lt
- Factor de combustible (Fc) = 0.111
- Capacidad del cárter (Cc) = 20 lt
- Factor del lubricante (Fa) = 0.0023

**Tabla 40 Costos de combustible y lubricante para camión de volteo**

Equipo	Costo hora (\$)	Costo día (\$)	Costo Anual (\$)
Camión de volteo	\$135.38	\$1,083.01	\$395,297.92

#### 4.12.1.6 Costos de reparaciones y mantenimiento preventivo

Se consideró para el costo de este concepto un 5% del costo total de adquisición de cada uno de los equipos para la reparación y mantenimiento, el 35% para la rehabilitación de los mismos.

#### 4.12.1.7 Costos de material de cubierta

En este concepto se considera como nulo este costo debido a que el terreno donde se encuentra dicho material es propiedad del municipio de Técpan de Galeana y lo otorgaron para el sitio de disposición final sin costo alguno.

#### 4.12.1.8 Gastos administrativos

Los gastos administrativos corresponden en este caso a salarios, servicios y otros como: Luz, teléfono, sueldos, prestaciones del personal administrativo, papelería y los análisis de lixiviados y biogás (se incluyen en esta sección debido a que se realizarán dos veces por año).

El costo de la energía eléctrica se considero de \$0.70 KWH. Los gastos de teléfono de \$1,500.00 mensuales. Análisis de lixiviados y biogás de \$6,000.00 (DBO, DQO, COT, bacteriológicos, metales pesados y cromatografía de gases).

El personal administrativo incluye una plantilla que fue determinada con el personal mínimo que debe tener el relleno sanitario. En la Tabla 41, se presentan los gastos administrativos que se generarían por año y por el personal especificado a continuación.

**Tabla 41 Gastos administrativos**

Descripción	Salario/día	Salario Anual	Prestaciones	Total anual (\$)
Secretaria	\$103.16	\$37,653.40	\$11,296.02	\$48,949.42
Chofer de camioneta	\$189.25	\$69,076.25	\$20,772.875	\$89,799.13
Encargado de control	\$141.83	51,767.95	\$15,530.385	\$67,298.34
Vigilante	\$141.83	51,767.95	\$15,530.385	\$67,298.34

**Gastos administrativos anuales \$273,345.22**

## 4.13 Clausura del Relleno Sanitario

El procedimiento que se debe de llevar a cabo una vez terminada la vida útil del sitio es la clausura de este para poder minimizar los posibles efectos adversos del relleno sanitario. El propósito de la clausura del sitio es, aislarlos completamente para minimizar o evitar la infiltración de líquidos en las celdas a través de los residuos depositados, así como la salida del biogás por las estructuras especiales que se instrumenten.

### 4.13.1.1 Configuración de la superficie final

La configuración final depende del uso que se quiera dar al sitio después de su estabilización, en este caso, lo que se plantea es que el sitio tenga un aspecto visual natural. Según la normativa de la EPA (Environmental Protection Agency) requiere un coeficiente de seguridad en la estabilidad de los taludes de 1.5, lo cual se tuvo contemplado por los parámetros de diseño básicos en el estudio de mecánica de suelos (Couttolenc, 2008), que fueron taludes con relación horizontal-vertical 3:1 y plataformas con una pendiente dominante del 3% para favorecer el escurrimiento pluvial dentro de márgenes que eviten encharcamientos e infiltración por una parte y erosión por otra

### 4.13.1.2 Construcción de la cobertura Final

La cobertura final además de impedir un mínimo de mantenimiento, impide el ingreso de aguas pluviales a la masa de residuos, evita la erosión, sustenta una cubierta vegetal y evita la migración de biogás y lixiviado mientras finaliza el proceso de estabilización de los residuos.

Esta fase es probablemente una de las más significativas y cruciales en todo el proceso de clausura, pues de ella depende en gran medida el eficiente control de algunos impactantes ambientales. Por ejemplo, la formación de lixiviados está en relación directa con la precipitación pluvial, y de aquí que en una cobertura altamente impermeable sea premisa ante la disyuntiva entre manejar lixiviados altamente contaminantes cuya captación y tratamiento son difíciles y costosos, o resolver un más sencillo planteamiento de canalización y descarga de aguas pluviales (como lo fue en el caso de dotar de las pendientes necesarias para poder minimizar la infiltración de estas aguas dentro del relleno además de la construcción del canal perimetral para la captación y desvío de las aguas pluviales).

Para poder lograr esto, se plantea la necesidad mínima de construir de abajo hacia arriba: Una capa base de material compactado de al menos 60cm de espesor, una capa de sello con material cuya permeabilidad no exceda de  $1 \times 10^{-06}$  cm/seg de al menos 30cm de espesor (en este caso se sustituirá dicho material con la misma geomembrana que se utilizó para la impermeabilización HDPE EML 60) , y finalmente una capa de al menos 20 cm de espesor como protección contra la erosión. Siguiendo estos lineamientos, se empleará directamente sobre los residuos conformados (que ya contarán con una cobertura de unos 30cm) una capa de material de baja calidad con espesor variable para conformar los niveles finales, la capa base se tendería en dos fases de 30cm cada una para facilitar su compactación, a la capa de protección contra la erosión se le colocará una capa adicional de tierra vegetal de también 20cm para el crecimiento de vegetación y dar una buena imagen del sitio.

#### 4.13.1.3 Control de Biogás

Para el buen control de este parámetro, para efectos de clausura fue necesario dotar al sitio de un sistema de extracción. Aunque originalmente este se concibió exclusivamente con fines de protección contra las migraciones hacia las colindancias y los posibles daños que se pudieran derivar por no contar con estos de forma adecuada. Se estimó la construcción de 113 pozos interconectados a base de tubería corrugada fabricada de PEAD (polietileno de alta densidad) con uniones flexibles.

#### 4.13.1.4 Control de Lixiviados

A pesar de que se tendrá una impermeabilización adecuada para evitar la infiltración de aguas pluviales para contribuir a la formación de lixiviados, se tiene que dotar de un control para los lixiviados remanentes dentro del relleno. Para esto, el proyecto final involucra la extracción de estos mediante cárcamos de bombeo donde, se llevarán directamente al tanque de almacenamiento para re-inyectarlos y a la vez se dejará sujeto a la evaporación.

Como alternativa para el tratamiento de los lixiviados residuales se puede llevar a cabo el proceso de solidificación (2003). Este proceso consiste en mezclar en un tanque de concreto los lixiviados con ceniza proveniente de una cementera. Esta mezcla es horneada a altas temperaturas para solidificarla. El producto de este proceso puede ser depositado en una celda especial dentro del relleno sanitario. En este trabajo, se plantea la alternativa de recirculación y evaporación como criterio de diseño. La opción de solidificación bajo este análisis servirá para flexibilizar el manejo de los lixiviados y reducir la cantidad de almacenaje necesario para los lixiviados.

4.13.1.5 Infraestructura Complementaria

Una de las actividades que se llevarán a cabo en el corto plazo son: dotar al relleno de una red de caminos de acceso perimetrales asfaltados que faciliten el paso de vehículos y personal necesario para el mantenimiento de la cubierta del relleno.

El aislamiento del predio irá más allá de limitar el acceso por razones de seguridad a todo personal ajeno al mantenimiento y supervisión del sitio clausurado, buscando integrarlo paisajísticamente al entorno mediante cortinas arbóreas perimetrales distribuidas.

## 5 CONCLUSIONES

---

De acuerdo a los objetivos propuestos en el presente trabajo, se realizó el diseño conceptual y dimensional del Relleno Sanitario Intermunicipal de los municipios de Atoyac de Álvarez – Benito Juárez –Técpan de Galeana, en el Estado de Guerrero de acuerdo con la normatividad vigente en la República Mexicana (NOM-083-SEMARNAT-2003).

Con los estudios realizados previamente, tanto por la Facultad de Ingeniería de la UNAM como de empresas particulares, las proyecciones y diseño del sitio de disposición final estuvieron limitados a estas, teniendo como resultado las siguientes consideraciones:

En primer lugar, con respecto al estudio de mecánica de suelos, se determinó el método de construcción del sitio (Método de Área), esto se debió a que si se realizaban excavaciones para tratar de aprovechar el material como cubierta (el cual no cumplía con las especificaciones) y/o aprovechar al máximo la capacidad de dicho sitio, este ya no cumpliría con las características de resistencia y compresibilidad adecuadas para el desplante de las celdas. Otra característica importante fue la capacidad de carga del terreno, resultando una altura máxima a la cual podría llegar el relleno sin presentar problemas de fallas o asentamientos de 23m.

Teniendo en cuenta las limitantes de construcción, capacidad de carga y la topografía del sitio; se procedió a realizar la proyección de la generación de residuos sólidos para los tres municipios de acuerdo a los resultados obtenidos durante los estudios de generación de cada localidad. Con base a estos puntos, se hizo una estimación del número de etapas máximas que se podrían construir sin que se sobrepasara la capacidad de carga del terreno, quedando la construcción en cinco etapas con una altura de cuatro metros cada una de acuerdo al diseño de la celda diaria propuesta. Considerando esto, se llegó a que el sitio de disposición final tendría una vida útil de 12 años con 20 metros de altura, quedando por debajo del límite reportado por los estudios de geotecnia.

El análisis que se hizo entre métodos de predicción de lixiviados y biogás resultó interesante debido a que se observaron las deficiencias que hay entre modelos, esto se debe a que cada uno considera ciertos parámetros que cree necesarios y convenientes para poder realizar una predicción confiable. Esto no significa que, un método sea incorrecto y el otro no, sino que la diferencia primordial entre estos es que varían respecto a exactitud, tomando en cuenta esto, se pueden tomar mejores decisiones en cuanto a cantidades, tiempos y costos de extracción de lixiviados y biogás.

El método considerado para el control de lixiviados y biogás fue el de Tchobanoglous, esto debido a que es el método que toma en consideración la mayor cantidad características de los residuos sólidos para su proyección. De acuerdo a esto, se realizó la propuesta de diseño e infraestructura para el manejo de lixiviados y biogás.

Las alternativas para la recirculación de lixiviados y captación de biogás se hicieron contemplando dentro de distintas opciones, las más seguras y eficientes para poder con esto maximizar la eficiencia para recirculación (inyección de lixiviado de una tubería vertical conectada a una serie de tuberías horizontales que estarán puestas en la parte superior de la celdas) y captación de biogás (captación horizontal en cada celda para maximizar la cantidad de biogás extraído mediante tuberías de PEAD corrugadas), así mismo la reducción de posibles fugas por la implementación de estos dispositivos.

La implementación de un biorrelleno metanogénico es una alternativa eficiente tanto en el aspecto ambiental como en el económico, esto se debe a que en el momento de implementar la recirculación de lixiviados, se reducen tiempos de monitoreo en la clausura y los costos en el tratamiento de dichos líquidos. En el caso del biogás, no se pudo optar por un aprovechamiento de este debido a que las cantidades de acuerdo a las proyecciones realizadas, serían muy pequeñas comparadas con la inversión para la implementación de una tecnología.

En lo que respecta al monitoreo ambiental del sitio, se presentó de la forma más completa posible los requisitos o condiciones que debe de cumplir esta etapa, siendo de gran importancia para poder manejar estos de forma adecuada para evitar o reducir al máximo los daños al ambiente que se pueden generar por un manejo inadecuado de los dispositivos y operaciones que se realicen dentro del sitio.

Como recomendaciones importantes que surgieron durante el desarrollo del presente trabajo y que de tomarse en consideración, podrían traer mejores beneficios para la disposición final de residuos sólidos en nuestro país, se encuentran las siguientes:

Se deben de realizar análisis de laboratorio durante la etapa del estudio de generación, con esto, se obtendrían los contenidos de humedad de cada uno de los elementos componentes de los residuos orgánicos que, son factores importantes en la producción de biogás (CHON).

Como método alternativo para el tratamiento de los lixiviados residuales, se propone realizar un proceso de solidificación después de haber recirculado dicho líquido dentro de la masa de residuos. El tratamiento consiste en mezclar los lixiviados con ceniza proveniente de una cementera para posteriormente, hornear esta a altas temperaturas solidificándola (el producto es enterrado en una celda especial dentro del relleno sanitario).

## *CONCLUSIONES*

---

Esta alternativa parece ser eficiente para tratar este tipo de líquidos que, después de haber cumplido su función, es necesario hacerle un tratamiento. Sería recomendable realizar un estudio tanto económico como ambiental para determinar si este método realmente tendría beneficio para el caso de nuestro país y determinar con esto, en que sitios podría aplicarse.

---

# **ANEXO 1**

---

## **SELECCIÓN DEL SITIO**

MATRIZ DE DECISIÓN (ANÁLISIS CUALITATIVO)								
PARAMETROS	SITIOS PARA DISPOSICION FINAL							
	SITIO 1 Camino a Chiota, Jovero	SITIO 2 Kilómetro 94	SITIO 3 Carretera a Tetitlán	SITIO 4 Jovero 2	SITIO 5 Jovero 2A	SITIO 6 Jovero 2B (Pozo Seco)	SITIO 7 Los Tamarindos (Técpán)	SITIO 8 La Soledad (Técpán)
Tipo de camino de acceso existente:								
Carretera		X	X					
Terracería	X						X	X
Brecha				X	X	X		
No hay								
Distancia a vialidades principales (m)	600	15	20	800	1000	1200	2000	3500
Distancia a Banco de Materiales para Cobertura. (m)	2000	500	500	600	600	1000	2000	2000
Distancia al asentamiento más próximo	400 m (casas abandonadas 2) 600 m (casas habitadas 2)	500 m (casas habitadas 4)	500 m (varias casas habitadas, ejido Los Bajitos)	1000 m (atrás del cerro El Jovero)	1000 m (atrás del cerro El Jovero)	1500 m (atrás del cerro El Jovero)	1000	600
Cercanía a cuerpos de agua								
arroyo	si	si	no	si	si	si	no	no
río	no	no	no	no	no	no	no	no
lago o laguna	no	no	600 m (Laguna de P'itero)	no	no	no	no	no
pozo o noria	posible	no	no	si	no	si (seco)	no	no
tanque elevado	si	no	no	no	no	no	no	no
Interferencia con derecho de vía								
Líneas de alta tensión	no	si	Si	si	No	no	no	no
Ductos de PEMEX	no	no	no	no	No	no	no	no
Carreteras	no	si	Si	no	No	no	no	no
Distancia a : (m)								
Técpán de Galeana	8500	10000	6200	9000	9300	9500	16000	17500
San Jerónimo de Juárez	14000	11000	16500	13000	13300	13500	21000	22500
Atoyac de Álvarez	24000	21000	26500	23000	23300	23500	23700	25200
Profundidad de NAF	----					mayor a 12 m		
Distancia a falla geológica más cercana (m)	1500	1500	3000	1000	600	500	2000	500
Distancia a aeródromo o aeropuerto más cercano (km)	100	100	100	100	100	100	100	100
Área disponible	mas de 10 Ha	10 Ha	mas de 15 Ha	10 Ha	mas de 10 Ha	mas de 15 Ha	mas de 15 Ha	mas de 30 Ha
Tipo de suelo	arena fina limosa de baja plasticidad	arena fina limosa de baja plasticidad	arena fina limosa de baja plasticidad	arena fina limosa de baja plasticidad	arena fina limosa de baja plasticidad	arena fina limosa de baja plasticidad	arena fina	arena fina
Servicios Públicos existentes	energía eléctrica y telefonía	energía eléctrica y telefonía	energía eléctrica	energía eléctrica	energía eléctrica	energía eléctrica a 600 m	energía eléctrica	energía eléctrica
Topografía (Pendiente del terreno)	plana	plano hasta llegar al cerro	plano hasta llegar al cerro	zona con poca pendiente a 30 m sobre el nivel del mar	zona con poca pendiente a 30 m sobre el nivel del mar	zona plana con una altitud de 32 m, hasta llegar al cerro	lomerío suave	zona de lomas
Uso de Suelo	huerta de mangos	Cultivo de mangos y palmeras de cocos	palmeras y pastizal para alimentar ganado	existencia de palmas y mucha vegetación	existencia de palmas y mucha vegetación	no cultivada, existencia de palmas y mucha vegetación	cultivo de tamarindos	Cultivo de maíz
Costo del predio (miles de pesos/ha)	40-50	mas de 50	mas de 80	40-50	40-50	40-50		
Factibilidad a Inundaciones	no	No	Si	no	no	no	no	no
Impacto visual	oculto	a la vista	a la vista	oculto	oculto	Muy oculto	oculto	oculto

MATRIZ DE DECISIÓN (ANÁLISIS CUANTITATIVO)								
PARAMETROS	SITIOS PARA DISPOSICION FINAL							
	SITIO 1 Camino a Chiota, Jovero	SITIO 2 Kilómetro 94	SITIO 3 Carretera a Tetitlán	SITIO 4 Jovero 2	SITIO 5 Jovero 2A	SITIO 6 Jovero 2B (Pozo Seco)	SITIO 7 Los Tamarindos (Técpán)	SITIO 8 La Soledad (Técpán)
Tipo de camino de acceso existente:	3	5	5	2	0	1	3	3
Distancia a vialidades principales (m)	4	5	5	3	3	2	0	0
Distancia a Banco de Materiales para Cobertura. (m)	0	5	5	5	5	4	0	0
Distancia al asentamiento más próximo	4	3	2	4	5	5	4	3
Cercanía a cuerpos de agua	3	3	4	3	3	4	5	5
Interferencia con derecho de vía	5	2	2	3	5	5	4	4
Distancia a cabeceras municipales : (m)	4	5	4	5	4	4	1	0
Profundidad de NAF	2	2	2	3	4	5	4	4
Distancia a falla geológica más cercana (m)	4	4	5	2	1	1	5	1
Distancia a aeródromo o aeropuerto más cercano (km)	5	5	5	5	5	5	5	5
Área disponible	4	4	5	4	4	5	4	5
Tipo de suelo (arenoso, arenolimoso, areno-arcilloso, limo-arcilloso, etc.)	2	2	2	2	2	2	3	3
Servicios Públicos existentes	4	4	3	3	3	3	3	3
Topografía (Pendiente del terreno)	4	4	5	3	3	4	3	3
Uso de Suelo	3	3	3	4	4	4	4	3
Costo del predio (miles de pesos/ha)	4	3	1	4	4	4	4	4
Impacto visual	4	2	1	4	4	5	4	4
Zona de amortiguamiento	4	2	1	4	5	5	4	4
<b>SUMA</b>	<b>63</b>	<b>63</b>	<b>60</b>	<b>63</b>	<b>64</b>	<b>68</b>	<b>60</b>	<b>54</b>

Criterio de Calificación: 0 el peor y 5 el mejor

---

## **ANEXO 2**

---

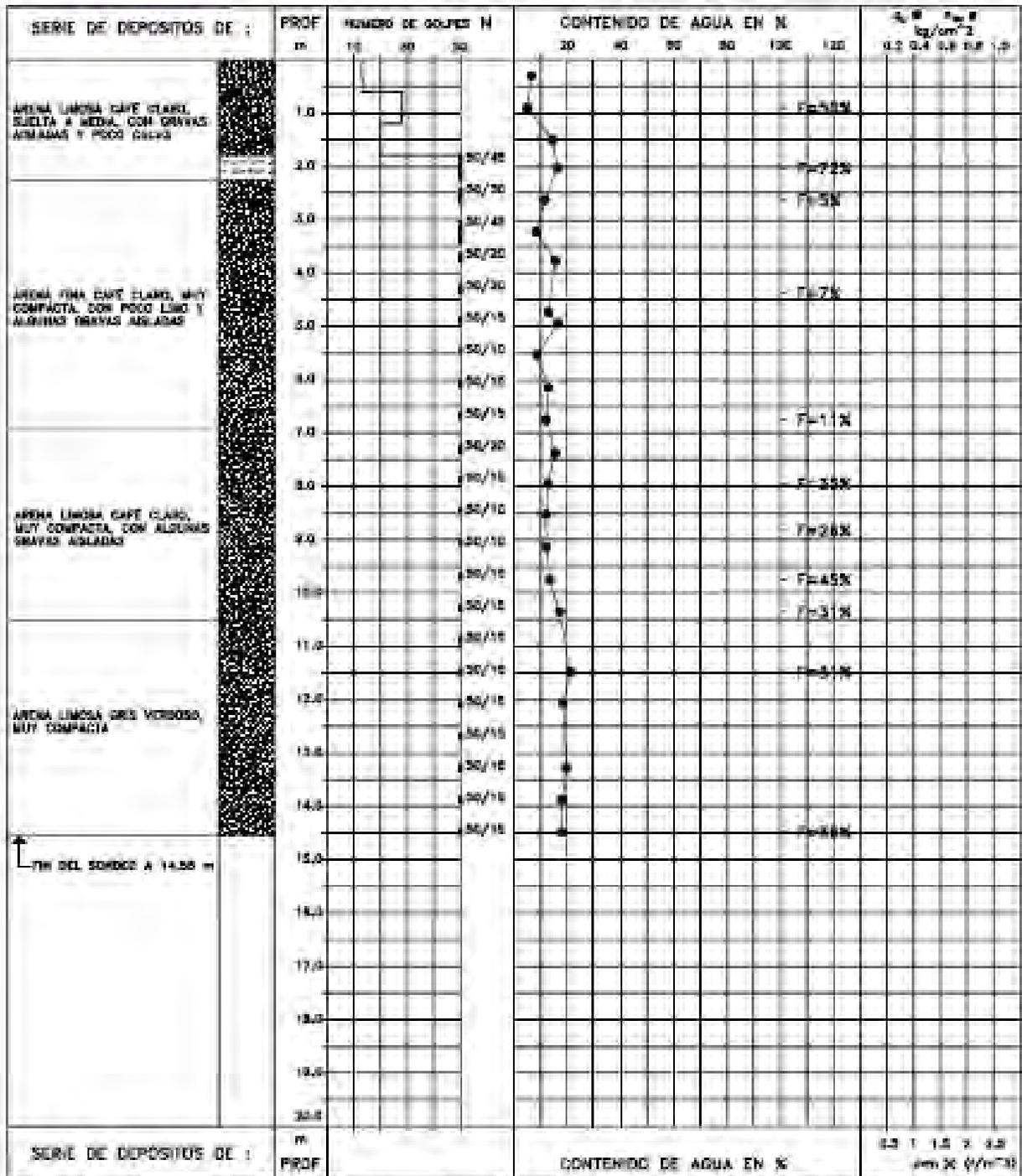
# **ESTUDIO GEOTÉCNICO**

# PERFIL ESTRATIGRAFICO

OBRA: RELLENO SANITARIO ATOYAC-BENITO JUÁREZ-TECPAN

LOC: GUERRERO, MÉXICO

SONDEO: SPT-1 N.A.F.: SIN m



**SIMBOLOGIA:**

○ LIMITE LIQUIDO

▲ LIMITE PLASTICO

P.L. PESO DE HERRAMIENTA  
T.H. TIPO B-SLUR



GRAVA



LIMO



MATERIA ORGANICA



ROCA



ARENA



ARCILLA



RELLENO



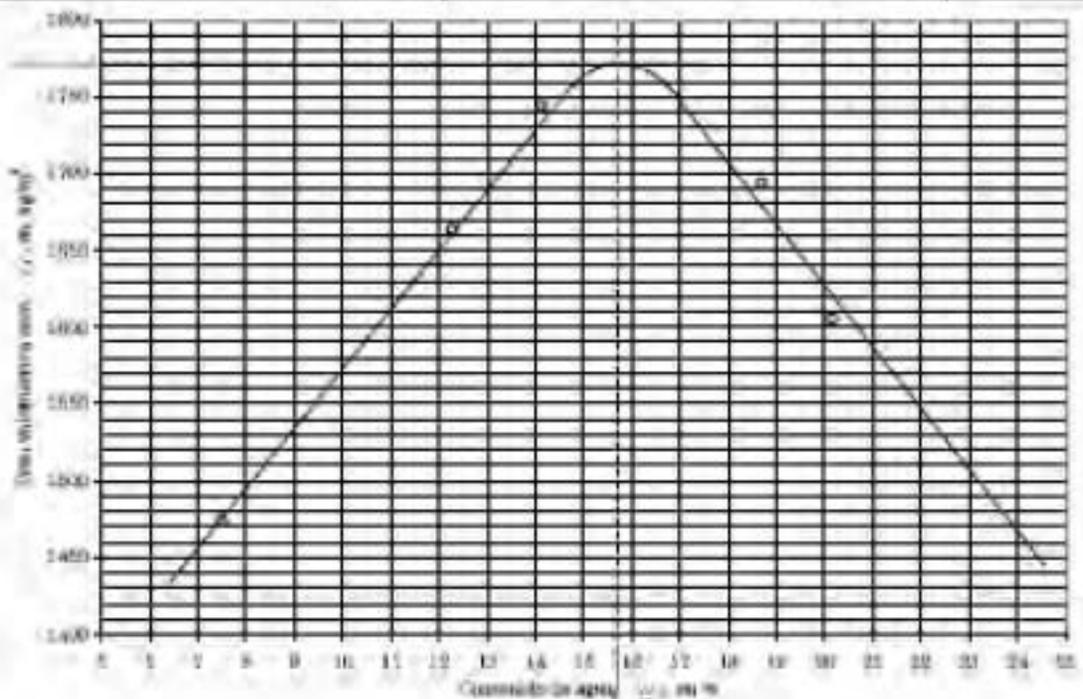
## COMPACTACION

PROYECTO BELLINO SANTIANO			LOCALIZACION GUERRERO			OPERADOR FRANCISCO		FECHA 5-Marzo-2008	
Estado	PSA-G	Municipio	Agencia	Tercera	Proyecto	CAJALTEPEC	MUNICIPIO		

Diámetro del molde	150.0	mm	Peso del sustrato	2200.0	kg	Mo. - kg sustrato	
Altura del molde	13.70	mm	Altura del sustrato		mm		
Volumen del molde	181.89	cm <sup>3</sup>	Altura de molde	20.0	mm	Energía de compactación	
Peso del Molde	2200.0	kg	No de golpes por capa	25			kg-cm/m <sup>2</sup>

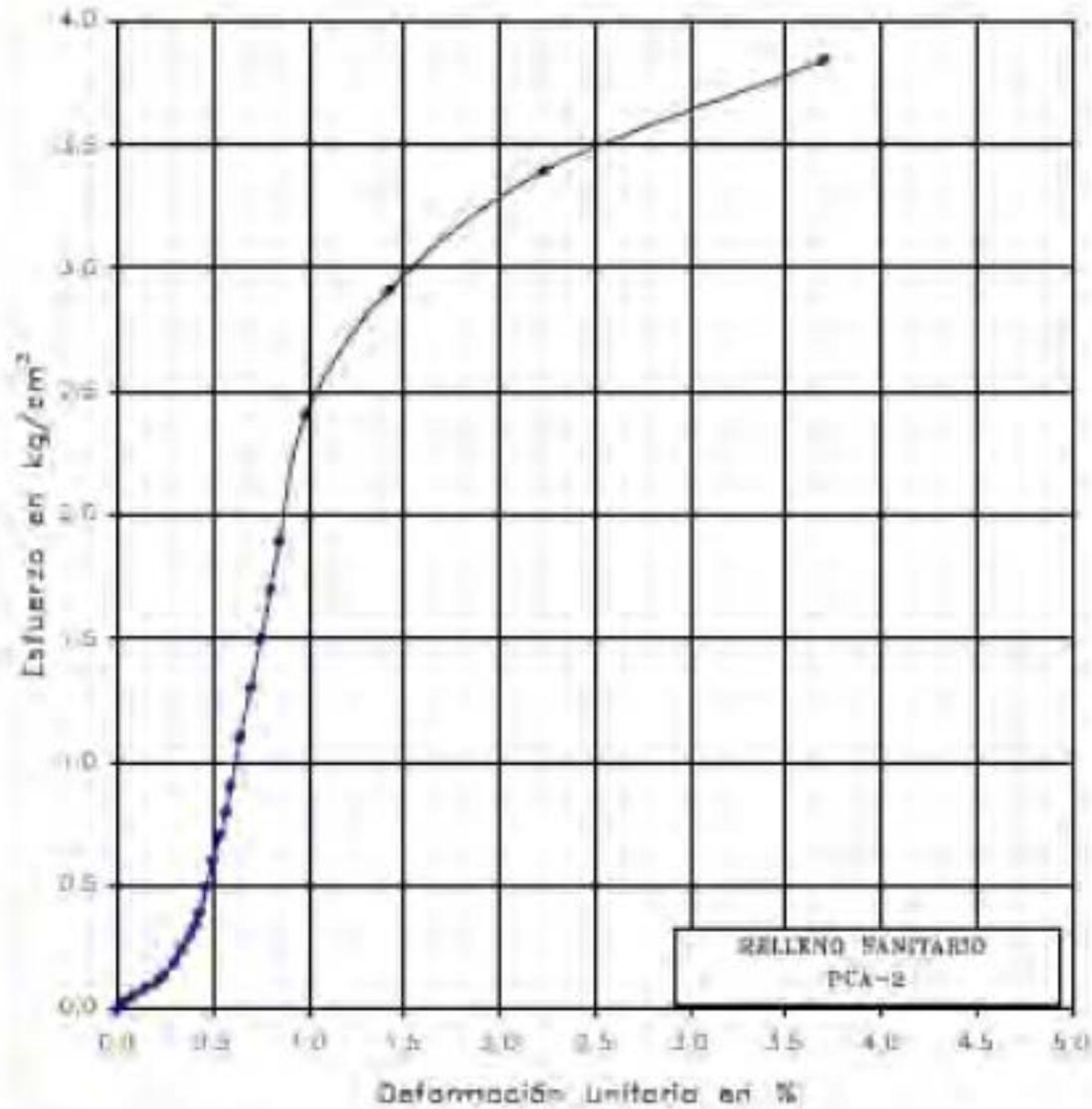
CONTENIDO DE AGUA					DATOS DEL MOLDE			
APARTE No	PESO CAPSULA gr	$P_{L-}$ $P_{L-} - P_{L-0}$ gr	$P_{L+}$ / $P_{L-0}$ gr	$Q$ (%)	$P_{L-}$ - MOLDE gr	$P_{L+}$ gr	$P_{L-}$ gr	$\gamma_c$ kg/m <sup>3</sup>
52	19.50	181.20	170.00	7.49	4320	1590	1461.27	1473.47
45	19.50	164.50	148.20	12.26	4600	1640	1536.71	1559.77
65	19.00	212.00	187.50	14.53	4720	1900	1717.47	1743.74
67	19.50	204.40	208.50	18.70	4740	1980	1868.90	1893.81
72	19.50	309.70	260.00	20.16	4680	1900	1581.19	1603.36

PESO POLIMERIZADO SECO OPTIMO ( $\gamma_c$ )=	1775 kg/m <sup>3</sup>	CONTENIDO DE AGUA OPTIMO (L.O.)=	15.6 %	$\gamma_c$ =	0.43
---	------------------------	----------------------------------	--------	--------------	------



Descripción de material: ARELLA DE BAGA ELASTICIDAD CARR CLARO, MUY DURA, CON OCHO

**CURVA ESPUEZO-DEFORMACION  
 COMPRESION SIMPLE ( $q_u$ )**



PRUEBA No.	MUESTRA	PROF (m)	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	$Q_u$ (t)	$E$ (kg/cm²)	$\gamma$ (t/m³)	$Q_u$ (kg/cm²)
$Q_{u1}$	A GRANEL	1.70	Alcorno de baja plasticidad con arena muy dura, con CaO/S	12	365	1.21	3.33

REPRODUCIDA

Fig. 14

OBRA : **RELLENO SANITARIO ATOYAC, TECPAN**  
 LOC. : **Guerrero**  
 SONDEO : **PCA-2**  
 PROF. : **0.20-2.00 m**  
 MUESTRA : **A GRANUL**

**TRIAxIAL NO CONSOLIDADA NO DRENADA (UU)**

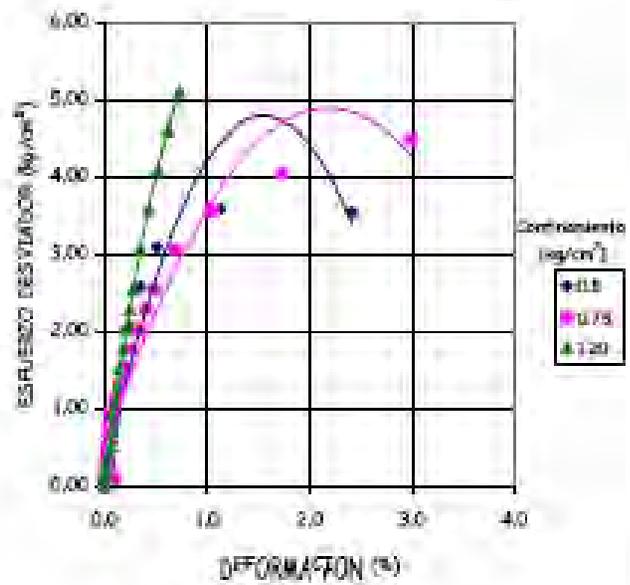
REPRODUCIDA

Datos Promedio

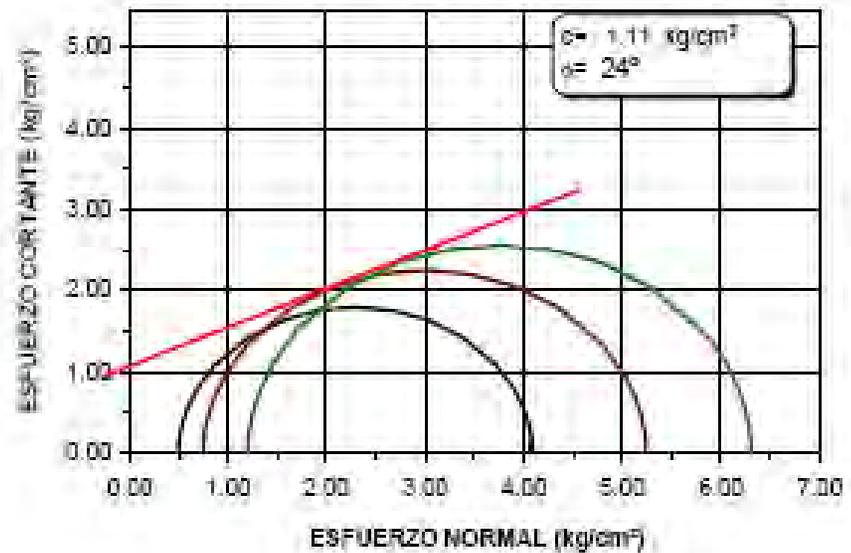
$\gamma_m =$	1.87	ton/m <sup>3</sup>
$w =$	12.0	%

ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD CAFÉ CLARO, CON CaCO<sub>3</sub>

**CURVA ESFUERZO DEFORMACION**



**CIRCULO DE MOHR**



Proyecto: TELERO LANIARO  
Ubicación: ATOYAC, GUERRERO, MEXICO  
Muestra: 4  
Fecha: 07/03/2008

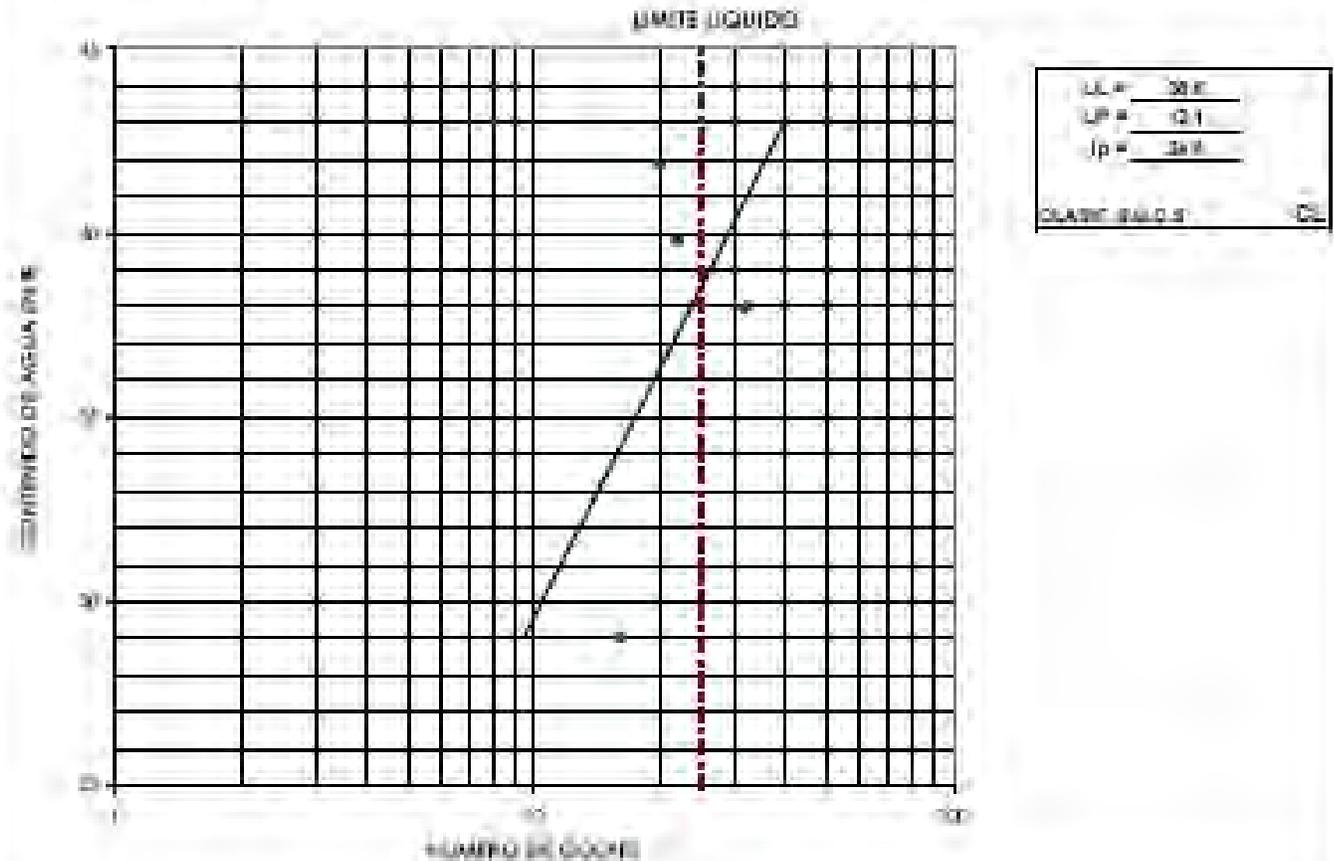
Sondeo: SPT-2  
Profundidad: 1.80-2.35 m Prof. Media (m): 2.075  
Operador: FRANCISCO

**LIMITE LIQUIDO**

**LIMITE PLASTICO**

No.	LIMITE LIQUIDO							LIMITE PLASTICO							
	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>p</sub> (%)	W <sub>u</sub> (%)	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>p</sub> (%)	W <sub>u</sub> (%)	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>p</sub> (%)	W <sub>u</sub> (%)	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>p</sub> (%)	W <sub>u</sub> (%)	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>p</sub> (%)	W <sub>u</sub> (%)
17	40.0	32.10	11.3	7.90	20.0	37.98	32	10	7.1	6.40	0.6	0.70	5.80	12.07	
40	40.0	31.80	11.2	8.20	20.4	39.81	22	10	7.1	6.40	0.6	0.70	5.80	12.07	
47	40.0	31.50	11.2	8.50	20.9	41.07	20								
4	40.0	31.00	0.0	9.00	19	29.08	16								

OMNIVOCACION: ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD COLOR CAFE OSCURO



PROYECTO: RELLENO SANITARIO STDYAC-BENITO JUÁREZ-TECPAN  
 LOCALIZACIÓN: GUERRERO  
 FECHA: Marzo de 2008

Sondeo	Muestra	Prof. (m)	Prof. Media (m)	$W_{200}$ (gr)	$W_{75}$ (gr)	% Finos	
SPT-1	2	0.60 - 1.20	0.90	408.87	205.27	50.26	
	4	1.80 - 2.25	2.03	282.51	201.91	71.47	
	5	2.40 - 2.85	2.63	199.68	9.58	4.80	
	8	4.20 - 4.55	4.38	141.92	10.02	7.06	
	12	6.60 - 6.90	6.75	168.23	19.03	11.31	
	14	7.80 - 8.10	7.95	180.93	62.43	34.51	
	15 y 1E	9.40 - 9.25	8.83	325.66	85.06	26.12	
	17	9.60 - 9.90	9.75	373.18	167.75	44.95	
	18	10.20 - 10.50	10.35	182.73	55.55	30.56	
	19	11.40 - 11.55	11.48	78.96	23.95	30.35	
	23	14.40 - 14.55	14.48	33.30	12.00	36.03	
	SPT-2	1	0.00 - 0.60	0.30	363.38	161.48	44.44
		5 Y 7	3.00 - 3.75	3.38	251.55	132.65	52.73
10		5.40 - 5.50	5.45	77.50	13.70	17.68	
12		7.80 - 7.88	7.84	172.50	89.53	52.38	
SPT-3	13	8.40 - 8.45	8.43	71.84	15.54	22.19	
	1	0.00 - 0.60	0.30	466.53	199.13	42.68	
	2	0.60 - 0.95	0.78	114.64	49.54	43.21	
	3	1.20 - 1.85	1.28	184.26	54.75	35.15	
	5	2.40 - 2.50	2.45	38.28	4.58	11.98	
	6	4.20 - 4.25	4.23	33.60	8.40	27.99	
	7	5.20 - 5.25	5.23	48.40	13.60	26.04	
PCA-1	2	0.30 - 2.00	1.15	490.53	46.53	9.49	
PCA-2	1	0.00 - 0.30	0.15	493.68	167.48	33.92	
	3	2.00 - 3.00	2.50	481.09	52.69	10.95	
PCA-3	3	2.00 - 3.00	2.50	472.63	104.83	22.27	

Nota: \* Una grava

---

**ANEXO 3**

---

**GENERACIÓN DE LIXIVIADOS**

ANEXO 3

Año			Residuos			Suelo			Infiltración			Gas						Lixiviados											
			Altura	PV	Peso	Altura	PV	Peso	Infiltración	Volumen de agua en un m2	Pv	Peso del agua de lluvia	Tasa de Producción anual	Producción	Pv	Peso del gas	Agua consumida en la generación de biogás	Vapor de agua	Contenido de humedad en los residuos sólidos	Contenido de humedad total	Peso de los residuos base seca	Peso promedio	Capacidad de campo	Agua que puede ser almacenada en los residuos	Lixiviado	Agua remanente	Peso Total Remanente		
			m²	Kg/m²	kg	m	Kg/m²	Kg	m	m²	Kg/m²	Kg	m³/kg	m³	Kg/m²	Kg	Kg	Kg	%	Kg	kg	Kg	Kg	%	Kg	Kg	Kg	Kg	
2008	0	1	E1	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.00000	0.00	1.34	0.00	0.00	0.00	30.00%	684.00	883.12	1,596.00	1,589.56	0.525	837.21	45.91	837.21	2,783.21
2009	1	2	E1	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.01380	31.46	1.34	42.13	0.00	0.00		837.21	1,036.33	1,596.00	1,666.16	0.521	832.23	204.09	832.23	2,778.23
2010	2	3	E1	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.02630	59.96	1.34	80.29	0.00	0.00		832.23	1,031.35	1,596.00	1,663.68	0.522	832.39	198.96	832.39	2,778.39
2011	3	4	E1	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.02380	54.26	1.34	72.66	0.00	0.00		832.39	1,031.51	1,596.00	1,663.76	0.522	832.39	199.13	832.39	2,778.39
2012	4	5	E1	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.02140	48.79	1.34	65.33	0.00	0.00		832.39	1,031.51	1,596.00	1,663.75	0.522	832.39	199.12	832.39	2,778.39
2013	5	6	E2	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.00000	0.00	1.34	0.00	0.00	0.00	30.00%	684.00	883.12	1,596.00	1,589.56	0.525	837.21	45.91	837.21	2,783.21
			E1	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00				45.91	0.01890	43.09	1.34	57.70	0.00	0.00		832.39	878.30	1,596.00	4,370.36	0.433	690.64	187.66	690.64	2,636.64
2014	6	7	E2	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.01380	31.46	1.34	42.13	0.00	0.00		837.21	1,036.33	1,596.00	1,666.16	0.521	832.23	204.09	832.23	2,778.23
			E1	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00				204.09	0.01650	37.62	1.34	50.37	0.00	0.00		690.64	894.73	1,596.00	4,373.60	0.433	690.50	204.23	690.50	2,636.50
2015	7	8	E2	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.02630	59.96	1.34	80.29	0.00	0.00		832.23	1,031.35	1,596.00	1,663.68	0.522	832.39	198.96	832.39	2,778.39
			E1	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00				198.96	0.01400	31.92	1.34	42.74	0.00	0.00		690.50	889.46	1,596.00	4,371.12	0.433	690.61	198.85	690.61	2,636.61
2016	8	9	E3	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.00000	0.00	1.34	0.00	0.00	0.00	30.00%	684.00	883.12	1,596.00	1,589.56	0.525	837.21	45.91	837.21	2,783.21
			E2	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00				45.91	0.02380	54.26	1.34	72.66	0.00	0.00		832.39	878.31	1,596.00	4,370.36	0.433	690.64	187.67	690.64	2,636.64
			E1	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00				187.67	0.01150	26.22	1.34	35.11	0.00	0.00		690.61	878.27	1,596.00	7,006.98	0.373	595.94	282.33	595.94	2,541.94
2017	9	10	E3	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.01380	31.46	1.34	42.13	0.00	0.00		837.21	1,036.33	1,596.00	1,666.16	0.521	832.23	204.09	832.23	2,778.23
			E2	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00				204.09	0.02140	48.79	1.34	65.33	0.00	0.00		690.64	894.73	1,596.00	4,373.60	0.433	690.50	204.23	690.50	2,636.50
			E1	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00				204.23	0.00910	20.75	1.34	27.78	0.00	0.00		595.94	800.17	1,596.00	6,962.82	0.374	597.28	202.89	597.28	2,543.28
2018	10	11	E4	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.00000	0.00	1.34	0.00	0.00	0.00	30.00%	684.00	883.12	1,596.00	1,589.56	0.525	837.21	45.91	837.21	2,783.21
			E3	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00				45.91	0.02630	59.96	1.34	80.29	0.00	0.00		832.23	878.15	1,596.00	4,370.28	0.433	690.64	187.50	690.64	2,636.64
			E2	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00				187.50	0.01890	43.09	1.34	57.70	0.00	0.00		690.50	878.01	1,596.00	7,006.85	0.373	595.94	282.06	595.94	2,541.94
			E1	3.80	600.00	2,280.00	0.20	1,750.00	350.00				282.06	0.00660	15.05	1.34	20.15	0.00	0.00		597.28	879.35	1,596.00	9,549.47	0.331	528.81	350.53	528.81	2,474.81

ANEXO 3

			Residuos			Suelo			Infiltración				Gas					Lixiviados										
			Altura	PV	Peso	Altura	PV	Peso	Infiltración	Volumen de agua en un m <sup>2</sup>	Pv	Peso del agua de lluvia	Tasa de Producción anual	Producción	Pv	Peso del gas	Agua consumida en la generación de biogás	Vapor de agua	Contenido de humedad en los residuos sólidos	Contenido de humedad total	Peso de los residuos base seca	Peso promedio	Capacidad de campo	Agua que puede ser almacenada en los residuos	Lixiviado	Agua remanente	Peso Total Remanente	
2019	11	12	E4	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.01380	31.46	1.34	42.13	0.00	0.00	837.21	1,036.33	1,596.00	1,666.16	0.521	832.23	204.09	832.23	2,778.23
			E3	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				204.09	0.02380	54.26	1.34	72.66	0.00	0.00	690.64	894.74	1,596.00	4,373.60	0.433	690.50	204.23	690.50	2,636.50
			E2	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				204.23	0.01650	37.62	1.34	50.37	0.00	0.00	595.94	800.18	1,596.00	6,962.83	0.374	597.28	202.90	597.28	2,543.28
			E1	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				202.90	0.00550	12.54	1.34	16.79	0.00	0.00	528.81	731.71	1,596.00	9,471.87	0.332	530.60	201.11	530.60	2,476.60
2020	12	13	E4	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.02630	59.96	1.34	80.29	0.00	0.00	832.23	1,031.35	1,596.00	1,663.68	0.522	832.39	198.96	832.39	2,778.39
			E3	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				198.96	0.02140	48.79	1.34	65.33	0.00	0.00	690.50	889.46	1,596.00	4,371.12	0.433	690.61	198.85	690.61	2,636.61
			E2	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				198.85	0.01400	31.92	1.34	42.74	0.00	0.00	597.28	796.14	1,596.00	6,961.07	0.374	597.34	198.80	597.34	2,543.34
			E1	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				198.80	0.00280	6.38	1.34	8.55	0.00	0.00	530.60	729.41	1,596.00	9,471.04	0.332	530.62	198.78	530.62	2,476.62
2021	13	14	E4	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.02380	54.26	1.34	72.66	0.00	0.00	832.39	1,031.51	1,596.00	1,663.76	0.522	832.39	199.13	832.39	2,778.39
			E3	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.13	0.01890	43.09	1.34	57.70	0.00	0.00	690.61	889.73	1,596.00	4,371.25	0.433	690.60	199.13	690.60	2,636.60
			E2	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.13	0.01150	26.22	1.34	35.11	0.00	0.00	597.34	796.47	1,596.00	6,961.22	0.374	597.33	199.14	597.33	2,543.33
			E1	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.14	0.00270	6.16	1.34	8.24	0.00	0.00	530.62	729.76	1,596.00	9,471.20	0.332	530.62	199.14	530.62	2,476.62
2022	14	15	E4	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.02140	48.79	1.34	65.33	0.00	0.00	832.39	1,031.51	1,596.00	1,663.75	0.522	832.39	199.12	832.39	2,778.39
			E3	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.12	0.01650	37.62	1.34	50.37	0.00	0.00	690.60	889.72	1,596.00	4,371.25	0.433	690.60	199.12	690.60	2,636.60
			E2	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.12	0.00910	20.75	1.34	27.78	0.00	0.00	597.33	796.45	1,596.00	6,961.22	0.374	597.33	199.12	597.33	2,543.33
			E1	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.12	0.00250	5.70	1.34	7.63	0.00	0.00	530.62	729.74	1,596.00	9,471.19	0.332	530.62	199.12	530.62	2,476.62
2023	15	16	E4	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.01890	43.09	1.34	57.70	0.00	0.00	832.39	1,031.51	1,596.00	1,663.75	0.522	832.39	199.12	832.39	2,778.39
			E3	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.12	0.01400	31.92	1.34	42.74	0.00	0.00	690.60	889.72	1,596.00	4,371.25	0.433	690.60	199.12	690.60	2,636.60
			E2	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.12	0.00660	15.05	1.34	20.15	0.00	0.00	597.33	796.45	1,596.00	6,961.22	0.374	597.33	199.12	597.33	2,543.33
			E1	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.12	0.00240	5.47	1.34	7.33	0.00	0.00	530.62	729.74	1,596.00	9,471.19	0.332	530.62	199.12	530.62	2,476.62
2024	16	17	E4	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.01650	37.62	1.34	50.37	0.00	0.00	832.39	1,031.51	1,596.00	1,663.75	0.522	832.39	199.12	832.39	2,778.39
			E3	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.12	0.01150	26.22	1.34	35.11	0.00	0.00	690.60	889.72	1,596.00	4,371.25	0.433	690.60	199.12	690.60	2,636.60
			E2	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.12	0.00550	12.54	1.34	16.79	0.00	0.00	597.33	796.45	1,596.00	6,961.22	0.374	597.33	199.12	597.33	2,543.33
			E1	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.12	0.00220	5.02	1.34	6.72	0.00	0.00	530.62	729.74	1,596.00	9,471.19	0.332	530.62	199.12	530.62	2,476.62
2025	17	18	E4	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00	0.20	0.20	1,000.00	199.12	0.01400	31.92	1.34	42.74	0.00	0.00	832.39	1,031.51	1,596.00	1,663.75	0.522	832.39	199.12	832.39	2,778.39
			E3	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.12	0.00910	20.75	1.34	27.78	0.00	0.00	690.60	889.72	1,596.00	4,371.25	0.433	690.60	199.12	690.60	2,636.60
			E2	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.12	0.00280	6.38	1.34	8.55	0.00	0.00	597.33	796.45	1,596.00	6,961.22	0.374	597.33	199.12	597.33	2,543.33
			E1	3.80	600.00	2.280.00	0.20	1,750.00	350.00				199.12	0.00210	4.79	1.34	6.41	0.00	0.00	530.62	729.74	1,596.00	9,471.19	0.332	530.62	199.12	530.62	2,476.62

---

## **ANEXO 4**

---

### **GENERACIÓN DE BIOGÁS**

Biogas producido por una tonelada de residuos (periodo de 12 años)														
Tasa de generación de biogas de los residuos depositados por año, m³/año													Total m³/año	Producción acumulada m³
Fin de año	Año1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11			
2008	0	0.0000											0.0000	0.0000
2009	1	0.0000	0.0000										0.0000	0.0000
2010	2	0.0275	0.0000	0.0000									0.0275	0.0275
2011	3	0.0251	0.0303	0.0000	0.0000								0.0554	0.0829
2012	4	0.0226	0.0273	0.0303	0.0000	0.0000							0.0802	0.1631
2013	5	0.0202	0.0242	0.0273	0.0303	0.0000	0.0000						0.1019	0.2650
2014	6	0.0177	0.0212	0.0242	0.0273	0.0303	0.0000	0.0000					0.1206	0.3856
2015	7	0.0152	0.0181	0.0212	0.0242	0.0273	0.0303	0.0000	0.0000				0.1363	0.5219
2016	8	0.0128	0.0151	0.0181	0.0212	0.0242	0.0273	0.0303	0.0000	0.0000			0.1489	0.6708
2017	9	0.0103	0.0120	0.0151	0.0181	0.0212	0.0242	0.0273	0.0303	0.0000	0.0000		0.1585	0.8293
2018	10	0.0078	0.0090	0.0120	0.0151	0.0181	0.0212	0.0242	0.0273	0.0303	0.0000	0.0000	0.1651	0.9944
2019	11	0.0054	0.0060	0.0090	0.0120	0.0151	0.0181	0.0212	0.0242	0.0273	0.0303	0.0000	0.1686	1.1629
2020	12	0.0029	0.0029	0.0060	0.0090	0.0120	0.0151	0.0181	0.0212	0.0242	0.0273	0.0303	0.1690	1.3320
2021	13	0.0028	0.0028	0.0029	0.0060	0.0090	0.0120	0.0151	0.0181	0.0212	0.0242	0.0273	0.1414	1.4733
2022	14	0.0026	0.0026	0.0028	0.0029	0.0060	0.0090	0.0120	0.0151	0.0181	0.0212	0.0242	0.1166	1.5899
2023	15	0.0025	0.0025	0.0026	0.0028	0.0029	0.0060	0.0090	0.0120	0.0151	0.0181	0.0212	0.0947	1.6846
2024	16	0.0023	0.0023	0.0025	0.0026	0.0028	0.0029	0.0060	0.0090	0.0120	0.0151	0.0181	0.0757	1.7603
2025	17	0.0022	0.0022	0.0023	0.0025	0.0026	0.0028	0.0029	0.0060	0.0090	0.0120	0.0151	0.0596	1.8200
2026	18	0.0020	0.0020	0.0022	0.0023	0.0025	0.0026	0.0028	0.0029	0.0060	0.0090	0.0120	0.0464	1.8664
2027	19	0.0018	0.0019	0.0020	0.0022	0.0023	0.0025	0.0026	0.0028	0.0029	0.0060	0.0090	0.0361	1.9025
2028	20	0.0017	0.0018	0.0019	0.0020	0.0022	0.0023	0.0025	0.0026	0.0028	0.0029	0.0060	0.0287	1.9313
2029	21	0.0015	0.0016	0.0018	0.0019	0.0020	0.0022	0.0023	0.0025	0.0026	0.0028	0.0029	0.0242	1.9555
2030	22	0.0014	0.0015	0.0016	0.0018	0.0019	0.0020	0.0022	0.0023	0.0025	0.0026	0.0028	0.0226	1.9781
2031	23	0.0012	0.0013	0.0015	0.0016	0.0018	0.0019	0.0020	0.0022	0.0023	0.0025	0.0026	0.0210	1.9991
2032	24	0.0011	0.0012	0.0013	0.0015	0.0016	0.0018	0.0019	0.0020	0.0022	0.0023	0.0025	0.0194	2.0184
2033	25	0.0009	0.0010	0.0012	0.0013	0.0015	0.0016	0.0018	0.0019	0.0020	0.0022	0.0023	0.0178	2.0362
2034	26	0.0008	0.0009	0.0010	0.0012	0.0013	0.0015	0.0016	0.0018	0.0019	0.0020	0.0022	0.0161	2.0523
2035	27	0.0006	0.0007	0.0009	0.0010	0.0012	0.0013	0.0015	0.0016	0.0018	0.0019	0.0020	0.0145	2.0668
2036	28	0.0005	0.0006	0.0007	0.0009	0.0010	0.0012	0.0013	0.0015	0.0016	0.0018	0.0019	0.0129	2.0797
2037	29	0.0003	0.0004	0.0006	0.0007	0.0009	0.0010	0.0012	0.0013	0.0015	0.0016	0.0018	0.0113	2.0910
2038	30	0.0002	0.0003	0.0004	0.0006	0.0007	0.0009	0.0010	0.0012	0.0013	0.0015	0.0016	0.0097	2.1007
2039	31	0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0006	0.0007	0.0009	0.001	0.0012	0.0013	0.0015	0.0080	2.1087
2040	32		0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0006	0.0007	0.0009	0.001	0.0012	0.0013	0.0066	2.1153
2041	33			0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0006	0.0007	0.0009	0.001	0.0012	0.0053	2.1206
2042	34				0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0006	0.0007	0.0009	0.001	0.0041	2.1247
2043	35					0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0006	0.0007	0.0009	0.0031	2.1278
2044	36							0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0006	0.0022	2.1300
2045	37								0.0000	0.0001	0.0003	0.0004	0.0015	2.1314
2046	38									0.0000	0.0001	0.0003	0.0009	2.1323
2047	39										0.0000	0.0001	0.0003	2.1327
2048	40											0.0000	0.0001	2.1329
2049	41												0.0000	2.1329

<b>Biogás producido por el relleno al final de cada año</b> (considerando la cantidad total de residuos recibidos anuales)			
	Residuos	Volumen	
	ton/año	m <sup>3</sup> /año	m <sup>3</sup> /año
2008	16,010,164.93	0	0.00
2009	16,972,692.12	0	0.00
2010	17,945,149.23	0.0275	0.49
2011	18,927,619.77	0.0554	1.05
2012	19,920,187.92	0.0802	1.60
2013	20,922,938.49	0.1019	2.13
2014	21,024,624.07	0.1206	2.54
2015	21,126,864.65	0.1363	2.88
2016	21,229,663.47	0.1489	3.16
2017	21,333,023.78	0.1585	3.38
2018	21,436,948.88	0.1651	3.54
2019	21,541,442.05	0.1686	3.63
2020		0.1690	3.66
2021		0.1414	3.06
2022		0.1166	2.53
2023		0.0947	2.05
2024		0.0757	1.64
2025		0.0596	1.29
2026		0.0464	1.01
2027		0.0361	0.78
2028		0.0287	0.62
2029		0.0242	0.52
2030		0.0226	0.49
2031		0.0210	0.45
2032		0.0194	0.42
2033		0.0178	0.38
2034	21,671,938.12	0.0161	0.35
2035		0.0145	0.31
2036		0.0129	0.28
2037		0.0113	0.24
2038		0.0097	0.21
2039		0.0080	0.17
2040		0.0066	0.14
2041		0.0053	0.11
2042		0.0041	0.09
2043		0.0031	0.07
2044		0.0022	0.05
2045		0.0015	0.03
2046		0.0009	0.02
2047		0.0004	0.01
2048		0.0001	0.00
2049		0.0000	0.00

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

*A Bluestem Solid Waste Bioreactor Cell Pilot Project Operating Protocol and Monitoring Plan Draft Report.* Consultants, E&A Environmental. 1997. 1997.

**A. Suna Erses, T.T. Onay.** Accelerated landfill waste decomposition by external leachate recirculation from an old landfill cell. **Water Science and Technology Vol. 47 No 12 pp 215-222. 2003**

**A.C., FEMISCA.** 1997. *Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios.* Distrito Federal : s.n., 1997.

**America, Solid Waste association of North.** 1991. *Manager of Landfill Operations.* 1991.

**Bioenergy, IEA.** 2000. *Biogas Flares.* 2000.

**Borzacconi Liliana.** *Metodología para la Estimación de la Producción y Concentración de Lixiviado de un Relleno Sanitario.* Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República de Uruguay. Montevideo, Uruguay.

**Brown, Doreen.** *Guía para la Gestión del Manejo de los Residuos Sólidos Municipales.* Proarca/Sigma. 2004

**Brunner, R. y Keller, Daniel.** *Sanitary Landfill Design and Operation.* s.l. : U.S. EPA.

**Canter, L.** *Manual de Evaluación de Impacto Ambiental,* McGraw-Hill. 1999

**Caine, M.** *Biogas Flares, Topic report of the IEA Bioenergy Agreement Task 24- Biological conversion of municipal solid waste. State of the art and marketing review.* 2000

**Cálculos Hidrológicos de Generación de Lixiviados para el proyecto de Vertedero de Residuos Sólidos de Iruatxieta,** T.M. de Mallabia, Bizkaia, España 2005.

**Caterpillar.** 2008. Caterpillar. [En línea] 2008. [Citado el: 24 de Junio de 2008.] <http://mexico.cat.com>.

**Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.** *Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales,* Lima, Perú. 2002

**CONAPO.** 2008. CONAPO. [En línea] 2008. [Citado el: 03 de Marzo de 2008.] <http://www.conapo.gob.mx>.

**Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos**, 1917.

**Consultores, DEMM. 2008.** *Estudio Hidrológico y Geohidrológico*. Distrito Federal : s.n., 2008.

**Couttolenc, Oscar. 2008.** *Estudio de Mecánica de Suelos*. Distrito Federal : s.n., 2008.

**Diagnóstico de las Condiciones Actuales del Sitio de Disposición Final de Zamora, Michoacán.** Michoacán, México. 2001

**EPA. 2007.** *Resource Efficiency, Climate Change and Landfill Gas*. EPA. [En línea] Abril de 2007. [Citado el: 10 de Enero de 2009.] [www.epa.gov](http://www.epa.gov).

—. **2000.** United States Environmental Protection Agency. [En línea] 2000. [Citado el: 12 de Junio de 2008.] <http://www.epa.gov>.

**González, Lorenzo. 2000.** *Monitoreo Ambiental en Rellenos Sanitarios*. 2000.

**Gutiérrez, Constantino. 2006.** *Informe Diagnóstico Municipio Benito Juárez*. Distrito Federal : s.n., 2006.

—. **2006.** *Informe Diagnóstico Municipio de Atoyac*. Distrito Federal : s.n., 2006.

—. **2008.** *Informe Diagnóstico Municipio Técpan de Galeana*. Distrito Federal : s.n., 2008.

—. **2006.** *Localización de Posibles Sitios para Relleno Sanitario*. Distrito Federal : s.n., 2006.

**Harris, J., Canino Godofredo.** “*Simulación de la generación de lixiviados en un relleno sanitario propuesto utilizando el modelo HELP*”. Salinas, Puerto Rico.

**Hernández, Wehenpohl.** *Guía para la Elaboración de Planes Maestros para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales*, Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ). 2002

**INCREMI. 1996.** *Monitoreo de rellenos sanitarios*. 1996.

**Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).** *Consultas especializadas* (archivo histórico de localidades, Guerrero). 2008.

*Investigation of Cancer Incidence and Residence near 28 Landfills with Soil Gas Migration Conditions.* **Departement of Health, State of New York. 1998.** 1998.

**Kunitoshi, Kogyo Co., LTD.** *Estudio sobre el Manejo de Residuos Sólidos para la Ciudad de México de los Estados Unidos Mexicanos (Informe Final Vol. II-s)*. JICA-GDF. 1999

**Congreso de los Estados Unidos Mexicanos.** *Ley General del Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente*, 1988.

**Congreso de los Estados Unidos Mexicanos.** *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.* 2003.

*Leachate Recirculation System Pays for Itself. Infraestructure, Civil.* Virginia : s.n.

**ML, Ingeniería. 2003.** ML Ingeniería. [En línea] 2003. [Citado el: 12 de Febrero de 2009.] <http://www.mlingenieria.com>.

**Nacional, Servicio Meteorológico. 2008.** *Servicio Meteorológico Nacional de México.* [En línea] 2008. [Citado el: 16 de Mayo de 2008.] <http://smn.cna.gob.mx>.

**Niño, Raúl. 2008.** *Estudio Topográfico.* Distrito Federal : s.n., 2008.

**Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003.** “Especificaciones de Protección Ambiental para la Selección del Sitio, Diseño, Construcción, Operación, Monitoreo, Clausura y Obras Complementarias de un sitio de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial”. 2003.

**Oficina de Asesoría y Consultoría Ambiental.** *Manual de Tecnología apropiada para el Manejo de Residuos Sólidos.* 1992

**Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.** *Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Guerrero,* Guerrero. 1991

**Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-140-SEMARNAT-2005.** *Requisitos Ambientales Generales para campos de golf y desarrollos inmobiliarios que los incluyan”. 2005*

**Ramsey/Washington County Resource Recovery Project.** *Updated Research Report on Bioreactor Landfills, Landfill Leachate Recirculation and Landfills with Methane Recovery.* 2004.

**Robles M., Fabián.** *Generación de biogás y lixiviados en los rellenos sanitarios.* México D.F. 2005.

**Sancho y Cervera J., Rosiles G.** Situación actual del Manejo Integral de los Residuos Sólidos en México. Secretaría de Desarrollo Social. 1999

**Sánchez, Jorge. 2003.** 2003.

**Secretaría de Desarrollo Social.** *Indicadores Básicos y Manual de Evaluación para Relleno Sanitario,* México D.F.

**Secretaría de Desarrollo Social.** *Manual para la Evaluación de Estudios de Impacto Ambiental Aplicados a Rellenos Sanitarios.*

**Secretaría de Ecología.** *Manual para la Supervisión y Control de Rellenos Sanitarios, Estado de México, México.* 2002.

**Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.** *Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales,* Primera Edición, D.F., México. 2001

**SEDESOL. 2000.** *Proyecto de Residuos Sólidos y Estudio de Impacto Ambiental en Zamora-Jacona, Mich.* 2000.

**2003.** *Simulación de la Generación de Lixiviados.* Puerto Rico : s.n., 2003.

**Tchobanoglous, George, Hilary, Theisen y Vigil, Samuel. 1993.** *Integrated Solid Waste Management.* s.l. : Mc Graw Hill, 1993. 0-07-112865-4.

**United States Environmental Protection Agency (EPA).** “*Design, Operation, and Closure of Municipal Solid Waste Landfills*”. 1994