



21 01177  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO



POGRADO EN INGENIERÍA DE LA U.N.A.M.  
INGENIERÍA AMBIENTAL

“ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO  
DEL MUNICIPIO DE TULTITLAN, ESTADO DE MÉXICO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ( AMBIENTAL )

P R E S E N T A

ING. REYNALDO CRUZ RIVERA

DIRECTOR: DRA. Ma. TERESA ORTA LEDESMA

ASESOR TÉCNICO: M.I. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

CIUDAD UNIVESITARIA, MÉXICO

ENERO, 2002.



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.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la gran oportunidad que me ha dado al pertenecer a ella durante todos estos años y ser un orgulloso egresado de esta máxima casa de estudios.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por todas las facilidades otorgadas para la realización de la maestría y de este trabajo de tesis

A la Dra. Ma. Teresa Orta Ledesma por la confianza que ha depositado en mí y por todo el apoyo brindado durante mi estancia en el II-UNAM

Al M.I. Jorge Sánchez Gómez por haber compartido sus conocimientos y su amistad conmigo, además de todo el apoyo prestado para la realización de este trabajo de tesis.

A la M.C. Ma. Neftali Rojas Valencia principalmente por su amistad y por todo el apoyo brindado estos años de estancia en el II-UNAM

Al M. en B. Ignacio Monje Ramírez por su tiempo y ayuda en la realización de este trabajo de tesis

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería y a todos los profesores que integran la sección de Ingeniería Ambiental por la formación y los conocimientos que me fueron otorgados durante mis estudios en la maestría.

Al Ing. Rubén González de la Fuente por su disposición y ayuda a la realización de este trabajo de tesis

Al Ing. Gad Granados, Agustín Machorro y Marco A. Sánchez integrantes de EPIC S.A. por su asesoría, su ayuda y su amistad

A los compañeros del II-UNAM y la DEPI que fomentaron en mí, el trabajo en equipo y el compañerismo, además de haberme brindado su amistad durante todo este tiempo

*A todos ellos, ¡Muchas Gracias!*

## DEDICATORIA

Este trabajo de tesis lo dedico con mucho amor y agradecimiento a mis padres y hermanos que han significado todo en mi vida, por que ellos me han enseñado el verdadero valor de la vida y por que ellos son y serán siempre la fuerza que me impulsará en cualquier proyecto

También dedico este trabajo a todas aquellas personas que de una u otra forma han contribuido a que este momento pueda ser posible:

A la Ing. Rocío Valdés Yáñez por todo el amor, el apoyo y el conocimiento que me brindó durante esos años en que estuvimos juntos, ya que gracias a ella es por quien estoy en este camino y creo que nunca terminaré de agradecerle ese pequeño gran empujón *¡Muchísimas Gracias Ross!!!!*

A mis compañeros y amigos de la Facultad de Ingeniería que aunque lejos, siempre he contado con su gran amistad y apoyo incondicional. Muchas gracias por todo, Víctor, Jesús, Mauricio, Alberto, Oscar y Jair.

A todos los compañeros del II-UNAM y DEPI : Vicente, Francisco, Raquel, Adrián, Wilson, David y Santiago; esperando que el destino nos depare buenos momentos en el futuro

INDICE GENERAL

	Pag.
INDICE DE CUADROS.....	v
INDICE DE FIGURAS.....	vi
INDICE DE PLANOS.....	vii
RESUMEN.....	viii
1. INTRODUCCION.....	1
1.1 Marco de referencia.....	2
2. OBJETIVOS.....	7
2.1 Objetivo general.....	7
2.2 Objetivos específicos.....	7
2.3 Límites.....	7
2.4 Alcances.....	7
2.5 Justificación.....	8
3. TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLAN, ESTADO DE MEXICO.....	9
3.1 Localización geográfica y clima.....	10
3.2 Fisiografía.....	12
3.3 Hidrografía.....	12
3.3.1 Aguas superficiales.....	12
3.3.2 Aguas subterráneas.....	13
3.4 Geología.....	15
3.5 Flora y fauna.....	16
4. IMPLICACIONES AMBIENTALES DERIVADAS DE LA OPERACIÓN DE TIRADEROS A CIELO ABIERTO.....	17
4.1 Lixiviados.....	17
4.2 Biogás.....	23
4.3 Partículas.....	26
4.4 Fauna nociva.....	29
4.5 Problemas de tipo social.....	30
5. EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO EN ESTUDIO.....	32
5.1 Ubicación de los mantos acuíferos de la zona.....	32
5.2 Características topográficas del sitio.....	34
5.3 Balance de agua para el cálculo de la generación de lixiviados.....	36
5.3.1 Consideraciones previas.....	36
5.3.2 Determinación de los parámetros que intervienen en la generación de lixiviados.....	37
5.3.3 Aplicación del método de balance de agua.....	39
5.3.4 Cálculo de la cantidad de lixiviados generados.....	42
5.4 Afectaciones al acuífero.....	46
5.5 Cálculo de la cantidad de biogás generado.....	48
5.6 Detección de partículas viables en el sitio.....	50
6. CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO.....	54
6.1 Reubicación de pepenadores.....	55
6.2 Preparativos de clausura.....	55
6.2.1 Personal.....	55
6.2.2 Señalamientos.....	55
6.2.3 Control de accesos.....	56
6.2.4 Limpieza general.....	56

6.3 Eliminación de fauna nociva .....	56
6.4 Sistema de control de lixiviados .....	56
6.5 Cubierta final y sistema de control de biogás .....	59
6.5.1 Estabilización de taludes .....	59
6.5.2 Capa de venteo de biogás .....	59
6.5.3 Capa de baja permeabilidad .....	60
6.5.4 Capa de drenaje .....	60
6.5.5 Capa de control de erosión .....	60
6.6 Diseño paisajístico .....	61
6.6.1 Concepto .....	62
6.6.2 Vegetación .....	63
6.7 Control de la post-clausura .....	65
7 DETERMINACIÓN DE COSTOS .....	66
8. CONCLUSIONES .....	71
8.1 Recomendaciones .....	73
9. BIBLIOGRAFÍA .....	74
PLANOS .....	77
APENDICE .....	I

## INDICE DE CUADROS

- Cuadro 1. Características de la cubierta final de Prados de la Montaña
- Cuadro 2. Valores promedio de la temperatura de Tultitlán, México
- Cuadro 3. Alturas de precipitación para Tultitlán, México
- Cuadro 4. Dirección y velocidad del viento para Tultitlán, México
- Cuadro 5. Censo de pozos ubicados en el municipio de Tultitlán, Estado de México
- Cuadro 6. Parámetros fisicoquímicos característicos de lixiviados de RSM
- Cuadro 7. Principales tipos de lixiviados
- Cuadro 8. Posibles efectos a la salud causados por sustancias y compuestos encontrados en lixiviados de rellenos sanitarios
- Cuadro 9. Sobrevivencia de bacterias entéricas y otros patógenos en los lixiviados
- Cuadro 10. Algunos de los contaminantes químicos que pueden encontrarse en el biogás
- Cuadro 11. Concentraciones típicas de biogás y parámetros indicadores
- Cuadro 12. Enfermedades causadas por microorganismos encontrados en el aire
- Cuadro 13. Datos utilizados para el balance de agua de Tultitlán, México
- Cuadro 14. Evapotranspiración potencial ajustada para el municipio de Tultitlán, Estado de México
- Cuadro 15. Cálculo de la infiltración de agua al interior de los RSM
- Cuadro 16. Determinación de la cantidad de lixiviado generado en el primer año de cálculo
- Cuadro 17. Determinación de la cantidad de lixiviado generado en el segundo año de cálculo
- Cuadro 18. Determinación de la cantidad de lixiviado generado en el tercer año de cálculo
- Cuadro 19. Balance de agua para una superficie de 6 Has y 3.48 m de altura de RSM
- Cuadro 20. Cálculo del volumen de RSM dispuestos y lixiviados generados hasta el año 2000
- Cuadro 21. Clasificación geofísica de los materiales que conforman el subsuelo del sitio de estudio
- Cuadro 22. Producción de biogás generada en los años de operación del tiradero a cielo abierto del Municipio de Tultitlán.
- Cuadro 23. Resultados del muestreo en el tiradero a cielo abierto de Tultitlán
- Cuadro 24. Resultados del muestreo en el tiradero a cielo abierto de Tultitlán
- Cuadro 25. Resultados del muestreo en el tiradero a cielo abierto de Tultitlán
- Cuadro 26. Listado de requerimientos, soluciones conceptuales y de diseño
- Cuadro 27. Nombres y características de las plantas a utilizar en la clausura del tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlán, Estado de México
- Cuadro 28. Catálogo de conceptos, cantidades y montos correspondientes a la clausura del tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlán, Estado de México
- A1. Datos utilizados para el balance de agua de Tultitlán, México
- A2. Parámetros para la determinación de la fórmula mínima de los residuos sólidos municipales
- A3. Valores ajustados al 100%

## INDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Zonas que comprenden el suelo de Conservación Ecológica de la cuenca del valle de México
- Figura 2. Ubicación del municipio de Tultitlan, Estado de México
- Figura 3. Ubicación del tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlan, Estado de México
- Figura 4. Ubicación de pozos de extracción de agua en el municipio de Tultitlan, Estado de México
- Figura 5. Configuración geológica regional
- Figura 6. Generación de lixiviados en tiraderos a cielo abierto
- Figura 7. Composición y evolución del biogás en un relleno sanitario
- Figura 8. Ciclo insecto/vertebrado interior de las enfermedades de transmisión por roedores
- Figura 9. Configuración de un acuífero típico
- Figura 10. Dirección de las corrientes subterráneas en los acuíferos de zona
- Figura 11. Topografía del tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlan, Estado de México
- Figura 12. Pendientes pronunciadas en el tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlan, Estado de México
- Figura 13. Idealización de las condiciones del subsuelo en el sitio de estudio
- Figura 14. Localización de las alternativas para la construcción del nuevo relleno sanitario del municipio de Tultitlan, Estado de México
- Figura 15. Laguna de evaporación de lixiviados del tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlan, Estado de México

## INDICE DE PLANOS

Nombre	Clave
Topografía	T-1 y T-2
Estabilización de taludes	K-1 y K-2
Control de biogás	G-1 y G-2
Cubierta final	F-1
Control de lixiviados	L-1 y L-2
Laguna de evaporación de lixiviados	L-3
Sistema de drenaje pluvial	Q-1
Caseta y baños	C-1
Planta arquitectónica	A-1
Diagrama de Obra	D-1

## RESUMEN

En México se han formado un gran número de tiraderos a cielo abierto como consecuencia del déficit de cobertura en la disposición correcta de los residuos sólidos municipales (RSM), en estos lugares, diariamente se han dispuesto aproximadamente 48,705 ton a nivel nacional, lo que al año representa 17.8 millones de toneladas que han y siguen contaminando el suelo, el agua superficial y subterránea y el aire de aquellos sitios donde se encuentran; además de representar una fuente de enfermedades que son transmitidas por los vectores que de allí salen a las zonas habitacionales cercanas a esos sitios

Esta situación se agrava cuando el lugar en cuestión se ha formado en una zona de recarga de acuíferos, donde al carecer de toda infraestructura para el control de subproductos, los lixiviados percolan hacia los acuíferos poniendo en grave riesgo sistemas enteros que son una importante fuente de suministro de agua para varias ciudades del país; tal es el caso de la ciudad de México y su área conurbada donde el 54.5% del agua suministrada proviene de los mantos acuíferos. Este problema rebasa cualquier frontera política o territorial debido a que no solo afecta la municipalidad en la que se encuentra, si no que, la contaminación puede afectar la calidad del agua subterránea de muchos otros municipios a kilómetros de distancia, por lo que, debido a esta mala disposición de RSM se ha generado un problema de competencia federal.

Debido a que el plazo otorgado por la NOM-083-ECOL-1996 para regularizar la operación de los sitios de disposición final venció en 1999, la SEMARNAT obliga a los municipios a construir rellenos sanitarios y clausurar los tiraderos a cielo abierto que aún sigan operando; por ello, la mayoría de los municipios mexicanos se ven en la necesidad de construir rellenos sanitarios y de clausurar sus tiraderos a cielo abierto, regularizando con ello la disposición final de sus RSM. Por esta razón este trabajo realizó el anteproyecto de la clausura del tiradero a cielo abierto de Tultitlán en el Estado de México, el cual ha operado por más de 24 años y se encuentra ubicado en las faldas de la Sierra de Guadalupe, zona de recarga del sistema acuífero del Valle de México. Al igual que muchos otros tiraderos en el país, este ha recibido todo tipo de residuos sólidos; municipales, industriales y peligrosos; por lo que los subproductos que genera son altamente contaminantes, en especial los lixiviados.

Para la realización de este trabajo se recopiló información meteorológica e hidrogeológica útil para cuantificar el daño que han sufrido los acuíferos por los lixiviados generados en este sitio, también se realizó una revisión bibliográfica de información acerca de las afectaciones posibles a la salud por la operación de este tipo de sitios. Para la clausura se consultaron las metodologías utilizadas por la U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) y la Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen, Abfallgesetz (GTZ) para la clausura de rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto.

Como resultado de este trabajo se concluyó que en este sitio se generan 16,450 m<sup>3</sup> de lixiviados por año y que en aproximadamente 13.6 años los lixiviados generados por este sitio entrarán en contacto con los acuíferos de la zona; también se estableció que este sitio ha generado 205,627.5 m<sup>3</sup> de lixiviados y 72,000,000 m<sup>3</sup> de biogás a lo largo de los 24 años de operación.

En lo que corresponde al anteproyecto, se diseñaron una serie de actividades para la correcta clausura del tiradero a cielo abierto, la cual culminó con el diseño de una cubierta final que se compone a su vez de cuatro capas que cumplen con un objetivo diferente, este diseño incluye a los sistemas de control de lixiviados y biogás. Y por último se concluyó que el costo de la clausura de un relleno sanitario utilizando esta misma metodología y en condiciones similares es de \$1,387,168 por hectárea de tiradero a cielo abierto llevando la clausura hasta la construcción de un parque recreativo y de \$1,000,000/Ha sin la construcción de dicho parque.

## 1. INTRODUCCIÓN

Gracias al desarrollo del conocimiento y de la tecnología que se ha suscitado en los últimos siglos se ha podido incrementar la esperanza de vida de los seres humanos por lo que su número se ha incrementado en forma alarmante, al grado en que si se sigue con este crecimiento desmedido se prevé que en algunos años no existirán alimentos suficientes para poder sostener tal población. Con este incremento poblacional se ha incrementado la demanda de productos necesarios para la subsistencia de esa población en crecimiento, razón por la cual se han hecho grandes modificaciones a los medios de producción los cuales ahora producen de una manera industrial todos aquellos productos demandados para satisfacer necesidades primarias o secundarias del ser humano (Deffis, 1989).

La creciente demanda y la alta capacidad de producción ha hecho de la humanidad una sociedad consumista, la cual habiendo satisfechos sus necesidades primordiales se han creado necesidades secundarias, las cuales también tienen que ser satisfechas, además, la misma oferta al ser muy competida tiene que modificar la presentación de sus diferentes artículos para que sean más atractivos al consumidor, lo que significa una serie de empaques y embalajes muchas veces más caros o voluptuosos que el producto que contienen.

Por lo tanto, si se toma en cuenta que estos medios y procesos de producción industrializados no cuentan con la capacidad de aprovechar eficientemente los materiales y la energía para producir los diferentes artículos, ya que a lo largo de dichos procesos se generan grandes cantidades de residuos ya sean líquidos, sólidos o en forma de gas (Deffis, 1989); todo ello impacta de manera negativa al ambiente, por lo que la cantidad de residuos que se generan tanto en los procesos productivos como después de la vida útil de cada producto suman enormes cantidades de residuos, los cuales se están vertiendo al ambiente y con ello contaminando el hábitat humano, poniendo en peligro su subsistencia.

Como se mencionó, ha existido un desarrollo en los diferentes medios de producción, por lo que también las características de los productos han cambiado a través del tiempo; transformando a los productos agrícolas sin elaboración alguna en aquellos cuya presentación hace más atractivo dicho

producto. Este cambio de presentación responde a una necesidad del mercado, es decir, la demanda de un producto cada vez más atractivo.

Otro de los problemas causados por este tipo de productos es la sustitución de materiales en la elaboración de empaques o productos, tal es el caso de Polyethylene Terephthalate (PET) por el vidrio, del poliestireno por aserrín y otros; el problema es que al ser en su mayoría materiales derivados del petróleo se dificulta su reincorporación al ambiente, provocando que los residuos generados en los procesos de producción y de consumo de los diferentes productos se genere un gran número de residuos.

Como ya se ha mencionado la cantidad de Residuos Sólidos Municipales (RSM) y sus características han sido modificadas debido a las razones expuestas con anterioridad. Por lo que la generación de este tipo de residuos a nivel nacional aumentó de 0.3 kg/hab-día en la década de 1950, a más de 850 g en promedio en 1998; asimismo, la población se incrementó en el mismo periodo de 30 millones a más de 98 millones, contribuyendo a la fecha a una generación nacional estimada de 83,830 ton/día de residuos sólidos municipales (INE, 1999).

Actualmente, se estima que en México se recolecta únicamente el 70% del total de los RSM generados quedando dispersas diariamente 25,149 ton (INE, 1999), estos datos proporcionados por el Instituto Nacional de Ecología (INE) ya que tal cantidad diaria de RSM dispersos ya hubieran inundado varias localidades del país en basura; este porcentaje de recolección debe estar en el orden del 95%, y la razón de la diferencia entre los porcentajes es que el INE solo reporta la recolección realizada en los horarios normales de trabajo y por los métodos convencionales, sin tomar en cuenta que gran parte de la recolección se realiza a horarios extraordinarios y con métodos no registrados, como lo es el caso de pepenadores con vehículos muy rudimentarios.

Del total recolectado, el INE reporta que el 17% es dispuesto en rellenos sanitarios, esto es, 13,539 ton/día, lo que quiere decir que 66,100 ton se disponen diariamente en tiraderos a cielo abierto no controlados o en tiraderos clandestinos. Tal cantidad de residuos representa un grave deterioro al ambiente y por consecuencia un riesgo inminente para la salud pública, ya que el hombre nunca ha dejado de depender de su hábitat y un daño de esta magnitud repercutirá en un daño así mismo.

Uno de los grandes problemas del país en torno al manejo de los RSM, se encuentra principalmente en la disposición final de esas 66,100 ton/día en tiraderos a cielo abierto, problema que se empeora en las grandes urbes como lo es en la ciudad de México y el área metropolitana, en ella se encuentran concentrados millones de habitantes y por ello también existe un gran número de sitios de este tipo, representando un grave daño al hábitat. Dicho daño puede clasificarse de diferentes formas, ya que dependiendo de la ubicación y de las características del suelo en el que se encuentren ubicados, el daño es mayor o menor.

La creación de los tiraderos a cielo abierto se debe a que en México no se le ha dado la importancia real que reviste el adecuado manejo de los RSM, ya sea por falta de recursos o por negligencia. En los últimos años se han estado realizando grandes esfuerzos por integrar a las principales ciudades del país a las técnicas adecuadas para el manejo integral de los RSM, lo cual es muy importante ya que son éstas las principales generadoras de residuos y tomando en cuenta que cada día que pasa sin resolver el problema son miles de toneladas de RSM que contaminan y deterioran nuestro ambiente con consecuencias muy graves.

## 1.1 Marco de referencia

La clausura de tiraderos a cielo abierto es una práctica que ha quedado en el pasado en países desarrollados, como es el caso de los Estados Unidos y los países europeos, cuyo problema acerca de la existencia de los tiraderos a cielo abierto ha sido solucionado casi por completo, ya que existen graves sanciones para aquellas personas que sean responsables de este tipo de prácticas (<http://www.epa.gov/history/topics/rcra/05htm>). En los siguientes párrafos es posible observar diferentes criterios para la clausura de sitios de disposición final

### *Estados Unidos*

En lo que se refiere a la clausura de tiraderos a cielo abierto en Estados Unidos, la información es muy poca, ya que en éste país se ha abandonado esta práctica desde 1976, año en el que se publicó "La ley para el control de residuos peligrosos y tiraderos a cielo abierto para promover la conservación de recursos"; esta ley indica la disposición del gobierno para identificar e inventariar todos aquellos sitios de disposición final de residuos peligrosos y de residuos sólidos municipales, con el fin de comenzar los estudios pertinentes que lleven a la elaboración de diferentes planes para su disposición adecuada y clausura definitiva

Las sanciones que estableció esta ley en 1976 para aquellas personas físicas o morales que no cumplieran con dicha disposición fue una multa de hasta por \$25,000 Dlls por día incumplido, un año de prisión o ambos. (<http://www.epa.gov/history/topics/rcra/05.htm>)

Actualmente, la U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) se encarga de sanear los diferentes sitios que se encuentren contaminados por tiraderos a cielo abierto antiguos, como es el caso de Spartanburg, Carolina del Sur donde se ha encontrado un antiguo tiradero y se planea sanearlo. También existen casos aislados, principalmente en las zonas denominadas como reservas indias, donde esporádicamente se practica este tipo de disposición de residuos ya que según los reportes es la forma en que acostumbran disponer sus residuos; para solucionar dichas acumulaciones de residuos (ya que nunca llegan a ser grandes cantidades), se procede a transportar dichos RSM al relleno sanitario más cercano, y en caso de que el relleno sanitario se encuentre muy lejos del lugar se construye uno en ese mismo sitio dando una adecuada disposición a los residuos (<http://www.epa.gov/history/topics/rcra/05htm>)

El criterio utilizado por este país para la clausura de sus rellenos sanitarios se centra en siete temas principales (U.S. EPA, 1994)

- a) Tener una permeabilidad menor o igual a la de un sistema de membrana sintética o capa de suelo impermeable, dicha permeabilidad no debe ser mayor de  $1 \times 10^{-5}$  cm/s
- b) Minimizar la infiltración de agua por medio de una cubierta que utiliza una capa de infiltración de 18" de material natural como mínimo
- c) Minimizar la erosión de la cubierta final por medio de una capa de erosión que contenga como mínimo 6" de material natural capaz de mantener vida vegetal
- d) Otorgar el mantenimiento adecuado a dicha cubierta final por un mínimo de 30 años, con el fin de mantener íntegra a la capa final
- e) Mantener y operar el sistema de colección de lixiviados
- f) Mantener un sistema de monitoreo de aguas subterráneas
- g) Mantener en buen funcionamiento el sistema de colección de biogás

En resumen, la U.S. EPA dicta la construcción de una cubierta final que consiste en 7 capas, las cuales se resumen a continuación:

- 1) capa de ventilación de biogás ( 30 cm)
- 2) Capa de baja permeabilidad con material natural ( 60 cm)
- 3) Capa impermeable de material sintético ( 20 mil FML o 60 mil HDPE)

- 4) Capa de drenaje ( 30cm)
- 5) Capa biótica (30 cm)
- 6) Capa filtrante (20 cm)
- 7) Capa para vegetación ( 60 cm)

### *Alemania*

La ley bajo la que se regula el manejo de los residuos sólidos en Alemania es la ley de manejo y disposición de residuos sólidos (Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen, Abfallgesetz), establecida el 10 de Junio de 1972, con la cual se reorganizó el manejo de los residuos en Alemania, especialmente en el campo de los residuos municipales.

En esta ley se contempla la definición de lo que se denomina como residuo, quienes son los responsables de su manejo, así como los métodos y lineamientos para las diferentes fases del sistema de manejo de los RSM e incluye los tiempos límites en los que cada entidad debe cumplir con dicha ley. En Octubre de 1996 la ley fue actualizada acorde con los lineamientos que establece la Unión Europea, en esta actualización se han incluido nuevas disposiciones para la definición de residuo municipal, así como una nueva lista de sustancias consideradas como peligrosas, también junto con esta actualización han delimitado las responsabilidades acerca de la generación y disposición de RSM; en general esta nueva ley contempla toda una economía basada en el manejo de los RSM legislando el reciclaje y la reutilización de los mismos, por lo que se denominó como Ley de Manejo, Reciclaje y Disposición de Residuos Sólidos ([www.umbeltbundesamt.de/uba-info-date/waste-avoidance.html](http://www.umbeltbundesamt.de/uba-info-date/waste-avoidance.html))

Las técnicas y metodologías utilizadas por los alemanes para la clausura de tiraderos a cielo abierto han sido implementadas en México gracias a la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH (GTZ), la cual es la Agencia Alemana de Cooperación Técnica que presta apoyo técnico a organismos mexicanos desde hace más de 20 años. Esta agencia se concentra en la formación profesional, el sector de la salud, la pesca y la cooperación industrial, intensificando la cooperación técnica en la zona metropolitana de la Ciudad de México, zona se ve afectada por una fuerte contaminación ambiental. Los asesores alemanes apoyan a las organizaciones contraparte en la elaboración de planes y estrategias a corto, mediano y largo plazo para contribuir a la reducción de la carga de sustancias contaminantes

Actualmente la GTZ trabaja en un proyecto de saneamiento de varios tiraderos a cielo abierto del Estado de México, principalmente de la zona conurbada de la Ciudad de México, dichos sitios serán caracterizados para poder determinar la mejor solución técnica para cada caso, dichas soluciones se forman a partir de una visión integral del problema, es decir tomando en cuenta todos aquellos factores que intervengan en la clausura y saneamiento de un tiradero a cielo abierto; dicha forma de trabajo se conforma de forma general en siete pasos principales, los cuales se enuncian a continuación (Oeltzschner H & Mutz D , 1994)

- a) Documentación histórica del sitio, mapas topográficos, geológicos, geohidrológicos, etc, así como estudios preliminares del tipo de residuos dispuestos, fotografías, del tipo de operación existente y la evaluación del grado de peligrosidad que representa este tipo de sitio al ambiente.
- b) Actualización de topografía del sitio, de los sitios posibles para crear un nuevo relleno sanitario y de aquellas áreas que se utilizarán como bancos de material y área para estabilizar taludes
- c) Elaboración de un plan de monitoreo de aguas subterráneas del área circundante al tiradero.
- d) Elaboración del diseño de la clausura con el fin de recuperación del sitio
- e) Determinación de las necesidades de equipo y personal, para los trabajos de clausura y de post-clausura.
- f) Elaborar el estudio financiero para la ejecución de los trabajos y determinar las fuentes de financiamiento.
- g) Ejecución de los trabajos de clausura, rehabilitación y reintegración del lugar al ambiente.

La cubierta final, que es la base de la clausura de un tiradero a cielo abierto se compone de cuatro capas, las cuales están pensadas para ser empleadas en tiraderos a cielo abierto y en países o comunidades que no cuentan con los recursos suficientes para la elaboración de este tipo de trabajos, por lo que los materiales pueden no ser de banco, e incluso se propone la utilización de residuos de la construcción para la formación de las capas de drenaje (Oeltzschner H & Mutz D., 1994) Las características de dichas capas se enuncian a continuación.

- 1) Capa permeable de material granular ( 30 cm de espesor).
- 2) Dos capas de material de baja permeabilidad cada una de 25 – 30 cm de espesor.
- 3) Capa de drenaje con material granular ( 20 cm de espesor).
- 4) Cubierta con material orgánico capaz de sostener una capa vegetal (50cm de espesor) .

### México

En materia de clausura de tiraderos a cielo abierto en México, no existe ningún trabajo sobresaliente, ya que todas las experiencias en este campo han sido saneamientos que obedecen a intereses económicos, políticos o de otra índole. Es necesario recalcar esto, ya que aún no existe algún relleno sanitario que haya realizado las obras que pueden denominarse propiamente como clausura de un sitio de disposición final de RSM a la fecha.

A partir de los años 40s el Distrito Federal contaba principalmente con dos sitios de disposición final de RSM, Santa Cruz Meyehualco y Santa Fe; el primero se ubicaba en la delegación Iztapalapa con una superficie de 150 hectáreas y el segundo sitio se encontraba en la delegación Alvaro Obregón y contaba con una superficie de 60 hectáreas (DGSU, 1986).

En 1983 el hasta entonces Departamento del Distrito Federal (DDF) inició el saneamiento y clausura del tiradero a cielo abierto de Santa Cruz Meyehualco, ya que en un principio este lugar se encontraba a las afueras de la mancha urbana, pero conforme el tiempo pasó la mancha urbana creció tanto que el sitio ya estaba dentro de la misma, por lo que representaba un gran riesgo a la salud pública de aquella zona, también la clausura se debió a la presión pública debido a los numerosos incendios que ocurrieron en este tiradero. La clausura consistió en el esparcimiento de los RSM, una compactación y la construcción de una capa de cubierta con material limo – arcilloso de 40 centímetros de espesor, además de la perforación de pozos de venteo de biogás y también se construyeron drenajes para evitar la infiltración de aguas pluviales (DGSU, 1986).

Debido a esta clausura se estimuló a los pepenadores para la creación de otros tiraderos en el Distrito Federal, entre ellos se destacaron Santa Catarina, San Lorenzo Tezonco, Tlahuac, Milpa Alta, Tlalpan y Bordo Xochiaca. Los dos primeros mencionados fueron operados por los pepenadores y los restantes por las delegaciones, de acuerdo a sus jurisdicciones. En el caso particular de Bordo Xochiaca, éste fue utilizado por las delegaciones Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero, así como por la central de Abastos (DGSU, 1986).

Debido a la gran protesta pública, así como por la preocupación de las autoridades de aquél entonces en 1985 se inicia la clausura de los tiraderos de Bordo Xochiaca, Milpa Alta, San Lorenzo Tezonco y Tlalpan, estos dos últimos fueron sellados con membranas sintéticas y material de cubierta final para evitar al máximo la infiltración de agua pluvial, así como sus correspondientes pozos de venteo de biogás. En lo que respecta a Santa Catarina y Santa Fe, por su magnitud no pudieron ser clausurados, además de no contar con sitios alternos de disposición (DGSU, 1986).

En 1985 en Santa Catarina, se clausuraron sus primeras etapas (2,3,4 y 6) con la finalidad de comenzar a operar como un relleno sanitario, tales actividades consistieron en el esparcimiento de los residuos, su compactación y cubierta con material limo – arcilloso de un espesor de 30 centímetros. En 1986 en Santa Fe se comenzó a realizar algo similar, ya que se adecuó el predio de Prados de la Montaña para operarlo como relleno sanitario, ya que en ese momento no existía otro lugar en el que se pudieran depositar los RSM (U.S. EPA, 1989).

Ya para el año de 1994 y contando con un nuevo lugar para el confinamiento de los RSM, Bordo poniente ubicado al poniente del D F , se comenzaron los trámites para la clausura de Prados de la Montaña, los cuales por especificaciones de los inversionistas dueños de terrenos adyacentes al sitio y por las necesidades urbanísticas de la Zona Especial de Desarrollo Controlado (ZEDEC) Santa Fe a la que pertenece Prados de la Montaña, se estipuló que la clausura debería estar apegada a la normatividad que dicta la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (U.S. EPA) aplicada en el estado de California (López y Sámano, 1996)

Esta ha sido la clausura más completa que ha tenido un sitio de disposición final en México, lo cual se explica por la plusvalía de la ZEDEC, su cubierta final consistió de 6 capas de diferentes materiales y diferentes grados de compactación, así como diferentes sistemas de extracción de lixiviados y biogás, cabe señalar que este lugar es el único que cuenta con un sistema activo de extracción de biogás y donde se quema dicho subproducto En el cuadro 1 se muestran las características de la cubierta final construida en prados de la Montaña para su clausura.

Cuadro 1. Características de la cubierta final de Prados de la Montaña

CAPA	VOLUMEN m <sup>3</sup>	CLASIFICACIÓN SUCS	GRANULOMETRÍA				COMPACTACIÓN	EQUIPO	BANCO
			AM cm	No 4 %	No.40 %	No.200 %			
Tierra vegetal e= 20 cm	50 000								
Protección contra erosión e=20cm	54 087	SC o CL	8	90	82	42	95 % PVSM 8 Pasadas	Rodillo vibratorio 10 a 15 tm	La loma
Sello e=30 cm	62.717	ML O CL	10	100	87	57	95 % PVSM 8 Pasadas	Pata de cabra D- 815	La ponderosa
2ª Capa base e=30 cm	64.650	SC	10	90	73	47	95 % PVSM 8 Pasadas	Rodillo liso vibratorio 10 a 15 tm	Material de excavación
1ª Capa base e=30 cm	64.650								
Material para dar niveles e=variable	140 359						Solo con bulldozer	Bulldozer	Material de excavación
<b>Total</b>	<b>436,463</b>								

Fuente: López S Y Sámano L. 1996

En México se han realizado otras clausuras de tiraderos a cielo abierto, los cuales siempre han consistido en el esparcimiento y compactación, así como la construcción de capas de material sintético o natural semi - impermeable, sin tomar en cuenta diferentes aspectos que son importantes para la ingeniería ambiental. No han existido más clausuras como la realizada en Prados de la Montaña, debido a que la mayoría de los municipios no cuentan con el presupuesto o plusvalía en los terrenos en los que se encuentran sus tiraderos, por lo que es necesario establecer una metodología que indique un cierre que cumpla con los lineamientos mínimos para que puedan ser practicados en la clausura de sus tiraderos y la construcción de rellenos sanitarios.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Realizar el anteproyecto de la clausura del tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlán, Estado de México; estableciendo una metodología de cierre de sitios de disposición final útil en sitios similares de México

### **2.2 Objetivos específicos**

- a) Justificar la clausura de los tiraderos a cielo abierto, señalando los impactos al ambiente causados por los principales subproductos
- b) Cuantificar la contaminación a los acuíferos por la infiltración de lixiviados, utilizando el balance de agua.
- c) Cuantificar las emisiones de biogás a la atmósfera producidas por el tiradero a cielo abierto utilizando un modelo de cinética de primer orden
- d) Dimensionar los sistemas para el control de las emisiones de biogás y lixiviados, así, como especificaciones para la cubierta final y diseño paisajístico del sitio, utilizando para ello procedimientos de ingeniería y haciendo uso de diferentes normatividades ajustadas a las condiciones locales

### **2.3 Límites**

- a) El trabajo se limitará al área que ocupa actualmente el tiradero a cielo abierto
- b) Los problemas de tipo social generados por la clausura del tiradero serán solucionados a nivel propuesta sin llegar a estudios detallados.

- c) El estudio de costos se realizará con el catálogo de precios unitarios de la Comisión Nacional del Agua en su versión 2000

## 2.4 Alcances

- a) Este trabajo servirá como base para establecer una metodología para la clausura de tiraderos a cielo abierto en México
- b) Se realizarán cuatro inspecciones de campo para determinar las características del sitio de estudio
- c) La realización del presente trabajo incluye la entrevista de diferentes autoridades municipales que se encargan del sistema de manejo de los RSM en el municipio de Tultitlán
- d) El análisis de los impactos se realizará de forma bibliográfica y analítica para el cálculo de los niveles de contaminación por biogás y lixiviados.
- e) Los aspectos sociales y de cualquier otra índole solamente serán mencionados, ya que no forman parte de los alcances de este trabajo
- f) Mediante toma de muestras de campo se realizará la detección de contaminantes aerobiológicos en el tiradero a cielo abierto.
- g) Se realizará un análisis de costos, donde se muestren las partidas de más importancia en la clausura del sitio
- h) En este trabajo se obtendrá un costo unitario para la clausura de este tipo de sitios en México

## 2.5 Justificación

En México se producen diariamente 83,830 toneladas de RSM, de los cuales aproximadamente 66,100 toneladas son dispuestas en tiraderos a cielo abierto existentes en todo el país (INE, 1999), lo cual indica un grave subdesarrollo en el sistema de manejo de residuos en nuestro país.

Estas prácticas de disposición final de los RSM en tiraderos a cielo abierto producen graves deterioros en el ambiente, debido a que en este tipo de lugares se carece de cualquier tipo de control en la aceptación de residuos, por lo que se propicia el depósito de residuos peligrosos e industriales, con ello la peligrosidad de los tiraderos se incrementa de forma drástica. Lo anterior provoca que cada una de las toneladas dispuestas de esta forma generen subproductos más agresivos que los producidos en rellenos sanitarios, estos subproductos contienen altas concentraciones de contaminantes y sustancias peligrosas que generan biogás y lixiviados; estos pueden migrar a las afueras del sitio y producir malos olores y contribuir al cambio climático mundial en el caso del biogás; y contaminar aguas superficiales, subterráneas y suelos en el caso de los lixiviados (DGSU, 1986).

Otro problema que presenta la operación de un tiradero a cielo abierto es que se convierte en fuente de una gran variedad de fauna nociva la cual es portadora de enfermedades que pueden afectar al ser humano y provocar graves epidemias en las zonas aledañas a los tiraderos a cielo abierto, pues en esos lugares abundan perros, ratas, gatos, moscas y mosquitos entre otros; lo cual deteriora la salud de todas aquellas personas que viven en las cercanías de los tiraderos (Henry y Heinke, 1999).

Además de los efectos nocivos al ambiente y a la salud humana, la disposición final de RSM en tiraderos a cielo abierto genera problemas de tipo social que repercuten en la economía y en la política de los lugares en donde se encuentre el sitio. Esto se debe a que en los RSM dispuestos se encuentra una gran cantidad de materiales que poseen valor en el mercado del reciclaje y en México las diferentes actividades relacionadas con el reciclaje se realizan de manera informal, por lo que personas que emigran de zonas rurales a las ciudades al carecer de oportunidades de trabajo se establecen en los alrededores de los tiraderos a cielo abierto o incluso dentro de ellos para separar de los RSM aquellos materiales que aún poseen valor, encontrando así una fuente de trabajo y en los tiraderos a cielo abierto un lugar para establecerse (Deffis, 1989).

La actividad realizada por este tipo de personas es definitivamente muy importante, ya que recuperan diversos tipos de materiales y le devuelven valor al rescatarlos de los RSM; esta actividad al realizarse de manera informal se realiza en condiciones infrahumanas y poco saludables, por lo que es desaprobadada por el resto de la sociedad, ya que desprecian el trato con personas que trabajen y vivan por, y en la basura, razón por la cual son rechazados y condenados a vivir en los tiraderos (Deffis, 1989). Este rechazo es un grave problema social, ya que la sociedad no comprende que el trabajo realizado por este tipo de personas es tan importante como cualquier otro, pero debido a que no se ha regularizado el manejo de los RSM en nuestro país aún se realiza en condiciones totalmente reprobables; creando a su vez otro problema de índole social y político, ya que este tipo de grupos es susceptible de manipulaciones políticas, pues diferentes organizaciones los utilizan como fuerzas de choque, para formar grandes contingentes políticos y para obtener votos incondicionales; todo ello a cambio de promesas casi siempre incumplidas de suministro de servicios básicos como agua potable, energía eléctrica, drenaje, escuelas, etc.

Analizando los puntos anteriores es posible observar que la práctica de disponer de forma final los RSM en tiraderos a cielo abierto produce graves daños al ambiente, a la salud humana y a la sociedad; todo ello provoca a su vez grandes gastos sociales en la remediación de los efectos de dicha contaminación, por lo que se forma un ciclo de acciones y consecuencias que recae en un mayor subdesarrollo para México. Por estas razones, es prioritaria la necesidad de la clausura de todos aquellos sitios de disposición final que operen como tiraderos a cielo abierto, ya que en la medida en la que estos sigan operando el deterioro ambiental y social continuará, con lo que la remediación será más difícil y costosa

### **3. TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLÁN, ESTADO DE MÉXICO**

Tultitlán, municipio ubicado en la porción centro-oriental del Estado de México, fue bautizado en lengua náhuatl como “Lugar junto al tule”. El historiador Fernando de Alba Ixtlixóchitl lo menciona como pueblo desde los días de la Tula Imperial, perteneciente a uno de los distritos militares de los tlahtocáyotls (provincias gobernadas por un Tlatoani) (INEGI, 1995).

Este municipio cuenta con una superficie de 71.09 km<sup>2</sup> de extensión, su cabecera, Tultitlán de Mariano Escobedo se localiza geográficamente a los 19° 38' 02" de latitud norte y a los 99° 09' 58" de longitud oeste del meridiano de Greenwich. El municipio colinda al norte con Cuautitlán, Tultepec y Nextalpan; al sur, con Tlalnepantla y el Distrito Federal; al este, con Ecatepec, Coacalco y Tecámac, y al oeste, con Cuautitlán Izcalli (INEGI, 1995).

La ubicación de este municipio se muestra en la figura 1

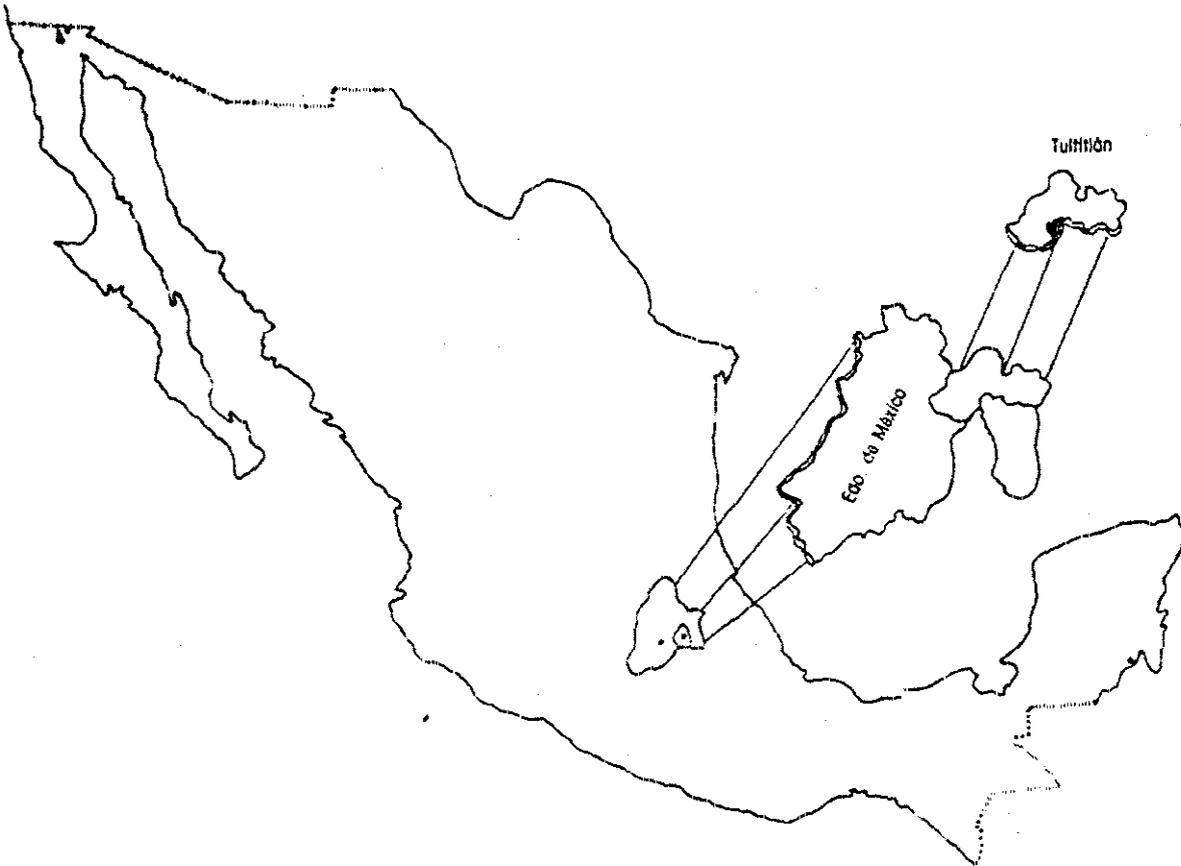


Figura 1 Ubicación del municipio de Tultitlán Estado de México

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y CLIMA

La zona del tiradero se encuentra en la porción sur del municipio de Tultitlan, a escasos 6 km al Sureste de la cabecera municipal. Su ubicación está en las siguientes coordenadas. En la figura 2 es posible observar la localización del tiradero a cielo abierto (INEGI, 1995).

Extremo SE: N19°35'26.8"; W99°08'54.5"  
 Extremo NE: N19°35'33.7"; W99°09'04.1"  
 Extremo NW: N19°35'26.4"; W99°08'59.8"

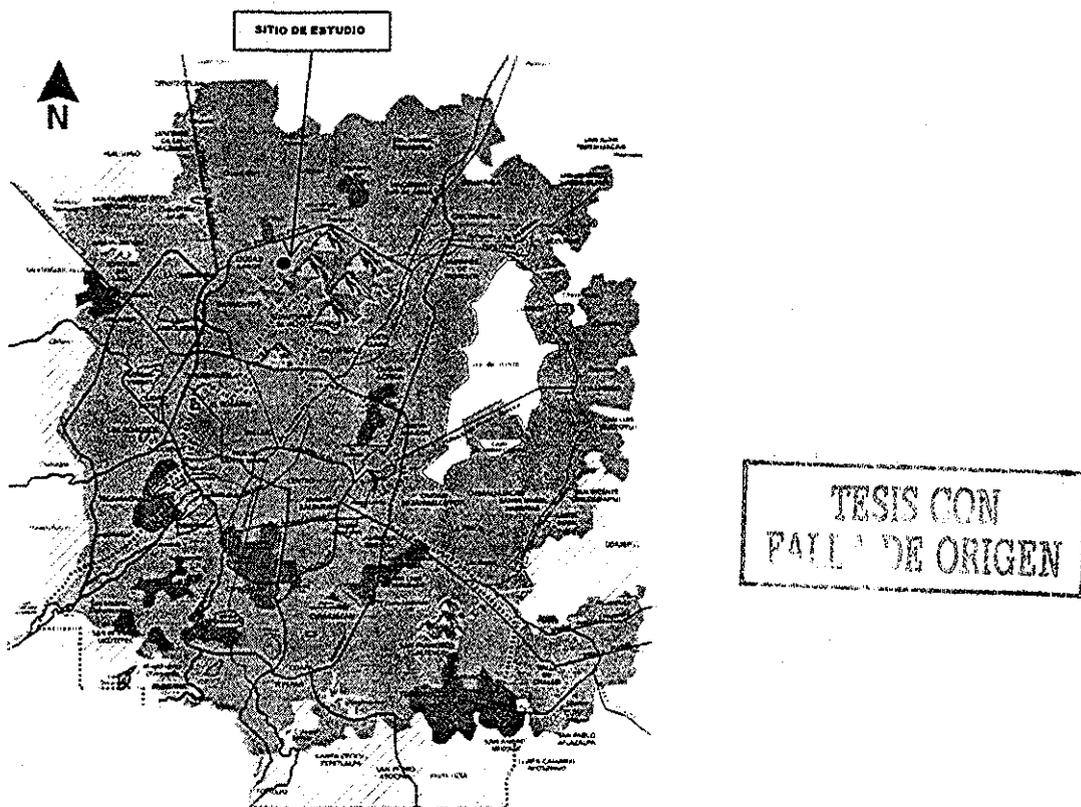


Figura 2 Ubicación del tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlan Estado de México.

El clima de la zona tiende a ser templado-subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media mensual se ha obtenido considerando una estación climatológica, la cual se identifica con la clave: 15073 (ERIC, 1996). La información de la estación es variada, ya que existen años en los que no se tienen registros e incluso hay meses en los que no los hubo. La información obtenida es el resultado de 27 años de observación en la estación citada.

Cuadro 2. Valores promedio de la temperatura en Tultitlan, México

ESTACION	15073	Psa. Guadalupe Tultitlan, México										
TEMP. [°C]	EN	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
PROMEDIO	4.96	5.73	8.58	10.86	12.71	13.97	13.32	12.87	12.75	10.25	7.81	6.28
PROMEDIO ANUAL=												10.01

Fuente: ERIC, 1996

Así mismo se ha obtenido la información acerca de la precipitación pluvial en la zona, información que proviene de la misma fuente. Cabe señalar que sus condiciones son muy parecidas a las registradas en el Distrito Federal, razón por la cual más adelante se realizan consideraciones para calcular diferentes parámetros importantes para este trabajo. Dicha información puede observarse en el cuadro 3

Cuadro 3. Alturas de precipitación para Tultitlán, México.

ESTACION	15073	Psa. Guadalupe Tultitlán, México										
PREC. [mm]	EN	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
PROMEDIO DIARIO	0.26	0.22	0.36	0.53	2.00	4.46	4.48	4.20	3.93	1.55	0.28	0.19
MENSUAL TOTAL	7.92	6.95	11.30	16.33	61.94	138.36	138.80	130.20	121.78	48.10	8.78	6.01
TOTAL ANUAL =												696.47

Fuente: ERIC. 1996

Otro de los factores climáticos más importantes a considerar en este trabajo será el viento, ya que dependiendo de su dirección y velocidad será la forma en la que afecten los malos olores y las partículas suspendidas, afectaciones que se verán con más detalle en el capítulo correspondiente. La recopilación de esta información se puede observar en el cuadro 4 y proviene de la misma estación climatológica ubicada en el municipio de Tultitlán, Estado de México.

Cuadro 4. Dirección y velocidad del viento para Tultitlán, México.

ESTACION	15073	Psa. Guadalupe Tultitlán, México										
AÑO	EN	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
1981	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	NE <sup>1</sup>	NE <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	N <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>
1982	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>
1983	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	-	SW <sup>1</sup>	N <sup>1</sup>	S <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	N <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>
1984	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	S <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	NE <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	S <sup>1</sup>	S <sup>1</sup>
1985	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	S <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>
1986	SW <sup>1</sup>	S <sup>1</sup>	S <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	-	-	W <sup>1</sup>	N <sup>1</sup>	N <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>
1987	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	N <sup>1</sup>	NE <sup>1</sup>	S <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>
1988	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>
1989	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	NE <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>
1990	SW <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	SW <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	W <sup>1</sup>	-	-	-

Fuente: SAHR, Dirección general, Servicio Meteorológico Nacional

<sup>1</sup> Ventolina (0.6-1.7 m/seg) en la escala de Beaufort.

### 3.2 Fisiografía

El tiradero a cielo abierto de Tultitlán se encuentra dentro de la subprovincia fisiográfica conocida como Cuenca de México, cuya importancia radica en que dentro de ella se encuentra la zona urbana más extensa y habitada de la República Mexicana, el Distrito Federal.

La Cuenca de México es una cuenca que inicialmente fue exorreica, formada desde finales del Pleistoceno hasta el Holoceno, mediante la continua actividad volcánica que a efecto de posibles fallas tectónicas profundas, permitieron la producción de grandes volúmenes de lava y cenizas. A partir del cierre de la cuenca, debido ello a la formación de la Sierra de Chichinautzin (Terciario Superior y Cuaternario), la Cuenca de México al igual que otras cuencas vecinas como la de Puebla, Texcoco y Chalco, generaron lagos someros y por ende, gran cantidad de materiales finos lacustres que se intercalaron con los productos emitidos por los volcanes en derredor. De esta manera, la Cd de México se encuentra sobre antiguos depósitos lacustres intercalados con productos volcánicos del Terciario y Cuaternario, lo que explica la existencia de un sistema acuífero con materiales granulares de permeabilidad muy heterogénea (González, 2000).

La Cuenca de México forma parte a su vez de una gran provincia volcánica desarrollada a partir del Mioceno, la cual representa un gran misterio en cuanto a su origen. Denominada Cordillera Volcánica Transmexicana (C V T), se inicia en la porción centro-oeste de la República Mexicana con gran actividad volcánica; en esta se encuentran mesetas de basalto, tobas y conos de composición media a básica, aflorando solo pequeños manchones de rocas sedimentarias dentro de la masa ígnea. El gran número de aparatos volcánicos formados generaron diversas sierras y cadenas montañosas, entre las cuales se encuentran valles, llanuras y cuencas (como la de México), constituidos en gran parte por rellenos aluviales o lacustres que contienen gran variedad de rocas mezcladas con cenizas volcánicas (González, 2000).

La morfología de la zona por contraste, consiste de estructuras volcánicas rodeadas por una planicie de origen fluvio-lacustre, cuyos componentes son en general arenas, limos y/o arcillas. La forma de los volcanes indica la presencia de domos principalmente, con coladas de lava y piroclastos de composición intermedia a ácida.

### 3.3 Hidrografía

#### 3.3.1 Aguas Superficiales

No existe ningún río de importancia, sólo algunos arroyos; sin embargo, es necesario mencionar que hace algunos años en el extremo occidental del municipio corría el único río importante, denominado Río Cuautitlán, el que fue cortado por la construcción de la presa de Guadalupe, esta obra fue construida a causa de las graves inundaciones que ocasionaba en las épocas de lluvia.

Dicho lago fue desecado por la construcción del Gran Canal del Desagüe, que desaloja las aguas negras y pluviales de la ciudad de México, y que cruza el municipio en su parte oriental.

Cabe mencionar al Río Tultitlán o del Molinito, el cual nace en Atlámica, municipio de Cuautitlán y se adentra en Tultitlán, donde se divide para formar en río de la Garita, la Zanja poblana, el canal de Cartagena, en San Francisco Chilpan, la Zanja Magariña en Tepalcapa y la Acosela, mismas que en conjunto conducían anteriormente grandes volúmenes de agua que sirvieron para el riego de los latifundios o para el drenaje de las aguas pluviales (INEGI, 1995).

En 1966 se construyó un canal muy importante, denominado Canal interceptor o Emisor Poniente, que capta y da salida a las aguas servidas de la Ciudad de México. Este canal atraviesa el municipio de Sur a Norte en más de 7.2 kilómetros.

### 3.3.2 Aguas Subterráneas

El sistema acuífero de la región según se sabe se comporta como un acuífero libre, es decir, no existe material impermeable o poco permeable que obstruya el techo del acuífero y lo condicione a presiones mayores a la atmosférica. La profundidad del agua, encontrada a 50 metros de profundidad, corresponde a la zona de la planicie, de tal forma que en las cercanías de la sierra de Guadalupe, la profundidad se incrementa (González, 2000). De acuerdo a cálculos, se piensa que el nivel freático se aproxime a los 120 metros en el sitio de estudio.

Los pozos existentes en las cercanías del lugar de estudio presentan caudales variables, debido a que presentan problemas de incrustación en el sistema de extracción, causando una considerable disminución del caudal y por tanto, de los caudales específicos de las mismas. De esta forma, resulta difícil establecer a priori los caudales específicos resultantes de las características granulométricas del sistema acuífero, mismo que se encuentra en materiales areno-limosos en general.

La historia geológica de la región supone la existencia de un gran cúmulo de materiales volcánicos intercalados con lacustres y fluviales, lo que ha de entenderse como una granulometría heterogénea, que si bien pueden predominar las arenas y limos, pueden coexistir gravas y alguna que otra colada de lava y tefra. El flujo de agua subterránea tiende, para el caso específico de la zona de estudio, hacia el oeste y nor – oeste, debido a esto, la sierra de Guadalupe se comporta como una zona de recarga evidente del sistema acuífero de esta zona (González, 2000).

Como se ha mencionado con anterioridad, el tiradero a cielo abierto por tanto, se encuentra ubicado en una zona de recarga de acuíferos, por lo que el saneamiento de dicha zona es inminente.

En lo que respecta a los pozos existentes, es importante su ubicación y análisis, ya que es por medio de ellos como es posible conocer el estado en el que se encuentra el acuífero. Este pequeño censo se ha basado en la información recopilada de estudios previos, así como de la existente en el propio Municipio de Tultitlán. De esta solo se ubicaron 8 obras, algunas de las cuales como se verá, extraen menos de 30 lps. Los niveles estáticos se encuentran por los 50 metros de profundidad, incrementándose el nivel hacia las laderas de la sierra de Guadalupe. Si bien no se tienen obras cercanas al tiradero a cielo abierto, se prevé, en base a los datos extraídos de los pozos existentes en la planicie, que la profundidad del acuífero esté a no menos de 120 metros de profundidad, suponiendo que el gradiente hidráulico tenga al menos 4/6 partes de la pendiente del terreno (González, 2000).

Las obras censadas, han sido perforadas en promedio, a los 250 metros de profundidad, regla común del antiguo CEAS (Comisión Estatal de Aguas y Saneamiento del Estado de México, ahora Comisión de Aguas), ya que estas obras fueron perforadas por esta institución y posteriormente entregadas al municipio. De esta forma, el Censo referido se resume en el cuadro 5.

Cuadro 5. Censo de pozos ubicados en el municipio de Tultitlán, Estado de México

Tipo, No y Nombre de la obra	PTO (m)	NE (m)	ND (m)	Q (lps)	DTD	ENT (msnm)	ENE (msnm)
Pozo # 4, Sto Domingo 1	+ 250	+ 51	----	26.6	8"	+ 2250	+ 2199
Pozo # 5, Sn Mateo Cuauhtepac	+ 250	+ 47	----	40	8"	+ 2247	+ 2200
Pozo # 3, Viveros	+ 240	+ 48	----	35.7	8"	+ 2246	+ 2198
Pozo # 2, Sto Domingo 2	+ 249	54.20	86.42	65	8"	+ 2245	+ 2190.80
Pozo # 1, Tultitlán (fuera del área cartografiada)	+ 230	53.40	----	En reparación	----	+ 2245	+ 2191.60
* Pozo # 6, Cuauhtepac 1 (fuera del área cartografiada)	250	47.54	105.54	----	----	----	----
* Pozo # 7, Cuauhtepac 2 (fuera del área cartografiada)	250	73.70	143.96	----	----	----	----
* Pozo # 8, La Sardaña (fuera del área cartografiada)	250	70.89	129.67	----	----	----	----

\* Información proporcionada por Comisión de Aguas del Edo de México, información que está por demás el decirlo, no se consideró dentro de la cartografía existente ya que están geográficamente fuera de esta.  
Fuente: González, 2000



### 3.4 Geología

La historia geológica de la Cuenca de México contempla la generación de diversos procesos tectónicos, que permitieron la formación de grandes océanos y etapas de volcanismo de varios millones de años de antigüedad. En estudios geológicos de investigación, se han realizado perforaciones de hasta 3000 metros de profundidad, detectándose a través de éstas la secuencia estratigráfica de la zona, en donde las rocas calcáreas han sido encontradas a profundidades variables, de entre 1,300 y más de 2000 metros; los materiales restantes corresponden a conglomerados, calizas lacustres y materiales volcánicos de diferentes composiciones (INEGI, 1995).

Considerando la secuencia litológica definida en estudios preexistentes, se considera que el volcanismo comenzó desde el Mioceno y continuó hasta el Holoceno. Durante dicha actividad se generaron una gran diversidad de productos volcánicos de composición desde ácida hasta básica, siendo los primeros de constitución dacítica y andesítica y los últimos, de composición basáltica. De esta forma, las formaciones volcánicas más antiguas son representadas por las rocas extrusivas del Mioceno Medio y las más recientes, por la Fm Chichinautzin (González, 2000).

En la zona de estudio se encuentran flujos de ceniza que contienen bloques de andesita y dacita, cubiertos en las porciones altas de los cerros, por lavas y brechas de la misma composición, a esta unidad se le conoce como Formación Otomí; y conforme a Mooser, Fm Tarango.

La formación Otomí (Tqt), se encuentra caracterizada por estar formada en su mayor parte por depósitos piroclásticos, que se presentan como flujos lobulados que, en comparación con los que se encuentran en otras unidades de la cuenca, son los que más se extienden. De acuerdo a lo observado, existen varias secuencias volcánicas dentro de esta unidad, en la que predominan los flujos piroclásticos, principalmente los de ceniza, entremezclados con fragmentos de lava de composición andesítica y dacítica, en tamaños de hasta 1 metro de diámetro. Las lavas de esta unidad se encuentran únicamente aflorando en las regiones altas de la Sierra de Monte Alto, en las que son características la intercalación de brechas volcánicas con las coladas lávicas. El espesor máximo que se le estima a esta unidad es de 1,300 metros en el cerro Las Palomas (González, 2000).

Esta unidad se originó en un estratovolcán que se encuentra bastante erosionado, posiblemente por los periodos glaciáricos del Pleistoceno.

De igual forma, la formación que corona a la sierra de Guadalupe, esta cartografiada como Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano, y a los cerros ubicados al poniente de la sierra, como Rocas extrusivas del Mioceno Medio y Tardío (González, 2000).

En la figura 4 es posible observar la configuración geológica de la región.



Figura 4. Configuración geológica regional  
Fuente: González 2000

### 3.5 Flora y Fauna

Como en muchas otras zonas de cuenca de México, en esta zona la flora es escasa debido al constante proceso de urbanización que sufre el municipio; sin embargo, existen pequeñas zonas arboladas en donde es posible encontrar a diferentes tipos de árboles como el pirú, jacaranda, trueno, piracanto, eucalipto, fresno, sauce, casuarina, ahuehuete y algunos tipos de pinos. Existe una serie de plantas medicinales, las cuales pueden encontrarse en forma natural, por ejemplo se encuentran el gordolobo, marrubio, ruda, albahaca, manzanilla, malva, gigantón, artemisa, leololiche, romero, hinojo, caferita, té de limón y de milpa, aquequelite, golondrina, ajeno, mejorana y borraja. En lo concerniente a las flores de ornato existe la dalia, geranio, bugambilia, jazmín, platanillo, gloria, plumbago, crisantemo, margarita, violeta y geranio (INEGI, 1995).

Como el nombre de Tultitlán lo menciona, existen también tules en la parte occidental del municipio, lugar donde se establecieron los primeros pobladores, en la margen del lago de Xaltocan.

Respecto a la fauna, cabe señalar que en esta zona es escasa y se reduce a algunos mamíferos y aves. Entre los mamíferos es posible encontrar a la tuza, tlacuache, armadillo, liebre, conejo, zorrillo, rata de campo y doméstica, zorro, ardilla y algunas variedades de víboras. Acerca de las aves es posible encontrar a la gallareta, gorrión, golondrina, colibrí, pichón, tórtola, cuervo, pato, tordo, azulejo, gavián, tecolote, pinzón y gaviilancillo (INEGI, 1995).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## **4. IMPLICACIONES AMBIENTALES DERIVADAS DE LA OPERACIÓN DE TIRADEROS A CIELO ABIERTO**

### **4.1 Lixiviados**

Uno de los problemas más graves que conlleva la disposición final de los RSM utilizando el método de relleno sanitario es la generación de lixiviados, los cuales se generan de una forma más drástica en los lugares en que se disponen de manera inadecuada los RSM, como es el caso de los tiraderos a cielo abierto.

Los lixiviados son líquidos que percolan a través de las diferentes capas de RS en los sitios de disposición final o en los lugares donde se acumulan los RS como es el caso del tiradero a cielo abierto de Tultitlán Edo de México. Estos lixiviados se forman por la acumulación de humedad en el interior de los residuos, ésta humedad proviene del agua que liberan los residuos debido a su diferente composición y fuente de generación; a la humedad aportada por el material de cubierta y por el subsuelo en contacto con los residuos, pero principalmente la humedad proviene de la infiltración de agua de lluvia a través de los estratos de residuos sólidos. Esta humedad percola a través de los RS que se encuentran en fase de descomposición arrastrando a su paso material disuelto, en suspensión, fijos ó volátiles, además del arrastre de material también existe una solubilización de materiales orgánicos e inorgánicos, lo cual crea una corriente líquida cuya composición es extremadamente compleja.

Dicha composición puede observarse en el cuadro 6.

Cuadro 6. Parámetros fisicoquímicos característicos de lixiviados de RSM.

Parámetro mg/L	Lee, 1986	Bachi, 1990	Zolten, 1991	Orta, 1999
pH	7.5	8.0	8.5	8.6
SDT	20 000	55 000	44,900	18,200
SST			220	1,036
Conductividad (*)	8,000	72 500		37,433
DBO	30 000	99,000	33 360	13,829
DQO	50 000	195,000	89,520	37 667
COT	10 000	40 000	2,798	
Alcalinidad total	10,000	15,000	20 850	9,650
Dureza	10,000	225,000		
Cloruros	2,000	11,375	2 467	
N-total Kjeldahl	500	3 320		5,292
N-amoniacal	400	1,200	1 106	3,741
N-nitratos	10	250		17
N-nitritos		1 46		
Fósforo total	50	234	130	343
Sulfatos	1 000	1 850	1 558	
Calcio	3 000	2 500	7 200	
Sodio	1 500	6,010	7,700	
Hierro	1 000	4,000	2,820	43 67
Manganeso		400	125	
Aluminio		85		
Zinc	30	731	370	
Plomo	1	14	2	0.24
Cadmio	0.1	0.4	17	0.04
Mercurio		3		
Arsénico		70		0.2

(\*) =  $\mu\text{mhos/cm}$   
Fuente: Monje 2001

Tal solubilización y arrastre de materiales son las que hacen que los lixiviados adquieran características contaminantes altamente agresivas al ambiente como lo son elevadas cargas orgánicas y de metales pesados, que entre otras cosas, presentan los lixiviados. Para considerar la importancia contaminante de este subproducto, es posible comparar en orden de magnitud que un lixiviado de 1 a 5 años de operación del sitio representa 100 veces más contaminación orgánica medida como demanda bioquímica de oxígeno DBO comparada con la existente en un agua residual típica urbana (Bachi, 1990 y Orta *et, al.*, 1997).

En la figura 5 se muestra esquemáticamente el proceso de generación de lixiviados en un sitio donde se disponen de manera inadecuada los residuos sólidos, es decir, un tiradero a cielo abierto como es el caso de Tultitlan

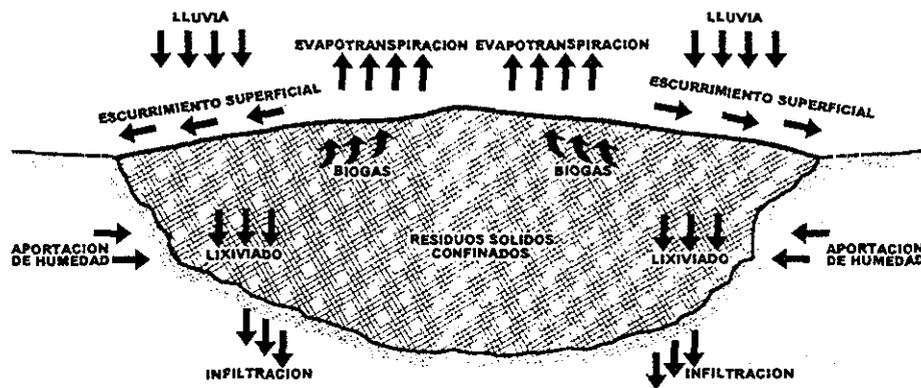


Figura 5. Generación de lixiviados en tiraderos a cielo abierto

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los lixiviados monitoreados en rellenos sanitarios se caracterizan por el alto contenido de materia orgánica, la presencia de metales pesados, los altos niveles de color y alcalinidad así como de sólidos disueltos totales. También es posible encontrar compuestos recalcitrantes como los plaguicidas y los hidrocarburos clorados entre otros, considerados como residuos peligrosos. Además de este tipo de contaminantes se encuentran los bacteriológicos, entre los que se encuentran las bacterias, virus, protozoarios y helmintos (Senior y Shibani, 1990).

La composición de los lixiviados en un sitio de disposición final, ya sea de un relleno sanitario o de un tiradero a cielo abierto en este caso, depende en gran parte del grado de descomposición de la basura y de la etapa de estabilización en que se encuentren. El estado de descomposición se divide en dos fases claramente definidas:

- a) Una fase de descomposición aerobia de corta duración (del orden de meses), y
- b) Una fase anaerobia la cual transcurre por varios años y que se caracteriza por la formación de ácidos orgánicos y metano

En la primera fase de esta descomposición el contenido de ácidos grasos volátiles (VFA) llega alcanzar hasta un 90% del material orgánico en los lixiviados, lo que disminuye el pH a valores de alrededor de 4. En esta fase se registra además un incremento en la concentración de iones metálicos por el proceso de lixiviación a que esta sujeta la basura; las relaciones  $DBO_5/DQO$  se encuentran en un intervalo de 0.4 a 0.5 o más (Monje, 2001).

En la segunda fase de descomposición de los residuos, es característica la generación de metano, dada por las bacterias metanogénicas que empiezan a degradar materiales orgánicos de bajo peso molecular como los VFA, disminuyendo su concentración en el lixiviado y dando como resultado un incremento en el pH (cerca de 7). Debido a que los materiales de alto peso molecular son difíciles de degradar por los microorganismos, la relación  $DBO_5/DQO$  en esta fase tiende a disminuir entre 0.1 y 0.3 (o menos) dependiendo de la edad del sitio de disposición final (Monje, 2001).

La composición de un lixiviado también es función del tipo de residuos sólidos que lo generan, de las condiciones climatológicas del sitio, de las condiciones que prevalecen dentro del relleno sanitario (eventos químicos y biológicos, contenido de humedad, temperatura, pH), así como de la edad y/o grado de estabilización de los residuos sólidos (McBEAN *et al.* 1995). Por tal motivo ningún lixiviado es igual al generado en otro sitio.

A pesar de la variabilidad que pueda existir entre un lixiviado y otro, en los rellenos sanitarios podemos identificar tres tipos principales, los cuales son clasificados en función del contenido de materia orgánica (medida como DBO<sub>5</sub> y DQO), del grado de estabilización que estos presentan y de la edad del relleno sanitario, estas características se presentan en el cuadro 7

Cuadro 7. Principales tipos de lixiviados

Edad del relleno (años) Tipo de lixiviado	< 5 (joven) I (biodegradable)	5-10 (medio) II (intermedio)	> 10 (viejo) III (estabilizado)
pH	< 6.5	6.5 – 7.5	> 7.5
DQO (g/l)	> 10	< 10	< 5
DQO/COT	< 2.7	2.0 – 2.7	> 2.0
DBO <sub>5</sub> /DQO	< 0.5	0.1 – 0.5	< 0.1
AGV (% COT)	> 70	5 - 30	< 5

Fuente: Amokrane et al. 1997

De esta manera en la practica, mediante el análisis de parámetros globales tales como la DBO<sub>5</sub>, DQO, AGV (ácidos grasos volátiles), COT y pH, es posible determinar el tipo de lixiviado que se tiene en un determinado relleno sanitario.

Aunado a esto, las características de los lixiviados nunca son constantes ya que cambian a lo largo de la vida útil del relleno sanitario, como consecuencia del grado de descomposición del material orgánico biodegradable, de los procesos de oxidación química que se realizan, y de la disolución de compuestos orgánicos e inorgánicos; por ejemplo, la relación DBO<sub>5</sub>/DQO permite establecer el grado de estabilización de un lixiviado así como el contenido de materia orgánica biodegradable y recalcitrante. Así una relación > a 0.3 indica un lixiviado joven y presencia de materia biodegradable; una relación de 0.1 o menor caracteriza a un lixiviado estabilizado y con presencia de compuestos recalcitrantes difíciles de biodegradar. Por estas razones el líquido resultante es muy complejo y resulta difícil idear procesos que puedan prever este dinamismo en las características de los lixiviados con la finalidad de someterlos a un tratamiento (Monje, 2001).

Aunque si bien es verdad, que no existe un lixiviado igual a otro, también es verdad que todos ellos pueden causar graves daños a la salud, ya que ello depende de su composición la cual siempre contiene sustancias tóxicas. En el cuadro 8 se muestran diferentes sustancias y compuestos contenidos en los lixiviados y los posibles efectos a la salud que provocan.

Cuadro 8. Posibles efectos a la salud causados por sustancias y compuestos encontrados en lixiviados de rellenos sanitarios

Metales pesados	
Arsenico	Carcinogénico; problemas cardiovasculares; sistema nervioso reproductivo y respiratorio; daños al hígado y piel
Cadmio	Probable carcinogeno; embriotóxico; Sistema Nervioso Central (SNC) reproductivo y respiratorio; daño a piel y riñones
Cromo	Carcinogénico; sistema respiratorio; alergias e irritación de ojos
Plomo	Daños a riñones y cerebro. SNC, cardiovascular y respiratorio, daños a la vista y riñones
Mercurio	Daños al SNC, cardiovascular y respiratorio; daños a la vista y riñones
Níquel	
Compuestos orgánicos	
2,4-Dicloroetano	Mutagénico; posible carcinogénico; daños a sistemas reproductivos nervisos y renal; irritación de ojos y piel
Lindano	Daños a sistemas reproductivos, nervioso y renal, posible carcinogénico
Pentaclorophenol	Posible mutaénico; irritación de ojos, piel y vías respiratorios y daños renales
Alcoholes	
Ethanol	Mutagénico, carcinogénico, causa de defectos genéticos
1-propanol/alcohol propílico	Posible carcinogénico
2-propanol/ alcohol isopropílico	Posible carcinogénico; irritación de vías respiratorias ojos y piel; posibles efectos al SNC

4- nitrophenol	Posible mutagénico y carcinogénico desordenes en células piel y vias respiratorias. efectos en el SNC
Orgánicos volátiles	
Benzeno	Carcinogénico, mutagénico; SNC; efectos en sistemas inmunológicos y gastrointestinales; daños a células; alergias; irritación de ojos y piel
Cloroformo	Probable carcinogénico; efectos en SNC y gastrointestinal; daños hepáticos y renales; embriotóxico; irritación de ojos y piel
1,1- dicloroetano	Embriotóxico; efectos al SNC; daños renales y hepáticos
Ethylbenzeno	Efectos al SNC; daños renales y hepáticos; irritación de ojos piel y vias respiratorias
Metileno clorado	Probable carcinogénico; efectos en SNC y respiratorio; daños sanguíneas; embriotóxico; daños renales y hepáticos; irritación de piel ojos y vias respiratorias
Tetracloroetileno	Probable carcinogénico; Efectos en SNC y respiratorio; embriotóxico; daños renales y hepáticos; irritación de piel, ojos y vias respiratorias
Tolueno	Probable carcinogénico; Efectos en SNC y respiratorio; embriotóxico; daños renales y hepáticos; alergias; irritación de piel, ojos y vias respiratorias
Tricloroethylene	Probable carcinogénico; Efectos en SNC y respiratorio; embriotóxico; daños sanguíneos; daños renales y hepáticos; irritación de piel, ojos y vias respiratorias
1,1 1- Tricloroetileno	Carcinogénico; mutagénico; efectos al SNC y respiratorio; daños sanguíneos; daños renales y hepáticos; irritación de piel y ojos
Cloruro de vinilo	Carcinogénico; mutagénico; efectos al SNC y respiratorio; daños renales y hepáticos; irritación de piel y ojos
Xileno	Efectos cardiovasculares y del SNC; daños renales y hepáticos; irritación de ojos piel y vias respiratorias

Fuente: <http://www.foe.org/ptp/chapter3.html>

Como es posible observar en el cuadro 8 las características contaminantes de los lixiviados de los rellenos sanitarios hacen de estos, un líquido muy peligroso para el ambiente, además, si aunado a esto se considera que en el tiradero a cielo abierto en cuestión no se tiene ningún tipo de control acerca del tipo de residuos dispuestos, se incurre en que en este tipo de sitios se dispongan también residuos peligrosos, en el tiradero de Tultitlán existen evidencias de que se están disponiendo diferentes tipos de residuos peligrosos, ello significa que el lixiviado resultante es más agresivo que aquellos que se generan en un relleno sanitario, donde solamente se disponen RSM.

En los sitios donde no se tiene un control adecuado, dichas corrientes pueden migrar fuera de la vecindad del relleno sanitario y convertirse en una fuente importante de contaminación para el ambiente; las aguas subterráneas suelen ser los puntos de mayor vulnerabilidad

El principal adverso de los lixiviados al ambiente es la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, que pueden darse por escurrimientos no controlados o por infiltración de los líquidos percolados a través de formaciones permeables. La afectación de los acuíferos provoca que estos no se puedan utilizar por largo tiempo ya que su regeneración se lleva a cabo en muchos años. Por otro lado, los diversos elementos reactivos que contienen los lixiviados como ácidos, sales y microorganismos, pueden disolver rocas calizas, carbonatos o anhídridas; agrietar arcillas o colmatar terrenos arenosos y mineralizar suelos, modificando su estabilidad y permeabilidad (Monje, 2001)

En adición a los potenciales problemas de toxicidad química, la posibilidad de migración de especies patógenas del relleno sanitario hacia los acuíferos ha sido ampliamente reconocida, particularmente se ha reportado la migración de bacterias vía lixiviados a distancias mayores de 10 km desde el sitio del relleno sanitario. Los organismos patógenos presentes en la basura pueden ser clasificados como bacterias, virus, protozoarios y helmintos este peligro potencial es debido a tres factores:

- a) La cantidad y naturaleza de los organismos patógenos encontrados en el relleno
- b) Su habilidad para sobrevivir y retener sus propiedades infecciosas
- c) Su eficacia para migrar del sitio de relleno sanitario al ambiente circundante.

En recientes estudios se han publicado las especies presentes en la basura, encontrando que las bacterias más frecuentes son: *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus faecalis*, *S. durans*, *S. equinis*, *Diplococcus pneumoniae*, estreptococos hemolíticos, *Salmonella enteritidis*, *S. typhimurium*, *S. saint-paul*, *S. heidelberg*, *S. montevideo*, y *Proteus sp*. El contenido de bacterias de un lixiviado, particularmente el número de coliformes totales, coliformes fecales, estreptococos fecales, y conteo

total en placa varía drásticamente con la edad y propiedades químicas del lixiviado. Similarmente la velocidad de inactivación de virus en lixiviados varía con la edad de los residuos que generan el lixiviado, pero en general la sobrevivencia microbiana dentro de los residuos o en los lixiviados es determinada por la combinación de factores que incluyen la temperatura, pH, tiempo, y la presencia de antagonistas químicos y biológicos (Monje, 2001).

Al respecto, se reporta que la sobrevivencia de bacterias entéricas y virus patógenos en lixiviados depende del pH y la temperatura como se muestra en el cuadro 9.

Cuadro 9. Sobrevivencia de bacterias entéricas y virus patógenos en los lixiviados.

°C\ pH	5.3	7.0
22	<i>Salmonella typhimurium</i> > estreptococos fecales >> coliformes fecales	estreptococos fecales > <i>Salmonella typhimurium</i> >> coliformes fecales
55	<i>Salmonella typhimurium</i> > estreptococos fecales >> coliformes fecales	<i>Salmonella typhimurium</i> > estreptococos fecales >> coliformes fecales

Fuente: Senior *et al*, 1993

Estos resultados sugieren que los lixiviados tienen un efecto significativo en la inactivación de organismos patógenos asociados con riesgos a la salud, esta capacidad de inactivación varía significativamente dependiendo de las características fisicoquímicas del lixiviado. Por lo que no es posible garantizar la inactivación de dichos organismos, por ello, el hecho de que los lixiviados migren fuera de los sitios de disposición final representan un peligro latente; esta migración puede darse de las siguientes formas (Monje, 2001):

- a) Movimientos hacia abajo de lixiviado percolado
- b) Movimientos laterales de lixiviado que han sido rechazados por zonas de saturación.

Este tipo de movimientos descendentes o laterales del lixiviado en los sitios de disposición final, así como la migración de los lixiviados fuera de estos, es lo que pone en grave riesgo a los mantos acuíferos que son explotados para uso y consumo humano, ya que siendo el agua un fluido conductor de microorganismos por excelencia se pone en alto peligro a la salud de todas aquellas personas que tengan contacto con el agua de ese manto; el tamaño del problema aumenta cuanto mayor sea la concentración de lixiviados en el acuífero, además, si se toma en cuenta que los mantos pueden estar en movimiento, es posible que el problema migre hacia otras poblaciones causando graves daños a la salud.

Ordinariamente se piensa que el peligro de los lixiviados reside en su contenido microbiológico, el cual desaparece una vez estabilizado, lo cual es en cierta forma verdad, pero se debe recordar que la actividad biológica no termina con la estabilización de los lixiviados, ya que existen especies capaces de enquistarse y sobrevivir largo tiempo en estado latente, además existe otro problema que proviene de la composición de los lixiviados el cual es la materia recalcitrante existente en dichos líquidos, tal materia es aquella que no se degrada por medios biológicos y que persiste en los lixiviados aún después de estabilizados.

Según caracterizaciones realizadas a lixiviados biodegradables (jóvenes) y a estabilizados (viejos), donde en los primeros alrededor del 50% de la materia es biodegradable y está constituida principalmente por ácidos grasos volátiles (>95% del COT). En los estabilizados más del 90% es materia orgánica recalcitrante, 60% del COT corresponde a estructuras de alto peso molecular (500 – 10,000 PM), particularmente ácidos fúlvicos y húmicos, además de una amplia variedad de compuestos orgánicos sintéticos de uso industrial y doméstico (aromáticos clorados, no clorados, nitrogenados, ácidos y neutros; ésteres, fenoles y alifáticos) ( Monje, 2001)

Las sustancias mencionadas con anterioridad pueden permanecer estables al paso de los años sin sufrir cambios importantes en su composición química y mantener concentraciones elevadas de materia orgánica del orden de miles de g/L. los lixiviados estabilizados son los que representan quizá el mayor de los riesgos, ya que al paso de los años puede seguir causando daños graves a la salud, como los que se enuncian en el cuadro 8

La afectación por infiltración de lixiviados antes mencionada se agrava en zonas como las del valle de México donde la fuente principal de suministro de agua potable a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México continúa siendo el acuífero del Valle de México, ya que de los 71 m<sup>3</sup>/seg. de agua potable que se suministra a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México; 54.5% (38.7 m<sup>3</sup>/seg) provienen de los mantos acuíferos locales, 2.9% (2 m<sup>3</sup>/seg) de aguas captadas por escurrimientos superficiales de la cuenca, 14% (10 m<sup>3</sup>/seg) de la cuenca del Lerma y aproximadamente 28.6% (20.3 m<sup>3</sup>/seg) de la cuenca del Cutzamala (<http://sma.df.gob.mx/sima/dgpa/acuifero.htm>);

El sistema de acuíferos de la cuenca del Valle de México se recarga gracias a la infiltración del agua de lluvia. En el Distrito Federal, la infiltración de lluvia se produce principalmente al sur del territorio. Esta zona de recarga natural es el Suelo de Conservación Ecológica (SCE) y tiene las siguientes características principales (<http://sma.df.gob.mx/sima/dgpa/acuifero.htm>):

- a) Una superficie de 88,500 has, que corresponde al 59.5% de las 148,645 has que tiene en total la ciudad
- b) Contiene importantes ecosistemas naturales, con una gran riqueza de flora y fauna.
- c) Es la principal zona de filtración de agua de lluvia hacia el acuífero.
- d) Más del 80% de la zona es propiedad ejidal y comunal, alrededor del 7% del territorio son Áreas Naturales protegidas y una pequeña parte es propiedad privada
- e) La zona incluye 24 subcuencas que alimentan los acuíferos de la cuenca
- f) Comprende 36 mil hectáreas de bosques, 30 mil de zonas agrícolas, más de 1,300 de chinampas y cuerpos de agua, 11 mil de pastizales y matorrales, 4,405 de asentamientos humanos regulares y 3,094 de asentamientos irregulares.

En la figura 6 es posible apreciar las zonas comprendidas en este Suelo de Conservación Ecológica



Figura 6 Zonas que comprende el Suelo de Conservación Ecológica de la cuenca del Valle de México.

Fuente: <http://sma.df.gob.mx/sima/dgpa/acuifero.htm>;

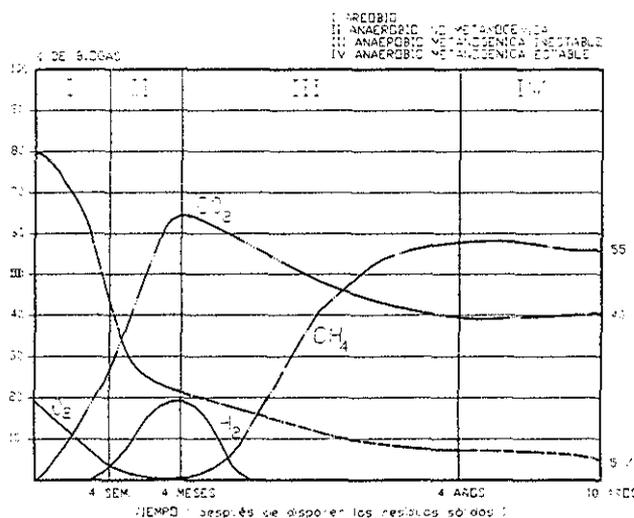
La cuenca del valle de México recibe anualmente un volumen de lluvia equivalente a casi cuatro veces el total de agua que la metrópoli consume, pero sólo una pequeña parte se infiltra al acuífero debido a la pérdida progresiva de áreas naturales de recarga - producto del crecimiento de los asentamientos humanos- y por la insuficiente infraestructura hidráulica para favorecer su infiltración y aprovechamiento. Se estima que sólo alrededor del 18% de la lluvia que cae sobre el área de conservación logra infiltrarse para recargar el acuífero, ya que la infraestructura hidráulica existente es poco significativa (<http://sma.df.gob.mx/sima/dgpa/acuifero.htm>).

Por lo descrito anteriormente es evidente la importancia que tiene el SCE para la conservación del sistema de acuíferos de la Cuenca del Valle de México, ya que no es posible imaginar una ciudad como la de México sin el agua que aporta el subsuelo. Así mismo, el saneamiento de las zonas que conforman el SCE debe realizarse a la brevedad pues de lo contrario es muy posible que la recarga de acuíferos se realice con agua contaminada, esto tendría consecuencias muy graves para la salud de todas aquellas personas que utilicen agua de estos acuíferos.

#### 4.2 Biogás

Otro de los subproductos que se generan debido a la biodegradación de los residuos sólidos en los sitios de disposición final es una mezcla de gases, los cuales son resultado de la actividad microbiana que se genera en el interior de los residuos, esta actividad puede darse en presencia de oxígeno o en ausencia del mismo. Durante los primeros meses en que los residuos han sido dispuestos, la degradación se encuentra en una fase aerobia debido a que existe oxígeno, el cual es transformado a dióxido de carbono ( $CO_2$ ); el oxígeno proviene del que queda atrapado entre los residuos y por el existente en el material de cubierta, si es, que se utiliza.

Su producción es causada por la degradación biológica de la materia orgánica contenida en los residuos sólidos. Este proceso se realiza bajo condiciones anaerobias, cuando los residuos se han compactado y cubierto dentro de una celda en el relleno sanitario o simplemente cuando se agota el oxígeno al tener más capas de residuos sólidos encima. La de descomposición se inicia con una etapa corta aeróbica en donde se generan productos característicos de esta fase como son; bióxido de carbono, agua, nitritos y nitratos; después la etapa anóxica, en donde se agota el oxígeno de los nitritos y nitratos, y por último la fase anaerobia, en donde los elementos típicos son; ácidos orgánicos, nitrógeno, bióxido de carbono, metano y en pequeña proporción ácido sulfhídrico. La figura 7 muestra las concentraciones de diferentes gases en un relleno sanitario de acuerdo a como ocurre el proceso de biodegradación de los residuos sólidos (Sánchez *et al.*, 1996)



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 7. Composición y evolución del biogás en un relleno sanitario  
Fuente: Sánchez *et al.* 1996

Como se observa en la figura 7, la producción de biogás comienza desde el inicio de la operación del relleno sanitario en promedio a los tres meses. Sin embargo se alcanza una producción máxima después de operar 3 años y puede llegar a tener un tiempo de vida de hasta 15 años.

Usualmente el biogás está compuesto de aproximadamente 50-60 % de metano (y en ocasiones este valor puede elevarse) y 40-50 % de dióxido de carbono, además de trazas de otros gases. La peligrosidad del biogás se debe al metano, el cual puede ser explosivo en concentraciones entre 5 y el 15 % en volumen en el aire; también puede ser corrosivo, dependiendo del porcentaje de CO<sub>2</sub> que contenga (Sánchez et al, 1996).

Los gases traza, además de los compuestos orgánicos diferentes del metano son: ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), nitrógeno(N<sub>2</sub>), hidrógeno (H<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>). El nitrógeno y oxígeno normalmente se presentan en cantidades variables dependiendo de la cantidad de aire que queda atrapado al disponer los residuos.

Una de las características de los gases formados en la fase anaerobia de la degradación de los residuos, es que son olorosos, la presencia de CH<sub>4</sub> incrementa la percepción de otros gases malolientes, lo que puede producir queja pública; a este olor tan característico contribuyen principalmente dos grupos de compuestos, el primero lo conforman ésteres y organosulfuros, incluyendo ciertos solventes depositados con los desechos; el segundo incluyen alquilo y limoneno, los olores dulces afrutados y pútridos de estos compuestos se diluyen con el tiempo y dejan de percibirse.

En el biogás se encuentran también algunos contaminantes prioritarios, entre los que figuran el dicloruro de etileno, percloroetileno, tricloroetileno, cloruro de vinilo, calificados como peligrosos. Algunos estudios han detectado una amplia variedad de hidrocarburos, muchos de ellos se encuentran clasificados como carcinógenos, estos son: el benceno, tetracloruro de carbono, cloroformo, dicloroetano 1,2, dicloroetano 1,1, dibromuro de etileno, cloruro de metileno, tetracloroetano 1,1,2,2, tricloroetano 1,1, 2, tricloroetino, cloruro de vinilo y los componentes no cancerígenos son: bromometano, clorobenceno, dicloroetano 1,1, metil etil acetona, tolueno y xilenos. Como resultado de lo anterior, la caracterización de las sustancias químicas en el biogás ha tomado una gran importancia, y existen estudios en proceso de muestreos efectuados en 356 rellenos sanitarios localizados en el Estado de California con el propósito de establecer un banco de datos (Admin,1993).

Los compuestos que reciben una inspección minuciosa son los compuestos orgánicos volátiles (COV's), los cuales generalmente son los alifáticos, aromáticos, cíclicos e hidrocarburos clorados como puede observarse en el cuadro 10. Otra clase de compuestos que pueden estar presentes en el biogás son condensados de varias fases en un proceso de recuperación y lixiviado, ácidos y bases orgánicos e inorgánicos, compuestos de azufre y metales.

Cuadro 10. Algunos de los contaminantes químicos que pueden encontrarse en el biogás.

COMPUESTO QUÍMICO	FORMULA
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>
Cloroetano	CH <sub>2</sub> :CHCl
1,2-Dibromoetano	BrCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> Cl
1,2- Dicloroetano	ClCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> Cl
Diclorometano	CH <sub>2</sub> Cl
Tetracloroetileno	Cl <sub>2</sub> C:CCl <sub>2</sub>
Tetraclorometano (tetracloruro de carbono)	CCl <sub>4</sub>
1,1,1-Tricloroetano	CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>
Tricloroetileno	HClC:CCl <sub>2</sub>
Triclorometano (cloroformo)	CHCl <sub>3</sub>
Acido sulfhídrico	H <sub>2</sub> S

Fuente: Orta et al 2001

Las concentraciones típicas de biogás en rellenos sanitarios se muestran en el cuadro 11

Cuadro 11 Concentraciones típicas del biogás y parámetros indicadores

COMPONENTES	CONCENTRACIONES TÍPICAS (% EN VOLUMEN)	OBSERVACIONES MÁXIMAS (% EN VOLUME)
Metano	65.0	88.0
Bióxido de Carbono	35.0	90.0
Oxígeno	0.1	20.9
Nitrógeno	2.4	87.0
Monóxido de Carbono	0.001	0.09
Etano	0.005	0.0139
Eteno	0.018	-
Acetaldehído	0.005	-
Propano	0.002	0.0171
Butano	0.003	0.023
Helio	0.00005	-
Alcanos	0.05	0.07
Hidrocarburos insaturados	0.009	0.048
Compuestos halogenados	0.00002	0.032
Acido sulfídrico	0.00002	35.0
Compuestos de organosulfuro	0.00001	0.028
Alcoholes	0.00001	0.127
Otros	0.00005	0.023

Fuente: Argus, 1999

Entre los problemas que puede causar el biogás se encuentran la contaminación del agua subterránea, el suelo y cambio climático. La primera se puede generar por migración subterránea del gas, cuando sus compuestos orgánicos solubles se disuelven en los acuíferos cercanos al sitio de disposición final; la contaminación del suelo también puede ser un tipo de problema ya que la migración del biogás hacia la superficie provoca la disolución y filtración de varios de sus compuestos cuando viaja a través de las paredes laterales y del fondo de los sitios de disposición, esto sucede cuando los sitios no cuentan con cubierta final y membranas impermeables adecuadas.

Respecto al problema atmosférico que representa el biogás, en el ámbito mundial se comienza a reconocer como un problema la emisión de biogás proveniente del manejo de RSM. Sin embargo, existen pocos estudios en donde se cuantifica esta emisión. En Japón, por ejemplo, se estima que del 35 % de metano que se genera en los rellenos sanitarios, el 15 % llega a formar parte de los gases de efecto invernadero (GEI), cabe señalar que en Japón los rellenos sanitarios generalmente consisten de residuos no combustibles y cenizas, por lo cual generan bajos niveles de GEI. En Europa y Estados Unidos se tiene buen control de metano por lo cual se asume que no es muy grave el problema, no obstante no deja de presentarse (Garden *et al*, 1993). Pero si se toma en cuenta en tan solo en México son generadas 83,000 toneladas diarias de RSM y aunque un 12 % se dispone en rellenos sanitarios y el resto en tiraderos a cielo abierto, es evidente, que en este país no existe ningún lugar donde se trate el biogás antes de que emigre a la atmósfera. Es verdad que existe "Prados de la montaña" donde el biogás se quema, pero ese biogás es el producido por los residuos dispuestos hace más de 10 años solamente en el D.F. Por lo tanto, los residuos generados en todo el país desde esa fecha hasta hoy día emiten el biogás sin ningún tratamiento a la atmósfera.

La explosividad es otro problema que puede causar la producción y migración del biogás de sitios de disposición final, ya que en el proceso de degradación de la basura se produce metano el cual es inflamable y explosivo si se concentra en el aire en una proporción de 5 a 15% en volumen; los gases tienden a acumularse en los espacios vacíos dentro del relleno; aprovechan cualquier fisura del terreno o permeabilidad de la cubierta para salir, se pueden difundir, si no se ha implementado un sistema de control ambiental, hacia zonas aledañas al relleno, lo cual puede llegar a ocasionar serios problemas ambientales; por ejemplo se pueden propiciar condiciones de explosividad o de asfixia por el desplazamiento del oxígeno en áreas cerradas dentro o cercanas al relleno, o, por la capacidad de desplazamiento del oxígeno del suelo, ocasionar daño o secar la vegetación. En el estado de

Missouri y en otros estados de Estados Unidos la fuga de metano ha causado daños ambientales, daños en propiedades y pérdidas de vidas (Garden, *et. al.*, 1993).

### 4.3 Partículas

En todos los sitios en donde se manejan los residuos sólidos se generan polvos debido al desprendimiento de partículas de diferentes tamaños de los residuos, la cantidad de estas partículas se incrementan en la etapa de operación de este tipo de sitios, en el momento que se descargan los vehículos recolectores. Las toneladas de desechos que se manejan son considerables al igual que la afluencia de vehículos, en el frente de trabajo de los sitios de disposición final, donde se alcanzan niveles de partículas suspendidas totales (PST) que se pueden considerar muy contaminados (Sánchez, *et al.*, 1996).

Existen diferentes tipos de partículas en el aire de los sitios de disposición final. Las partículas suspendidas totales, las cuales incluyen partes de material inorgánico y a las partículas viables, es decir, aquellas que incluyen a los microorganismos patógenos; estas partículas en su conjunto no tienen que ser de un solo tipo para causar daño a la salud, ya que basta con que se tengan en suficiente cantidad o provenientes de compuestos venenosos en el caso de las totales para que representen un riesgo a la salud y si aunado a ello se encuentran diferentes tipos de microorganismos patógenos, esa combinación puede representar graves riesgos a la salud.

En este tipo de lugares la cantidad y calidad de partículas es muy variada dependiendo del grado de actividad en el sitio, del tipo de equipos utilizados, de la temperatura, de la precipitación, del carácter geográfico del lugar, humedad y otros factores. Cuantos más residuos, polvo y humo haya en el aire, tanto mayor será la concentración de partículas suspendidas; como ejemplo, cada partícula de humo tiene la propiedad de absorber en su superficie gran cantidad de microorganismos como virus, hongos, levaduras y bacterias que causan serios problemas de salud pública si no están bien controlados (Gamboa, 1983 y Bravo, 1987).

El estudio del aire en este tipo de sitios es importante debido a que proporciona un mecanismo de transferencia para los microorganismos cuyo alcance es mucho más amplio que el del agua, pues las partículas suspendidas también se componen de partículas como el polvo y los aerosoles líquidos, o gotas finas; desde luego, cuanto más pequeña es la partícula más tiempo permanece suspendida en el aire. Los quistes que forman por los protozoarios son relativamente pesados y se sedimentan del aire en cuestión de minutos. Por otra parte, las esporas de bacterias y hongos son muy pequeñas y se les ha encontrado a varios kilómetros de altura sobre la superficie terrestre. El conocimiento de la concentración y distribución de los microorganismos en la atmósfera es limitado, pero no hay duda de que se encuentran dispersos por todo el mundo (Henry y Heinke, 1999).

El tamaño de las partículas, es uno de los factores que determinan su acceso y depósito en los diferentes sitios del aparato respiratorio. Del total de partículas suspendidas solamente pueden penetrar en el aparato respiratorio aquellas con tamaños menores a 10 micrómetros (PM10); éstas constituyen la denominada "fracción respirable" ya sea que se componga de partículas viables o no viables. Las partículas pertenecientes a la fracción inspirable pueden ser agrupadas de acuerdo con el sitio del aparato respiratorio hasta que penetran, y en el cual, con mayor probabilidad se depositarán. De esta manera, la fracción respirable se divide en las fracciones extratorácica, traqueobronquial y pulmonar o alveolar (Restrepo, 1992).

La contaminación del aire de los sitios de disposición final por partículas suspendidas debe considerarse como riesgosa, entendiendo por riesgo la probabilidad de desarrollar una enfermedad como resultado a la exposición a un factor ambiental determinado.

Para la estimación de riesgos es necesario saber cuántos patógenos y que clase de patógenos son los que llegan al aire por las actividades del sitio. Observar si los patógenos pueden sobrevivir por períodos de tiempo suficientes y en cantidades suficientes para causar infección. Que tan significativa

es la ruta de infección a través del aire, comparada con otras rutas potenciales de infección (por ejemplo, la ruta oral – fecal y la ingestión de alimentos) y cuántos patógenos y que clase de patógenos son los que llegan al público en general ya sea por ingestión o por contacto.

De acuerdo con trabajos realizados en México (Gamboa, 1983) sobre microorganismos causantes de las alergias se encuentran los siguientes géneros: *Hormodendrum*, *Penicillium*, *Alternaria*, y *Aspergillus*. Los géneros *Rhodotórula* y *Mucor* pueden contaminar alimentos y materiales de origen orgánico y su inhalación pueden causar infecciones respiratorias al hombre y animales, así como reacciones alérgicas de tipo asmático *Cladosporium* es causante de alergias en el hombre y es cosmopolita; *Staphylococcus spp.* Es habitante de la piel y de la nasofaringe, es infectante de heridas y produce dermatitis, en el pulmón ocasiona fibrosis quística, pneumonitis y septicemia; *Streptococcus spp.* Provoca infecciones a la piel y orofaringe, heridas, pulmón, etc. (Graevenitz, 1977 y Gamboa, 1983).

En el cuadro 12 se resumen las enfermedades más importantes en el hombre causadas por microorganismos del aire (bacterias y hongos).

Cuadro 12. Enfermedades causadas por microorganismos del aire.

ENFERMEDADES CAUSADAS POR BACTERIAS	
ENFERMEDAD	AGENTE CAUSAL
Tuberculosis pulmonar	<i>M tuberculosis</i>
Ántrax	<i>B anthracis</i>
Infección respiratoria y cutánea	<i>S aureus</i>
Infección respiratoria fiebre reumática	<i>S. pyogenes</i>
Meningitis purulenta	<i>N meningitidis</i>
Neumonía lobar	<i>C diphteriae</i>
Infección respiratoria, meningitis	<i>K. pneumoniae</i>
ENFERMEDADES CAUSADAS POR HONGOS	
ENFERMEDAD	AGENTE CAUSAL
Aspergilosis	<i>A fumigatus</i>
Blastomicosis	<i>B. dermatitidis</i>
Coccidioidomicosis	<i>Coccidioides immitis</i>
Histoplasmosis	<i>Histoplasma capsulatum</i>
Nocardiosis	<i>Nocardia brasiliensis</i>

Fuente: Gamboa 1983

Como se ha podido observar en el cuadro 12, existen un gran número de microorganismos, los cuales pueden causar enfermedades al hombre pero es necesario escoger algunas especies que sean indicadoras de contaminación, entre los cuales se enuncian los siguientes:

- a) *Coliformes totales*. En las últimas décadas se han desarrollado estándares Microbiológicos para clasificar la calidad del aire, basados exclusivamente en la presencia de coliformes fecales y totales como organismos indicadores de contaminación fecal. La presencia de coliformes no necesariamente significa que habrá incremento en la manifestación de enfermedades ya que intervienen numerosos factores que dependen principalmente de las condiciones locales, por esto se requieren investigaciones epidemiológicas relacionadas con la protección humana para evaluar los riesgos que sean atribuibles a la contaminación atmosférica.

El grupo de los coliformes se ha tomado desde antaño como uno de los principales indicadores de contaminación por bacterias intestinales su presencia en cualquier medio, sólido, líquido o gaseoso representa un riesgo para la salud humana (Tchobanoglous, 1994)

- b) *Patogenicidad estreptocócica*. Los estreptococos se presentan con mayor frecuencia, como parásitos y patógenos de las vías respiratorias. Los síntomas dependen no sólo del proceso de infección agudo sino también de sus complicaciones. El carácter clínico de la enfermedad depende de la importancia relativa de las diversas consecuencias de la infección; aunque siendo en apariencia diferente, en esencia provocan la misma enfermedad. Frecuentemente la infección se extiende a las amígdalas, o puede localizarse primariamente en ellas ocasionando amigdalitis

extensión al pulmón, produciendo bronconeumonía estreptocócica (Edmonds, 1979, Gamboa, 1983 y Bravo, 1985)

- c) *Hongos y levaduras*. Se observa en la naturaleza gran diversidad de hongos y levaduras, algunos son unicelulares, otros multicelulares, para los propósitos de este trabajo sólo se mencionaran algunos casos que se incluyen dentro de los microorganismos aerobiológicos

Se ha visto que por lo general el micelio reproductor de algunos hongos suele proyectarse al aire para formar un micelio aéreo y dar lugar a cuerpos reproductores o esporas. El modo de transmisión es en este caso aéreo, y se adquiere por respiración, inhalación o ingestión.

La género *Nocardia sp.* Se ha observado en diversos procesos patológicos, incluyendo afecciones pulmonares llamadas a veces "seudotuberculosis", provoca abscesos profundos, se ha detectado en México.

Otro género que se le ha encontrado en el aire es *Aspergillus sp.* y aunque tienen poca virulencia se ha observado que provocan infección pulmonar en el hombre infecciones del oído externo

Los hongos, por lo general de la especie *Rhizopus*, parecen tener muy poca virulencia y ser capaces de invadir los tejidos sólo cuando la resistencia general disminuye notablemente. La enfermedad suele comenzar en las vías respiratorias, principalmente en la nariz, en donde las esporas germinan y el crecimiento del micelio invade las mucosas y se extiende hacia los senos adyacentes y cavidad orbitaria. El hongo parece tener afinidad especial por las arterias, penetrando hacia la luz para producir trombosis e infarto, y puede alcanzar el sistema nervioso central por vía de las arterias oftálmica y carótida interna para producir meningoencefalitis (Edmonds, 1979, Gamboa, 1983 y Bravo, 1987).

- d) *Cándida albicans*. Estos hongos se encuentran comúnmente en boca, vagina y tubo digestivo en personas normales; suele provocar infecciones superficiales en la mucosa bucal, áreas intertriginosas y uñas, se conoce la candidiasis pulmonar, y las infecciones localizadas a veces dan por resultado una infección generalizada por diseminación hematológica, especialmente en huéspedes debilitados por alguna otra enfermedad.

La candidiasis de las mucosas se conoce como afta y es micosis de la mucosa de la boca, es el tipo que se observa con mayor frecuencia, notablemente más común en lactantes y niños que en adultos. La sequedad de la boca, junto con el coma parece favorecer la infección. En ocasiones, puede diseminarse a otras mucosas y a la piel, desarrollándose una erupción cutánea generalizada y lesiones intertriginosas; estos casos son mortales

La candidiasis de las vías respiratorias, presenta dos formas, la forma leve de bronquitis crónica, que se caracteriza por disnea, y tos febril, en tanto que la forma grave semeja la tuberculosis y suele ser mortal (Edmonds, 1979)

- e) *Pseudomona aeruginosa*. El género *Pseudomona* incluye unas 30 especies que en su mayor parte se encuentran en el agua, la suciedad y en cualquier sitio donde haya materia orgánica en descomposición. Las bacterias fluorescentes son miembros de este género *Pseudomona fluorescens* es la especie mejor conocida y la única patógena para el hombre, se desarrolla en todos los medios ordinarios, requiere condiciones aerobias; no obstante, en medio anaerobio hay cierto desarrollo (Edmonds, 1979, Gamboa, 1983 y Bravo, 1985)

La presencia de estos microorganismos en el aire de un sitio de disposición final puede representar un gran riesgo para aquellas personas que laboran en ellos, principalmente a aquellas que lo hacen en tiraderos a cielo abierto en donde debido al tipo de operación no es posible controlar de alguna forma la dispersión y proliferación de estas partículas

#### 4.4 Fauna nociva

Debido a la naturaleza de los residuos sólidos la composición de los mismos no es homogénea, es decir, que se componen de un sin número de materiales, los cuales pueden ser orgánicos e inorgánicos. Estas características tan especiales hacen de los residuos sólidos un ambiente óptimo para la proliferación de un gran número de animales, entre los cuales se encuentran los perros, ratas, aves de rapiña, moscas y un sin número de microorganismos. Es por esta razón que los residuos sólidos deben de manejarse adecuadamente para que este tipo de fauna no pueda desarrollarse, como ejemplo de ello se encuentran los contenedores especializados, los sistemas de recolección que no permiten la acumulación de los residuos sólidos en las fuentes generadoras, las plantas de tratamiento y por último los rellenos sanitarios como disposición final, evitando la proliferación de estos animales con cubiertas diarias de tierra (Deffis, 1989)

En el caso del tiradero a cielo abierto de Tultitlán, Edo de México, y en todos los que existen en la república mexicana, éstos fungen como fuentes de alimento y madriguera para la fauna nociva enunciada en el párrafo anterior; debido a que los residuos se disponen de manera que no existe un adecuado manejo y no se cubren con tierra al final de las operaciones de un día

Este tipo de fauna nociva también es denominada con el nombre de vectores, debido a que en la mayoría de los casos son portadores de patógenos que los contagian o transmiten a un huésped humano. El ciclo epidemiológico común es el que se muestra en la figura 8, donde el ciclo va de un insecto a vertebrado inferior y de regreso al insecto, y con los humanos se presenta como una infección tangencial ocasional, de este tipo de infecciones es posible mencionar la fiebre amarilla (viral) y la peste bubónica (bacteriana); donde los roedores y los mamíferos son los vectores (Henry y Heinke, 1999).

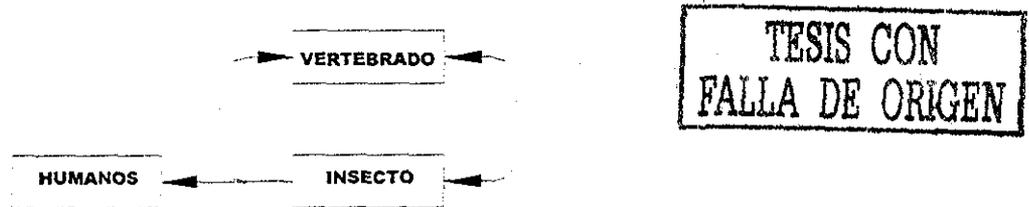


Figura 8 Ciclo insecto/vertebrado inferior de las enfermedades de transmisión por roedores.  
Fuente: Henry y Heinke 1999

Un ejemplo palpable de este tipo de enfermedades causadas por la fauna nociva que predomina en los tiraderos a cielo abierto es la peste es en realidad una enfermedad de las ratas, y los humanos se infectan sólo de manera tangencial. Las ratas son transmisoras de unas 200 enfermedades contagiosas, 70 de forma directa y 120 de manera indirecta. Entre ellas están la Peste Bubónica, Leptospirosis, Fiebres Hemorrágicas, Leishamiasis o lepra de montaña, Hanta virus, y otras. En el caso de la peste, las pulgas transmiten la enfermedad de una rata a otra, se llegó a esta conclusión cuando se observó que antes de una epidemia en las poblaciones humanas había una elevada mortandad de ratas. Cuando una pulga infectada muerde a un humano, se desarrolla entonces la peste bubónica, entonces los bacilos causantes suelen estar presentes en los estupos salivales de las personas infectadas y se propaga a otra persona por contacto directo o por una herida abierta, vía aire. Esta enfermedad acabó con la existencia de poblaciones enteras en el siglo XIV en Europa y actualmente se presenta en poblaciones carentes de servicios públicos en diferentes continentes del mundo (Henry y Heinke, 1999).

Otro de los vectores que pueden causar serias enfermedades a los humanos son los insectos, lo cual se debe a que el torrente sanguíneo es la puerta de entrada y salida para un sin número de patógenos, por lo que las picaduras de insectos facilitan la entrada de microorganismos a través de la piel del huésped. Entre los insectos vectores más comunes se encuentran los mosquitos, las moscas de arena, las moscas tsé-tsé, las garrapatas, las pulgas y los piojos

Una de las peores enfermedades infecciosas en términos de números de casos anuales es el paludismo que destruye los glóbulos rojos del huésped. Otras enfermedades que pueden ser transmitidas por este tipo de vectores son: Leptospirosis, Salmonelosis, fiebre por mordedura de roedores y Tifo murino entre otras (Henry y Heinke, 1999).

Otro de los vectores que proliferan en los tiraderos a cielo abierto son los perros, los cuales provienen de camadas de perros callejeros que al vagar por las calles y carecer de personas que se hagan responsables de ellos se ven en la necesidad de buscar entre los residuos sus alimentos, por lo que si se encuentran cerca de algún tiradero a cielo abierto es seguro que acudan a él para alimentarse, esta falta de control en la población de perros provoca que muchos de ellos estén parasitados y sufran de diversas enfermedades, las cuales pueden transmitir a los seres humanos por contacto o por mordedura. La rabia es una de las enfermedades caninas más pronunciadas en esta clase de animales, la cual no es la única ni la más peligrosa enfermedad que pueden transmitir a los humanos

#### 4.5 Problemas de tipo social

Existen una serie de problemas de tipo social provocados por la operación de los sitios de disposición final de residuos sólidos, debido a que generan una serie de molestias para aquellas personas que viven en las inmediaciones del lugar

En la mayoría de las ocasiones estos problemas no se asocian a los rellenos sanitarios, ya que gracias a la normatividad mexicana que rige el diseño, construcción y operación de los mismos se toma en consideración la ausencia de molestias a los vecinos, ya que en principio no es posible construir un relleno sanitario a menos de 1,500 metros de una traza urbana de más de 2,500 habitantes, de lo contrario se deberá asegurar técnicamente que no habrá afectaciones (NOM-083-ECOL)

El problema se magnifica con los tiraderos a cielo abierto, para los cuales jamás se planeo su ubicación o su operación, por lo que las afectaciones a las personas que viven en las zonas aledañas de este tipo de sitios frecuentemente tienen quejas. Las afectaciones que principalmente se tienen se concentran en los malos olores que en determinadas épocas del año se presentan; esto debido a las corrientes de aire que se presentan.

Los olores son producidos en su gran mayoría por el biogás que migra de manera lateral o vertical del sitio, el cual contiene ácido sulfídrico ( $H_2S$ ) que produce un desagradable olor a huevo podrido, este olor es muy típico en los rellenos sanitarios; también dentro de los olores que se pueden detectar en las inmediaciones de los tiraderos a cielo abierto son los de animales muertos, los cuales muchas veces son dispuestos junto con la basura y otras veces son animales que mueren en las cercanías del tiradero debido a la ingestión de comida en mal estado o por la adquisición de una enfermedad mortal (Deffis, 1989)

También son causa de malos olores en los sitios de este tipo la disposición de diferentes sustancias provenientes de la industria, las cuales en muchos de los casos son residuos peligrosos y cuya combinación con otros materiales que pueden encontrarse en el sitio producen mezclas muy ofensivas al olfato, además de representar un alto riesgo a la salud, ya que muchas de estas sustancias provienen de industrias por lo que contienen entre otras asbesto, mercurio, arsénico, plomo y en algunos casos contaminantes orgánicos tales como los PCB's (bifenilos policlorados) y DDT (diclorodifeniltricloroetano); los cuales están vinculados a enfermedades degenerativas como el cáncer (Admín, 1993).

Otra de las grandes molestias que aquejan a las personas que viven en las cercanías de un sitio de este tipo lo representa la proliferación de fauna nociva, tal es el caso de los perros callejeros, los cuales representan un peligro constante para los vecinos debido a que éstos pueden ser vectores de diferentes enfermedades, así como las ratas, aves y cualquier otro tipo de animal que se alimente de los residuos sólidos o que viva en este tipo de sitios. Por lo que existen constantes quejas de los vecinos hacia las autoridades municipales correspondientes.

Hasta este punto se han analizado a grandes rasgos los factores sociales que causan efectos adversos debido a la operación de un sitio de disposición final, pero existen también aquellas personas que son beneficiadas de manera directa e indirecta por el funcionamiento de estos sitios. Este es el caso de los pepenadores, los cuales son aquellas personas que trabajan generalmente en tiraderos a cielo abierto, estos se ocupan de seleccionar y recoger los diferentes materiales que son susceptibles de ser reutilizados o reciclados para posteriormente venderlos a centros intermediarios. Estos materiales son vendidos posteriormente a las industrias recicladoras o aquellas que utilizan este tipo de subproductos como materia prima para producir algún bien con valor comercial (Deffis, 1989).

Tomando en cuenta la actividad que desempeñan los pepenadores, se puede decir que son un grupo social organizado con trabajo productivo y útil a la sociedad, este trabajo no sólo no es reconocido, sino que, es rechazado por otros estratos, debido a esto es muy difícil que un pepenador se integre a la sociedad. También generalmente a los alrededores de los tiraderos a cielo abierto se encuentran instalados de manera permanente intermediarios que compran a diferentes precios los diferentes materiales que de los residuos se obtienen, para ellos posteriormente venderlos a un precio más alto a industrias recicladoras o fábricas los materiales, formándose así, toda una economía que depende de la operación de los tiraderos a cielo abierto.

Aunada a toda la actividad comercial dependiente de los tiraderos a cielo abierto, también se encuentran las sociales, que se desempeñan en el interior del tiradero, ya que en la mayoría de las veces las familias de los pepenadores construyen sus casas y viven en las orillas del tiradero, estas viviendas son hechas generalmente de residuos tales como láminas de cartón o metal, trapos viejos o cualquier cosa que sirva para este fin; también es recurrente el hecho de que en el transcurso del día acudan al frente de tiro de residuos, diferentes comerciantes, principalmente de vendedores de comida para pepenadores y operadores de camiones recolectores o compradores de subproductos (DGSU, 1986).

Es fácil entender que se ha desarrollado toda una economía alrededor de los residuos sólidos y en este caso, alrededor de los tiraderos a cielo abierto, ya que para las personas que forman parte de esta economía el tiradero es su tierra, su hogar y su fuente de recursos. Por ello, la clausura de un tiradero a cielo abierto siempre provocará múltiples problemas sociales, tales como manifestaciones en contra de la clausura del sitio, impedimento de las actividades para la misma, enfrentamiento con las fuerzas públicas, y dependiendo del grado de organización del gremio hasta la interrupción de la recolección de los residuos en el municipio (DGSU, 1986).

Cualquiera de estas manifestaciones en contra de la clausura de un tiradero a cielo abierto provocan enormes costos económicos, políticos y sociales; lo cual nunca es deseable. Más aun si se trata de la interrupción del servicio de recolección, la cual pondría en grave riesgo la salud pública. Por ello es muy importante que el equipo técnico encargado de los planes para la clausura tomen en cuenta y se enfrenten a este tipo de problemas dando soluciones reales y positivas para aquellas personas que dependen económicamente de la operación del tiradero a cielo abierto.

Esto es, diseñando un programa para crear empleos estables para las personas que trabajaban de pepenadores en el tiradero, otorgando diferentes prestaciones como el seguro médico, las cajas de ahorro, seguro de vida, vales de despensa, etc. ya sea dentro del mismo servicio de limpieza del municipio o como operador en actividades afines, ya que hay que tomar en cuenta que son personas que se han dedicado por años a esta misma actividad e incluso por generaciones en algunos casos.

## **5. EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO EN ESTUDIO**

### **5.1 Ubicación de los mantos acuíferos de la zona**

Se denominan acuíferos a aquellas acumulaciones de agua formadas por la infiltración de agua de lluvia a través de fisuras y grietas en las rocas, esta agua, llena los huecos e intersticios de las formaciones rocosas, de tal forma que al paso del tiempo ciertas partes del subsuelo se encuentran completamente saturadas de agua y debido a las diferencias de nivel se crean corrientes de agua subterránea (Freeze y Cherry, 1979).

La porosidad y la permeabilidad de las rocas son las principales características que influyen en la posibilidad de almacenar agua en el subsuelo. Las características hidráulicas de los acuíferos están influidas, en general, por los siguientes aspectos:

- a) Características geológicas de la formación rocosa.
- b) Dimensiones físicas de la capa geológica.
- c) Porosidad y permeabilidad de la formación.
- d) Localización del acuífero respecto a la zona de recarga.

Debido a que el agua del subsuelo se encuentra en los intersticios o poros de las rocas, existen zonas en las que existe una mezcla de agua y aire y otras en las que todos esos vacíos son ocupados por agua, estas zonas se dividen principalmente en dos: Zona de aireación y de saturación (Freeze y Cherry, 1979).

La zona de saturación se extiende desde la superficie de la tierra al nivel en el que se encuentran todos los vacíos ocupados por agua, a este nivel se le denomina nivel freático. Esta capa se encuentra subdividida en tres: el agua del suelo, la capa intermedia y la franja capilar; en las tres existe una mezcla de aire y agua en los vacíos existentes. La zona de saturación se encuentra bajo la zona de aireación, en esta los poros están completamente llenos o saturados de agua. En la figura 9 se muestra la configuración de un acuífero típico

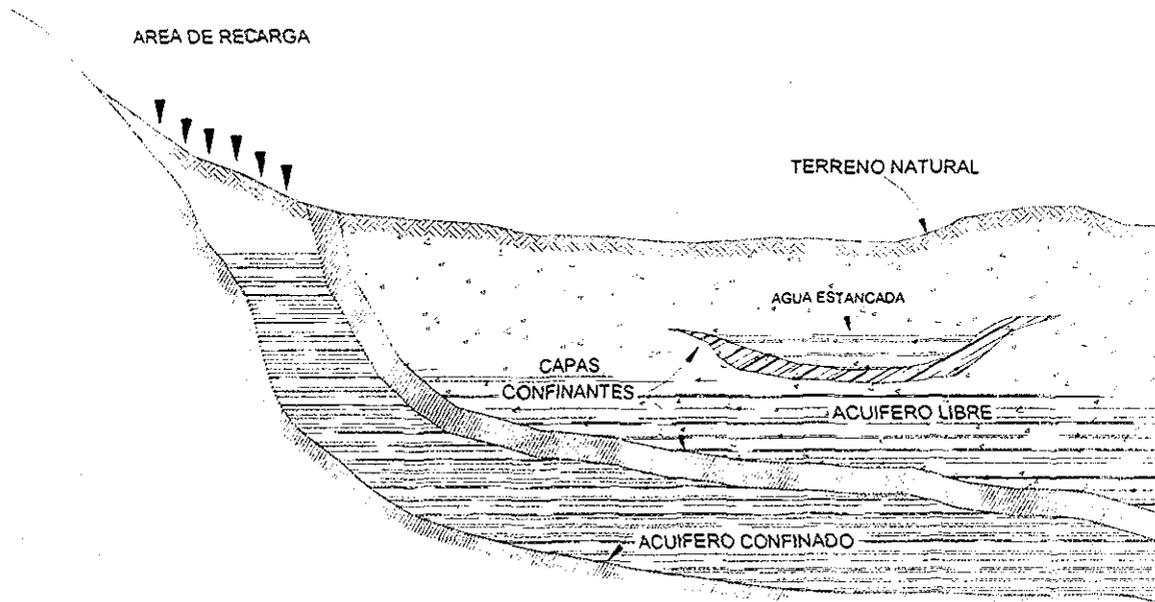


Figura 9. Configuración de un acuífero típico

Pueden existir dos tipos de acuífero, según la formación rocosa en la que se encuentre el agua:

- a) Acuífero freático o libre. Cuya superficie está sujeta a la presión atmosférica y el nivel puede variar influenciado por las infiltraciones en épocas de fuerte precipitación, o disminuir en épocas de sobre explotación.
- b) Acuífero artesiano. El agua de este tipo de acuíferos se encuentra confinada entre capas relativamente impermeables, en este tipo de acuífero, el agua está a una presión superior a la atmosférica, ya que las capas impermeables pueden funcionar como un conducto.

Según los estudios preliminares acerca de la geología e hidrogeología del sitio de estudio, elaborado por Geofísica y perforaciones del medio ambiente S.C. El sistema acuífero de la región se comporta de forma freática, es decir, no existe material impermeable o poco permeable que obstruya el techo del acuífero y lo condicione a presiones mayores al de la atmósfera. Así mismo, estos estudios mostraron que es posible encontrar el acuífero a una profundidad de 50 metros, profundidad que corresponde a la zona de la planicie, de tal manera, que en las cercanías de la sierra de Guadalupe, la profundidad se incrementa. De acuerdo a los resultados arrojados por este mismo estudio, el acuífero ubicado debajo del sitio se encuentra a 120 metros de profundidad (González, 2000)

El flujo de agua subterránea para el caso específico de la zona en cuestión tiende hacia el Oeste y Noroeste como puede observarse en la figura 10, con este comportamiento es fácil observar que la sierra de Guadalupe se comporta como una zona de recarga del sistema acuífero del valle de México, además que la sierra de Guadalupe se encuentra dentro de la zona de reserva ecológica del D.F. cuya finalidad entre otras es la de captar aguas pluviales para la recarga de dicho sistema acuífero (<http://sma.df.gob.mx/sima/dgpa/acuífero.htm>).

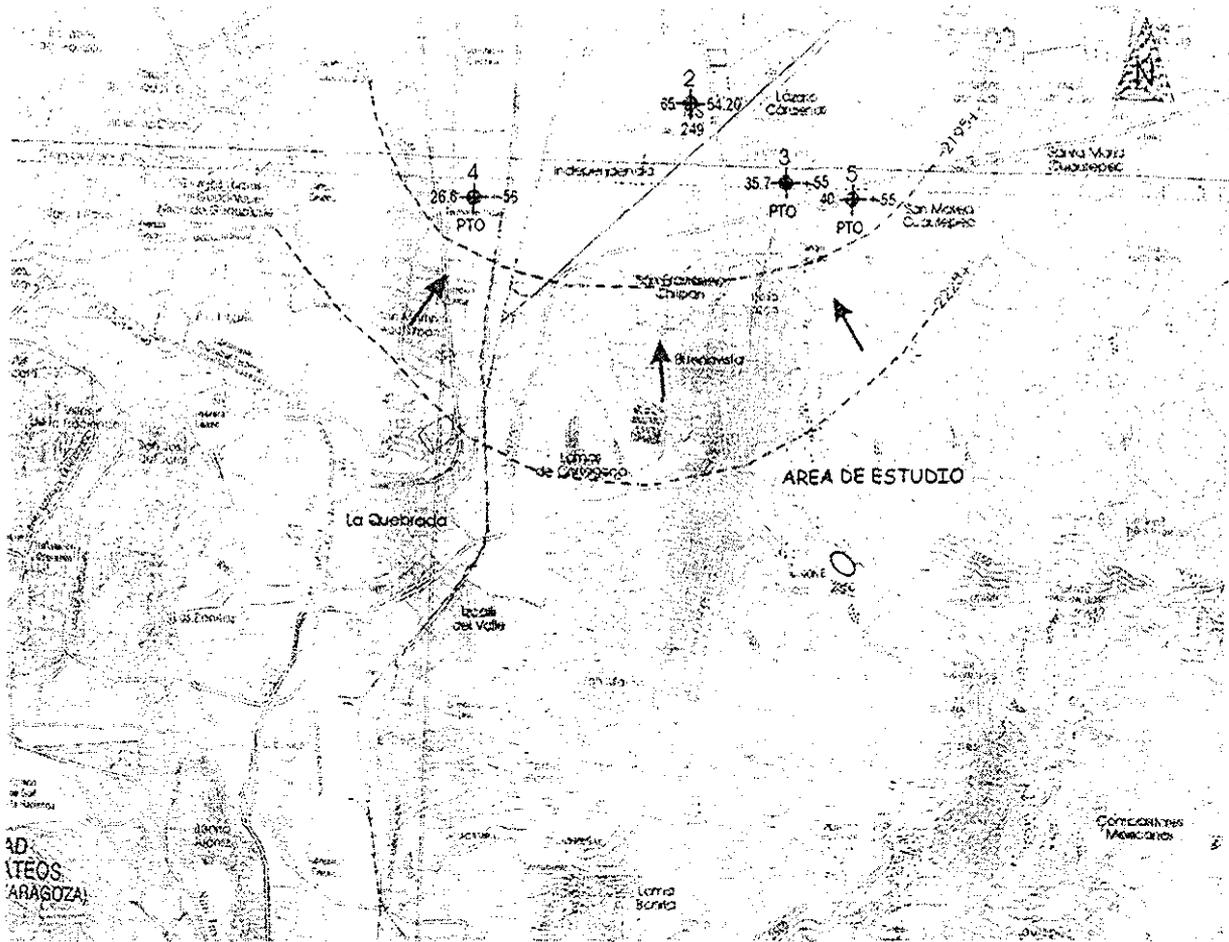


Figura 10 Dirección de las corrientes subterráneas en los acuíferos de la zona  
Fuente: González 2000

## 5.2 Características topográficas del sitio.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

El tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlán, Estado de México se ha caracterizado por la falta de control en la recepción de sus residuos, ya que en este sitio se reciben residuos municipales, industriales e incluso peligrosos, todo esto ha sido constatado por las diferentes visitas que se han realizado al lugar para la realización de este trabajo.

Una de las mayores particularidades en este sitio de disposición final es la utilización de escoria de fundición como material de cubierta en diferentes zonas del tiradero, esta cubierta se utiliza en algunas partes del tiradero, debido a que no se genera la cantidad suficiente para poder operar este material como una cubierta diaria. La configuración topográfica es la que se muestra en la figura 11, esta configuración corresponde al mes de noviembre del año 2000 y se espera que seguirá cambiando en tanto no se clausure de manera definitiva (González, 2000)

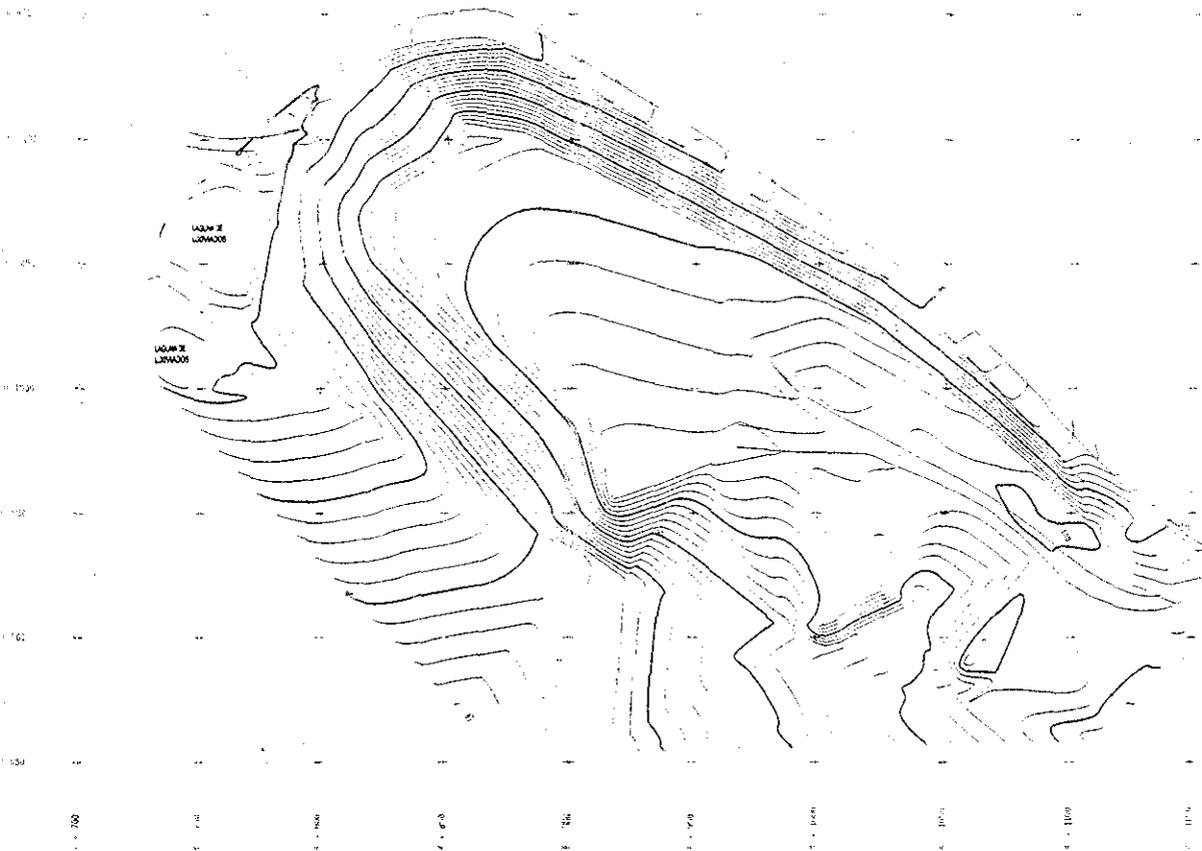


Figura 11 Topografía del tiradero a cielo abierto de Tultitlán Estado de México  
Fuente: González, 2000.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

También es posible apreciar con mayor claridad la topografía del sitio de estudio en el plano T-1 correspondiente a la topografía. La diferencia de niveles entre el nivel superior del tiradero a cielo abierto y el nivel de terreno natural más bajo es de 30 metros, ya que se trata de un tiradero ubicado en las faldas de un cerro; el volumen de este montículo se compone de residuos y escoria de fundición.

Debido a la falta de una operación adecuada del sitio, los residuos son tirados en el frente de trabajo y posteriormente arrastrados por un bulldozer, el cual vuelca los residuos por la orilla del frente hacia abajo, dejando que los RSM rueden por las pendientes hasta encontrar un ángulo de reposo, es decir, no existe la formación de celdas uniformes con una compactación uniforme. Con este tipo de operación los residuos son compactados parcialmente y hacen crecer de una forma incontrolada al tiradero de forma lateral formando pendientes que van del 10% al 65% en las partes más escarpadas del lugar.

Las pendientes tan apertadas que existen en este sitio representan un alto riesgo para todas aquellas personas que laboran o viven dentro o en las inmediaciones del tiradero, debido a que tales montículos de residuos no están dispuestos de tal forma que sean autosoportables, ya que no reciben un grado de compactación uniforme, y tampoco se evita la infiltración rápida del agua de lluvia, pues no se realiza la cubierta diaria de los residuos con material impermeable. Por lo que dichos taludes son susceptibles de fallas por deslizamiento y hundimientos incontrolados, lo cual pone en riesgo la vida de varias personas y la salud de las comunidades cercanas.

Es posible observar una de las pendientes más pronunciadas del tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlán, estado de México en la figura 12



Figura 12. Pendientes pronunciadas del Tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlán Estado de México

Del levantamiento topográfico mostrado en el plano T-1, también es posible observar los cortes longitudinal y transversal del sitio, los cuales podrán ilustrar de una forma más real las pendientes que existen en este sitio.

### 5.3 Balance de agua para el cálculo de la generación de lixiviados

#### 5.3.1 Consideraciones previas

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El balance de agua es comúnmente utilizado para la determinación de la cantidad de lixiviados en el campo de los residuos sólidos, este método consiste en el cálculo de las diferentes cantidades de humedad que participan en la generación de lixiviados, como la precipitación, la humedad generada por la degradación de los residuos, las cantidades de humedad requeridas para la estabilización y para el agotamiento de la capacidad de campo de los residuos sólidos. Una vez calculadas estas cantidades, se realiza el balance de agua y se obtiene la cantidad de lixiviado o la humedad requerida para que comience la lixiviación.

Para efectos de este trabajo, el balance de agua se realizará tomando en cuenta un metro cúbico de residuos sólidos, por lo que el área tomada en cuenta también será la unitaria.

La base del método de balance de agua es el cálculo de las diferentes cantidades de agua que intervienen en la generación de lixiviados, pues de ello depende directamente el cálculo. La información acerca de la precipitación pluvial así como la temperatura del sitio en cuestión fue obtenida de la estación meteorológica con clave 15073 (ERIC, 1996), donde han sido 27 años de registro, con los cuales fue posible la obtención de los registros de las precipitaciones medias mensuales, así como las temperaturas promedio de cada mes. Estos datos se encuentran en el cuadro 3 de este trabajo.

Los valores de las características de fisicoquímicas de los residuos sólidos fueron obtenidos de estudios realizados a los residuos del relleno sanitario de Bordo Poniente (Lemus, 1992), estas características pueden observarse en el cuadro 13

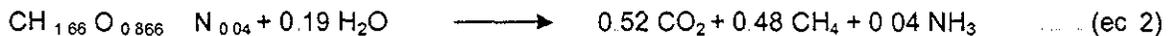
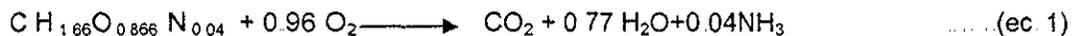
Cuadro 13. Datos utilizados para el balance de agua de Tultitlán, México.

Parámetro	Valor
Carbono	43.02 %
Hidrógeno	5.96%
Oxígeno	49.08 %
Nitrógeno	1.94 %
Capacidad de campo	1.62 L/kg
Peso volumétrico de la basura en la celda	900 kg/m <sup>3</sup>
Porosidad: n	40.00 %
H =	45.00 %
Porcentaje base humedad de materia degradable	80%
Cantidad de Materia orgánica en 1 m <sup>3</sup> de RSM	121.4 kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje en base seca de cenizas en materia degradable	5 %
Peso del aire	1 kg/m <sup>3</sup>

Fuente: Lemus 1992

### 5.3.2 Determinación de los parámetros que intervienen en la generación de lixiviados

Como ya se ha mencionado con anterioridad, el método de balance de agua para el cálculo de la cantidad de lixiviados generada por los residuos depositados en el basurero de Tultitlán, requiere a su vez de calcular las diferentes cantidades de agua que intervienen en la generación del lixiviado, para ello es necesario obtener la fórmula química que representa la composición química de los RSM en cuestión, ya que de ella es posible obtener el agua necesaria para su estabilización y la generada durante su degradación. El procedimiento para la obtención de esta expresión se encuentra en el apéndice 1 de este trabajo, y la fórmula mínima que gobierna la descomposición aerobia de la fracción orgánica de los RSM se presenta en la ecuación 1 y la fórmula mínima que gobierna la descomposición anaerobia de la fracción orgánica de los RSM en la ecuación 2



A partir de la ecuación 1 anterior, es posible obtener la cantidad de agua y el oxígeno requerido para la estabilización de los RSM en la fase aerobia, la cual según diferentes autores se realiza en las primeras semanas después de su disposición y la cual dura poco tiempo, ya que el oxígeno se agota, este cálculo se muestra a continuación.

$$C H_{1.66} O_{0.87} N_{0.04} = 1 \times 12 + 1.66 \times 1 + 0.87 \times 16 + 0.04 \times 14 = 27.98 \text{ g}$$

$$0.96 O_2 = 0.96 \times (16 \times 2) = 30.72 \text{ g}$$

$$30.72 \text{ g}^2 / 27.98 \text{ g} = 1.09 \text{ g}$$

Lo anterior muestra que para 27.98 g de materia orgánica se requieren 30.72 gramos de O<sub>2</sub>, entonces para un gramo de materia orgánica se requieren 1.1 gramos de O<sub>2</sub>

De la misma forma se obtiene la cantidad de agua que se produce en este proceso, que es de :

$$0.77 H_2O = 0.77 \times [(2 \times 1) + 16] = 13.86$$

$$13.86 / 27.98 = 0.495$$

El anterior valor indica que por cada gramo de residuos sólidos que se estabiliza, se produce 0.5 g de H<sub>2</sub>O.

De la misma forma que se calculó la cantidad de agua producida en la estabilización de los RSM, también se calcula la cantidad de agua requerida para que dicha estabilización se lleve a cabo, pero ahora en ausencia de oxígeno, es decir, en la fase anaerobia de descomposición. Al igual que en la fase aerobia se parte de la ecuación 2 que representa la descomposición de los RSM en esta fase

$$0.19 \text{ H}_2\text{O} = 0.19 [(1 \times 2) + 16] = 3.61 \text{ g}$$

$$3.61 \text{ g}^2 / 27.98 \text{ g} = 0.12 \text{ g}$$

Lo anterior muestra que para 27.98 g de materia orgánica se requieren 3.61 gramos de H<sub>2</sub>O, entonces para un gramo de materia orgánica se requieren 0.12 gramos de H<sub>2</sub>O

La aportación de agua más importante para la generación de los lixiviados en un sitio de disposición final de RSM proviene de la precipitación pluvial, esta cantidad es registrada por las estaciones meteorológicas, por lo que esta altura de precipitación dada en milímetros se puede observar en el cuadro 3 del punto 3.1

De la misma forma que a nivel estequiométrico, se deben calcular las cantidades de agua aportadas y evapotranspiradas debidas a factores meteorológicos, tales como la lluvia y la temperatura. El agua que es evapotranspirada limita enormemente la generación de lixiviado en los sitios de disposición final de RSM de ciertas zonas del país, ya que debido a las grandes temperaturas predominantes en el sitio y combinado con la poca precipitación, la mayor parte del agua precipitada es evaporada o evapotranspirada del suelo, por lo que la generación de lixiviados es poca.

Para determinar la evapotranspiración que sucede en el sitio en cuestión, se recurre al método de C.W. Thornthwaite el cual se enuncia en el apéndice 1. El cálculo corresponde a la evapotranspiración potencial ajustada mensual, la cual es aquella que sucedería en un suelo con humedad constante, es decir, que el agua se evapotranspira de manera indefinida sin tomar en cuenta que si el agua susceptible de ser extraída del suelo se agota, la evapotranspiración cesa. Esta consideración se realiza tomando en cuenta que para un cálculo más preciso se requiere mayor cantidad de información meteorológica como la velocidad del viento horaria, radiación solar, etc. y además de los residuos ya que es necesario saber datos como la conductividad hidráulica, y el albedo de los mismos; debido a la carencia de esta información, el cálculo se considera adecuado a las condiciones prevalecientes en nuestro país.

El cuadro 14 muestra el cálculo de la evapotranspiración potencial ajustada de cada mes, para las condiciones del municipio de Tultitlan, Estado de México

Cuadro 14. Evapotranspiración potencial ajustada para el municipio de Tultitlan, Estado de México

MES	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C)	$i = (T_j / 5)^{1.514}$ [mm]	$ET = 16(10T_j)^{0.8}$ [mm]	Kc	$ET_p = Kc ET$ [mm]
ENERO	4.96	0.99	22.8	0.9519	21.66
FEBRERO	5.73	1.23	26.5	0.9004	23.88
MARZO	8.58	2.26	40.7	1.0300	41.97
ABRIL	10.86	3.24	52.4	1.0493	54.93
MAYO	12.71	4.11	61.9	1.1282	69.81
JUNIO	13.97	4.74	68.4	1.1082	75.83
JULIO	13.32	4.41	65.0	1.1378	74.01
AGOSTO	12.87	4.18	62.7	1.1085	69.52
SEPTIEMBRE	12.75	4.13	62.1	1.0200	63.33
OCTUBRE	10.25	2.96	49.2	1.0007	49.27
NOVIEMBRE	7.81	1.96	36.9	0.9319	34.36
DICIEMBRE	6.28	1.41	29.2	0.9130	26.69
$i = \sum i_j$		35.62			
$a = 675 \cdot 10^{-9} i^3 - 771 \cdot 10^{-7} i^2 + 1792 \cdot 10^{-5} i + 0.49239 =$		1.06			

### 5.3.3 Aplicación del método de balance de agua

Usualmente el método de balance de agua se aplica para los rellenos sanitario en dos fases, la primera que corresponde al balance de agua en el material de cubierta, donde se calcula la cantidad de agua que se infiltra de la superficie al material de cubierta y el que percola hasta ponerse en contacto con los residuos confinados; y la segunda fase corresponde ya al agua infiltrada que percola a través de los residuos y que al agotar la capacidad de campo de los mismos comienza a lixiviar en el fondo de las celdas

Pero debido a que se trata de un tiradero a cielo abierto, es decir, un lugar cuya operación no incluye la cobertura diaria de los RS, ya que son dispuestos y acomodados de tal manera que haya más espacio para los residuos siguientes. El organismo operador trata de dar cobertura a los RSM utilizando escoria de fundición proveniente de los hornos de acero que existen en el municipio, esta escoria se utiliza para estabilizar los caminos de acceso y al mismo tiempo disponer ese residuo, pero la cantidad no es suficiente para realizar la cobertura diaria.

Otra razón por la que en este caso se considera que la escoria de fundición no se puede considerar como cubierta, se debe a que la naturaleza del mismo material provoca que la escoria sea permeable y permita el paso del agua fácilmente, ya que no contiene limos o arcillas que reduzcan su permeabilidad, por ello se ha considerado para efectos de este estudio la carencia de una cubierta capaz de retener humedad y retardar el paso del agua a los residuos

El cuadro 15 muestra el cálculo de la cantidad de agua que se infiltra al interior de los residuos desde la superficie, tomando en cuenta aquella agua que se pierde por evaporación u otros fenómenos

Cuadro 15. Cálculo de la infiltración de agua al interior de los RSM

MES	Días lluviosos	Días no lluviosos	ETp/mes [mm]	ETp/día [mm]	ETp/día lluviosos [mm]	Días con agua disponible	ETp/ días no lluviosos [mm]	TOTAL DE Etp [mm]	Altura de precipitación mensual (mm.)	K <sub>c</sub>	h <sub>p</sub> · K <sub>c</sub>	l = h <sub>p</sub> - h <sub>p</sub> K <sub>c</sub>	ij = l-ETp
ENERO	2	29	21.66	0.70	1.17	3	2.10	3.26	7.92	0.00	0.00	7.92	4.66
FEBRERO	2	28	23.88	0.80	1.69	3	2.39	4.08	6.95	0.00	0.00	6.95	2.87
MARZO	4	27	41.97	1.35	5.06	5	6.77	11.83	11.30	0.00	0.00	11.30	0.00
ABRIL	6	24	54.93	1.83	11.33	7	12.82	24.15	16.33	0.00	0.00	16.33	0.00
MAYO	12	19	69.81	2.25	26.46	19	42.79	69.25	61.94	0.00	0.00	61.94	0.00
JUNIO	16	14	75.83	2.53	40.72	14	35.39	76.11	138.36	0.00	0.00	138.36	62.25
JULIO	20	11	74.01	2.39	48.08	11	26.26	74.34	138.80	0.00	0.00	138.80	64.46
AGOSTO	19	12	69.52	2.24	43.33	12	26.91	70.24	130.20	0.00	0.00	130.20	59.96
SEPTIEMBRE	16	14	63.33	2.11	34.47	14	29.56	64.03	121.78	0.00	0.00	121.78	57.75
OCTUBRE	8	23	49.27	1.59	13.11	9	14.30	27.41	48.10	0.00	0.00	48.10	20.69
NOVIEMBRE	4	26	34.36	1.15	4.63	5	5.73	10.35	8.78	0.00	0.00	8.78	0.00
DICIEMBRE	2	29	26.69	0.86	1.90	3	2.58	4.49	6.01	0.00	0.00	6.01	1.52

Después de contar con la cantidad de agua que se infiltra, se aplica el balance de agua completo es decir, tomando en cuenta todas las aportaciones y requerimientos de agua ya sean desde el interior o exterior de los RSM.

Para poder realizar el balance completo, es necesario obtener las cantidades de agua que intervienen en este proceso, esto será tomando en cuenta un metro cúbico de RSM cuyos lados serán de un metro, así la altura de humedad medida será la existente en un área de un metro cuadrado.

La altura de agua que contienen los RSM desde su generación se debe a su humedad, la cual para este caso es de 45%, entonces:  $1 \text{ m}^3$  de basura contiene  $(700 \text{ kg/m}^3 \times 0.45) = 0.315 \text{ m}^3$  de agua; tomando en cuenta una superficie de  $1 \text{ m}^2$ , se tiene que: para una altura en la celda de 1m. de basura se dispone de 315 mm. Lo anterior nos quiere decir que para una humedad del 45%, equivale a 315 mm. de agua disponible

La cantidad de agua requerida por capacidad de campo se obtiene a partir de saber que 1 kg de basura requiere 1.62 kg de agua/kg de basura seca, entonces, con la regla de tres se obtiene que para un peso de 385 kg de basura seca (que es la diferencia de los  $700 - 315 \text{ kg}$  en un  $\text{m}^3$  de basura obtenidos en el punto anterior) se requerirán  $(385 \times 1.62) = 623.7 \text{ kg}$  de agua; de la misma manera que en la anterior se toma una superficie de  $1 \text{ m}^2$ , se tiene que para 1m. de altura dentro de la celda requiere de 623.7 mm de agua. Esto indica que para una capacidad de campo de 1.62 kg de agua/kg de basura seca, equivale a 623.7 mm de altura de agua requerida por capacidad de campo, la cual al agotarse el lixiviado comienza a percolar

A nivel interno, los RSM requieren humedad para estabilizarse en la fase anaerobia, donde se obtuvo que se requerirán 120 g de agua para estabilizar 1 kg de materia orgánica, por lo que para 121.4 kg de materia orgánica contenida en  $1 \text{ m}^3$  de residuos se necesitarán 15 mm. de agua.

Al sumar algebraicamente las diferentes cantidades de agua requeridas (capacidad de campo + humedad para estabilización) más las cantidades de agua aportadas (humedad contenida en los residuos + la precipitación del primer mes de cálculo) se tiene un valor de:

$$315 + 4.66 - 15 - 623.7 = -319.04$$

En los cuadros, 16, 17 y 18 se muestra el balance de agua completo, tomando en cuenta todos los parámetros que intervienen en la generación del lixiviado.

Cuadro 16. Determinación de la cantidad de lixiviado, en el primer año de cálculo

PARAMETRO	EN	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	Σ
PERCOLACIÓN DE AGUA	4.66	2.87	0.00	0.00	0.00	62.25	64.46	59.96	57.75	20.69	0.00	1.52	274.17
CAPACIDAD DE CAMPO	320.33	317.45	317.45	317.45	317.45	255.20	190.74	130.78	73.03	52.34	52.34	50.82	
LIXIVIADO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 17. Determinación de la cantidad de lixiviado, en el segundo año de cálculo

PARAMETRO	EN	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	Σ
PERCOLACIÓN DE AGUA	4.66	2.87	0.00	0.00	0.00	62.25	64.46	59.96	57.75	20.69	0.00	1.52	274.17
CAPACIDAD DE CAMPO	46.16	43.29	43.29	43.29	43.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
LIXIVIADO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	62.25	64.46	59.96	57.75	20.69	0.00	1.52	266.63

Cuadro 18. Determinación de la cantidad de lixiviado, en el tercer año de cálculo

PARAMETRO	EN	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	Σ
PERCOLACIÓN DE AGUA	4.66	2.87	0.00	0.00	0.00	62.25	64.46	59.96	57.75	20.69	0.00	1.52	274.17
CAPACIDAD DE CAMPO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
LIXIVIADO	4.66	2.87	0.00	0.00	0.00	62.25	64.46	59.96	57.75	20.69	0.00	1.52	274.17

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Es posible observar en los cuadros 17 y 18 que en un metro cúbico de RSM el lixiviado aparece hasta el segundo año después de haber sido dispuesto en el sitio, y de haber cubierto todas sus necesidades de humedad. Después de ese año los RSM comenzarán a generar lixiviado en la misma cantidad que reciben agua de precipitación, es decir, que al año cada metro cúbico de RSM producirá  $0.27 \text{ m}^3$  de lixiviado.

#### *5.3.4 Cálculo de la cantidad de lixiviados generados*

En el punto anterior es posible apreciar el cálculo de la generación de lixiviados por un metro cúbico de RSM cuyas dimensiones son de 1m de alto por una superficie de  $1\text{m}^2$  y con un peso volumétrico de  $700 \text{ kg/m}^3$ , el cual comienza a generar dichos lixiviados en el segundo año después de su disposición; debido a estas restricciones de geometría la cantidad calculada corresponde a una generación potencial. Ya que es de esperarse que el tonelaje dispuesto en un día de operaciones o el de un año, no se disponga de tal manera que tenga solamente un metro de altura, debido a las restricciones de espacio que tiene el lugar, si no que, los RSM se acomodarán de tal manera que serán varios metros de altura, debido a ello la generación de lixiviados se retrasará, ya que el área expuesta a la precipitación será menor.

Tomando en cuenta que el sitio recibe 400 ton/día, entonces para un año la cantidad acumulada en el sitio es de 146,000 ton/año y considerando que se utiliza un peso volumétrico de  $700 \text{ kg/m}^3$ , el volumen anual es de  $208,571.4 \text{ m}^3$ .

Debido a que existe una falta de control en la operación del sitio, no es posible saber con certeza cuál es el área y la altura del montículo formado por esta cantidad de RSM, por ello se considera que el sitio crecerá de forma vertical conservando el área actual del tiradero que es de aproximadamente 6 Has, para esta superficie corresponde una altura de RSM de 3.48 m. Utilizando el método del balance de agua para estas consideraciones se obtienen los resultados que se muestran en el cuadro 19.

Cuadro 19. Balance de agua para una superficie de 6 Has y 3.48m de altura de RSM

ANO	PARAMETRO	EN	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	Σ
1	PERCOLACIÓN DE AGUA	4.66	2.87	0.00	0.00	0.00	62.25	64.46	59.96	57.75	20.69	0.00	1.52	274.17
	CAPACIDAD DE CAMPO	1125.06	1122.18	1122.18	1122.18	1059.93	995.47	935.51	877.76	857.07	857.07	857.07	855.55	
	LIXIVIADO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	PERCOLACIÓN DE AGUA	4.66	2.87	0.00	0.00	0.00	62.25	64.46	59.96	57.75	20.69	0.00	1.52	274.17
	CAPACIDAD DE CAMPO	850.89	848.02	848.02	848.02	785.76	721.31	661.34	603.59	582.91	582.91	582.91	581.38	
	LIXIVIADO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	PERCOLACIÓN DE AGUA	4.66	2.87	0.00	0.00	0.00	62.25	64.46	59.96	57.75	20.69	0.00	1.52	274.17
	CAPACIDAD DE CAMPO	576.73	573.85	573.85	573.85	511.60	447.14	387.18	329.43	308.74	308.74	308.74	307.22	
	LIXIVIADO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	PERCOLACIÓN DE AGUA	4.66	2.87	0.00	0.00	0.00	62.25	64.46	59.96	57.75	20.69	0.00	1.52	274.17
	CAPACIDAD DE CAMPO	302.56	299.69	299.69	299.69	237.43	172.98	113.01	55.26	34.58	34.58	34.58	33.05	
	LIXIVIADO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	PERCOLACIÓN DE AGUA	4.66	2.87	0.00	0.00	0.00	62.25	64.46	59.96	57.75	20.69	0.00	1.52	274.17
	CAPACIDAD DE CAMPO	28.39	25.52	25.52	25.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	LIXIVIADO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.73	64.46	59.96	57.75	20.69	0.00	1.52	241.11
6	PERCOLACIÓN DE AGUA	4.66	2.87	0.00	0.00	0.00	62.25	64.46	59.96	57.75	20.69	0.00	1.52	274.17
	CAPACIDAD DE CAMPO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	LIXIVIADO	4.66	2.87	0.00	0.00	0.00	62.25	64.46	59.96	57.75	20.69	0.00	1.52	274.17

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

En el cuadro 19 es posible observar que el lixiviado para estas condiciones de superficie y altura de RSM aparece hasta el quinto año y a partir de ahí los lixiviados siguen generándose de manera continua. La cantidad de lixiviados generados en un año será de  $16,450.2 \text{ m}^3$  considerando que la misma cantidad de agua precipitada será la captada por las 6 Has y esa agua percolará por los RSM. Esta cantidad es la que se considera se generó en el año 2000 debido a que según informes de los operadores la cantidad de RSM dispuestos se ha mantenido, así como la superficie.

Para poder calcular el total de lixiviados que se han generado en este sitio a lo largo de sus años de operación, es necesario realizar extrapolaciones de la información que se posee, pues no existen registros acerca de las cantidades depositadas ni del crecimiento de su superficie a lo largo de su operación. Por ello, para efectos de este trabajo se considerará que la superficie del tiradero creció horizontalmente y de forma lineal. Tomando esto en cuenta, se realizará el cálculo para cada una de estas superficies y se calculará el volumen de lixiviados generados en cada uno de los años, así como el acumulado. El cálculo del volumen generado por el tiradero a lo largo de su operación puede apreciarse en el cuadro 20.

Cuadro 20. Cálculo del volumen de RSM dispuestos y lixiviados generados hasta el año 2000, por el tiradero a cielo abierto del Municipio de Tuilitlán, Estado de México

Año de operación	Año	Población	Gen. per cápita [kg/hab-d]	Gen. diaria [ton/d]	% de Rec.	Recolectión [ton/d]	% de separación [ton/d]	Disposición final [ton/d]	Peso volumétrico de residuos [ton/m <sup>3</sup> ]	Volumen de residuos [m <sup>3</sup> /d]	Volumen anual [m <sup>3</sup> /año]	Generación de lixiviados [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de residuo]	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Generación de lixiviados [m <sup>3</sup> ]	Volumen acumulado [m <sup>3</sup> ]
1.00	1977	111,475	0.56	62.05	0.85	52.75	0.03	51.17	0.45	113.71	41,503.96	0.27	2,500.00	685.43	685.43
2.00	1978	119,927	0.59	71.16	0.85	60.48	0.03	58.41	0.45	129.80	47,376.36	0.27	5,000.00	1,370.85	2,056.28
3.00	1979	128,378	0.63	80.88	0.85	68.75	0.04	66.07	0.45	146.82	53,587.83	0.27	7,500.00	2,056.28	4,112.55
4.00	1980	136,829	0.67	91.22	0.85	77.54	0.04	74.13	0.45	164.73	60,126.36	0.27	10,000.00	2,741.70	6,854.25
5.00	1981	147,793	0.70	103.95	0.85	88.36	0.05	83.93	0.55	152.60	55,698.88	0.27	12,500.00	3,427.13	10,281.38
6.00	1982	158,756	0.74	117.48	0.85	99.86	0.06	94.20	0.55	171.28	62,517.75	0.27	15,000.00	4,112.55	14,393.93
7.00	1983	169,720	0.78	131.82	0.85	112.04	0.06	104.93	0.55	190.78	69,633.16	0.27	17,500.00	4,797.98	19,191.90
8.00	1984	180,683	0.81	146.96	0.85	124.91	0.07	116.07	0.55	211.03	77,026.32	0.27	20,000.00	5,483.40	24,675.30
9.00	1985	191,647	0.85	162.90	0.85	138.46	0.08	127.60	0.65	196.30	71,650.08	0.27	22,500.00	6,168.83	30,844.13
10.00	1986	202,610	0.89	179.65	0.85	152.70	0.09	139.48	0.65	214.59	78,324.58	0.27	25,000.00	6,854.25	37,698.38
11.00	1987	213,574	0.92	197.20	0.85	167.62	0.10	151.69	0.65	233.37	85,181.03	0.27	27,500.00	7,539.68	45,238.05
12.00	1988	224,537	0.96	215.56	0.85	183.22	0.10	164.19	0.65	252.60	92,199.94	0.27	30,000.00	8,225.10	53,463.15
13.00	1989	235,501	1.00	234.56	0.85	199.37	0.11	176.84	0.65	272.06	99,302.98	0.27	32,500.00	8,910.53	62,373.68
14.00	1990	246,464	1.03	254.35	0.85	216.20	0.12	189.70	0.65	291.85	106,524.47	0.27	35,000.00	9,595.95	71,969.63
15.00	1991	269,464	1.07	287.79	0.85	244.62	0.14	210.70	0.70	301.00	109,863.87	0.27	37,500.00	10,281.38	82,251.00
16.00	1992	292,464	1.10	322.88	0.85	274.45	0.16	231.75	0.70	331.07	120,840.79	0.27	40,000.00	10,966.80	93,217.80
17.00	1993	315,464	1.14	359.63	0.85	305.68	0.17	252.71	0.70	361.02	131,771.89	0.27	42,500.00	11,652.23	104,870.03
18.00	1994	338,464	1.18	398.03	0.85	338.33	0.19	273.44	0.70	390.63	142,579.17	0.27	45,000.00	12,337.65	117,207.68
19.00	1995	361,464	1.21	438.09	0.85	372.38	0.21	293.77	0.70	419.67	153,181.15	0.27	47,500.00	13,023.08	130,230.75
20.00	1996	375,653	1.25	468.82	0.85	398.49	0.23	308.47	0.70	440.68	160,847.03	0.27	50,000.00	13,708.50	143,939.25
21.00	1997	389,843	1.28	500.56	0.85	425.47	0.24	322.85	0.70	461.22	168,344.38	0.27	52,500.00	14,393.93	158,333.18
22.00	1998	404,032	1.32	533.32	0.85	453.32	0.26	336.83	0.70	481.18	175,631.67	0.27	55,000.00	15,079.35	173,412.53
23.00	1999	418,222	1.52	635.70	0.85	540.34	0.31	374.83	0.70	535.47	195,446.68	0.27	57,500.00	15,764.78	189,177.30
24.00	2000	432,411	1.72	721.18	0.85	613.00	0.35	400.00	0.70	571.43	208,571.43	0.27	60,000.00	16,450.20	205,627.50

Como es posible observar en el cuadro 20, el tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlán, Estado de México ha confinado desde su apertura en 1977 hasta la fecha un volumen de RSM de 208,571.43 m<sup>3</sup> y ha generado en sus 24 años de operación 205,627.50 m<sup>3</sup> de lixiviados.

Cabe señalar que el cálculo de dichas cantidades debe tomarse con reserva, ya que no existen registros que indiquen las cantidades dispuestas diariamente, el porcentaje de recolección y la generación de RSM en los años pasados, por lo que el cálculo se realizó con cifras nacionales promedio indicadas por el INE en 1999

#### 5.4 Afectaciones al acuífero

El diagnóstico de la afectación de los lixiviados a los mantos acuíferos de la zona de estudio es de suma importancia, ya que con ello es posible hacer más evidente la necesidad de la clausura del tiradero lo más pronto posible, ya que en el caso en el que los lixiviados entren en contacto con los acuíferos se pone en un grave riesgo la salud pública del municipio, pues como se vio en el punto 4.1 existen pozos que suministran agua para uso y consumo humano, por lo tanto, este cálculo es de vital importancia para la clausura de este sitio

Para realizar dicho diagnóstico es necesario conocer las características del suelo sobre el que se ha construido el tiradero, para ello se considerarán la información aportada por los diferentes estudios que ya se han hecho al sitio. Los resultados de dichos estudios indicaron, que la permeabilidad varía desde  $1 \times 10^{-4}$  cm/seg, hasta  $3.02 \times 10^{-6}$  cm/seg, es decir, desde permeabilidad media hasta baja. En números, supondría que cualquier fluido que proviniese de la superficie, se infiltraría a razón de 8.64 cm/día en los materiales permeables y 0.26 cm/día en los materiales menos permeables. En este sentido, debe tomarse en cuenta que los espesores que representan a los materiales menos permeables no son mayores a los 20 m, todo ello basado en los resultados de los estudios geofísicos, donde para la unidad UIIa, existen espesores entre 20 y 10 metros de espesor (González, 2000); como puede observarse en el cuadro 21 se muestran las diferentes características de los diferentes tipos de materiales existentes en el subsuelo del tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlán.

Cuadro 21. Clasificación geofísica de los materiales que conforman el subsuelo del sitio de estudio

Nomenclatura	Características
UI	Unidad geoelectrica con resistividades entre los 4 y 10 ohm – m; se relaciona con los depósitos de RSM
UII	Unidad geoelectrica con resistividades entre los 4 y 133 ohm – m; se relaciona con el material natural de la zona. consistente de:
UIIa	Material predominantemente piroclástico (ceniza volcánica) de textura arcillo – limosa en color amarillo
UIIb	Material piroclástico de textura variable desde la arcilla hasta la arena con fragmentos esporádicos de roca andesítica
UIIc	Coladas de lava de composición andesítica y brechas volcánicas

Fuente: González 2000

Con la información obtenida de los estudios geofísicos es posible observar los diferentes valores de conductividad hidráulica de los estratos que se encuentran debajo del tiradero y sobre el manto acuífero, el cual se encuentra ubicado a 120 m de profundidad (González, 2000). Con estos datos es posible idealizar el subsuelo en cuestión, como se muestra en la figura 13.

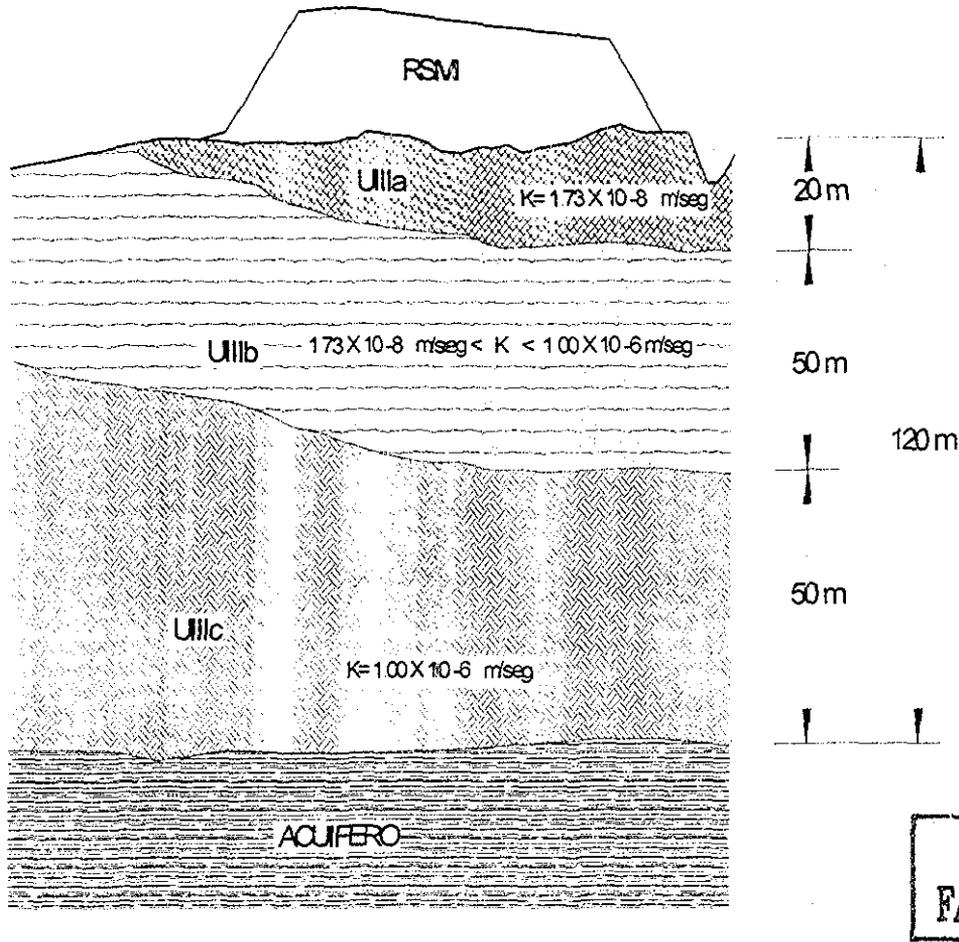


Figura 13 Idealización de las condiciones del subsuelo en el sitio de estudio

Con esta información es posible realizar los cálculos para conocer el tiempo que una gota de lixiviado tardará en llegar al acuífero. Considerando una filtración en dirección vertical, con flujo laminar en condiciones saturadas, según la ley de Darcy la velocidad del flujo es:

$$v = k \cdot i = k \cdot (d + h) / d$$

donde: k es la conductividad hidráulica del suelo;

i es el gradiente hidráulico;

d es el espesor de la zona sobre el nivel freático;

h es el nivel del agua (lixiviado) en el fondo del relleno, como carga hidráulica

(Si  $h = 0$ , entonces el gradiente hidráulico  $i = 1$  y así la velocidad del flujo  $v = k$ .)

El tiempo que se necesita para que una posible contaminación llegue hasta el nivel freático es:

$$t = d / v = d^2 / [k * (d + h)]$$

Se realiza el cálculo con  $h = 1$  m suponiendo una carga hidráulica de lixiviado, la conductividad hidráulica sea para los primeros 20 metros de  $k = 1.73 \times 10^{-8}$  m/s. Así, el tiempo en que llegaría la contaminación al acuífero es:

$$t = (20 \text{ m})^2 / (1.73 \times 10^{-8} \text{ m/s} * 21 \text{ m}) = 1.1 \times 10^9 \text{ seg} \approx 35 \text{ años}$$

Para el segundo estrato se utilizará  $k = 3.02 \times 10^{-8}$  m/s y con un espesor de 50 metros. Así, el tiempo en que llegaría la contaminación al acuífero es:

$$t = (50 \text{ m})^2 / (3.02 \times 10^{-8} \text{ m/s} * 71 \text{ m}) = 1.2 \times 10^9 \text{ seg} \approx 37 \text{ años}$$

Para el segundo estrato se utilizará la  $k = 1.00 \times 10^{-6}$  m/s y con un espesor de 50 metros. Así, el tiempo en que llegaría la contaminación al acuífero es:

$$t = (50 \text{ m})^2 / (1.00 \times 10^{-6} \text{ m/s} * 121 \text{ m}) = 2.1 \times 10^7 \text{ seg} \approx 0.7 \text{ años}$$

Con esto podemos decir que, el acuífero estará en contacto con los lixiviados en 72.7 años, a lo cual faltan 48.7 años para que lleguen al acuífero. Esta consideración es un escenario muy favorable para el acuífero, donde se toma en cuenta a partir del segundo estrato un coeficiente relativamente de baja permeabilidad, pero si se toma en cuenta que según los estudios geofísicos se menciona que el segundo estrato sea el que predomina a partir de los 20 metros de profundidad, por lo que existe la posibilidad de un canal de material permeable ( $k = 1.00 \times 10^{-6}$  m/seg) de forma vertical, lo cual reduce de manera drástica el tiempo en que los lixiviados llegarán al acuífero. Calculando dicho tiempo tenemos:

$$t = (100 \text{ m})^2 / (1.00 \times 10^{-6} \text{ m/s} * 121 \text{ m}) = 8.3 \times 10^7 \text{ seg} \approx 2.6 \text{ años}$$

Por lo que sólo se tienen 37.6 años, a los cuales solamente faltan 13.6 años; la certeza de esta predicción depende directamente de la precisión de la conductividad hidráulica y de los espesores de los diferentes tipos de suelo, lo cual puede afinarse con más estudios.

### 5.5 Cálculo de la cantidad de biogás generado

Este cálculo se basa en la estequiometría realizada para obtener la humedad requerida por los RSM para degradarse en el punto 5.3.2, estos cálculos pueden observarse con más detalle en el apéndice A1.3

Tomando en cuenta la ecuación que rige la composición de los RSM en condiciones anaerobias se tiene:



entonces, para obtener la cantidad de metano producido por una tonelada de RSM se tiene lo siguiente:

$$0.48 \text{ CH}_4 = 0.48 \times (12 + 4) = 7.67 \text{ g/mol}$$

La cantidad de metano es de:

$$7.67 \times 0.121 \times 1 / 27.89 = 0.033 \text{ Ton.}$$

De la misma manera se obtiene la cantidad de bióxido de carbono es de:

$$0.52 \text{ CO}_2 = 0.52 \times (12 + (2 \times 16)) = 22.91 \text{ g/mol}$$

$$22.91 \times 0.121 \times 1 / 27.89 = 0.100 \text{ Ton.}$$

La cantidad de amoniaco es de:

$$0.04 \text{ NH}_3 = 0.04 \times (14 + (3 \times 1)) = 0.66 \text{ g/mol}$$

$$0.66 \times 0.121 \times 1 / 27.89 = 0.003 \text{ Ton.}$$

El volumen de cada uno de estos componentes puede ser obtenido al tomar en cuenta la densidad de cada compuesto

Densidad del metano:	0.7167 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del bióxido de carbono:	1.9768 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del amoniaco:	0.7708 kg/m <sup>3</sup>

$$\text{CH}_4 = 33 \text{ Kg.} / 0.7167 = 47 \text{ m}^3$$

$$\text{CO}_2 = 100 \text{ Kg.} / 1.9768 = 50 \text{ m}^3$$

$$\text{NH}_3 = 3 \text{ Kg.} / 0.7708 = 3 \text{ m}^3$$

La composición porcentual de cada gas será:

$$\text{Biogás} = 101 \text{ m}^3 = 100 \%$$

Metano: 46 %

Bióxido de carbono: 50 %

Amoniaco: 4 %

Por lo tanto, la cantidad de biogás potencial que se puede producir por tonelada es de 101 m<sup>3</sup>, pero cabe señalar que la producción del mismo no es a una misma tasa, ya que dependiendo del desarrollo de las condiciones anaerobias dentro del tiradero es la velocidad de producción; para conocer la generación de dicho gas en el tiempo es necesario utilizar un modelo propuesto por Barlaz del departamento de ingeniería civil de la Universidad de Carolina del Norte en los Estados Unidos, este modelo utiliza una ecuación de orden cero, por lo que es muy sencilla y muestra que la tasa de generación de biogás es independiente de la cantidad de sustrato y el cual toma en cuenta la masa de basura recibida anualmente (Vidales, 1994), dicho modelo se muestra a continuación:

$$Q = Lo R (\exp(-Kc) - \exp(-Kt))$$

Donde:

Q= Tasa de generación de metano con el tiempo, [m<sup>3</sup>/año]

Lo= Capacidad potencial de la basura de generar metano, [m<sup>3</sup>/Mg]

R= Tasa de aceptación promedio de basura durante la vida activa del relleno, [Mg/año]

K= Tasa de generación de metano que se supone constante, [1/año]

c= Tiempo desde la clausura del relleno, [año]

t= Tiempo desde el inicio de colocación de la basura en el relleno, [año]

1 Mg = 1,000,000 gramos = 1 tonelada métrica

Aplicando el modelo anterior a los datos históricos de recepción de residuos por el tiradero a través de los años como lo indica el cuadro 20, y considerando que el sitio será clausurado en el año 2000, es posible calcular la generación de biogás a través del cálculo de la generación de metano en el transcurso de los años de operación del tiradero. Los valores de las constantes utilizadas en este cálculo se obtienen de los cálculos de la generación potencial de biogás para este caso y de las recepciones anuales de residuos registrados en la tabla, el coeficiente K se tomará de las

recomendaciones del autor del modelo, el cual asume un valor de 0.05. Lo anterior se muestra en el cuadro 22.

Cuadro 22. Producción de biogás generada en los años de operación del tiradero a cielo abierto del Municipio de Tultitlán.

AÑO	DESECHOS SÓLIDOS [TON/AÑO]	DESECHOS SÓLIDOS ACUMULADOS [TON/AÑO]	C [AÑOS]	T [AÑOS]	CH <sub>4</sub> GENERADO [m <sup>3</sup> /año]	TASA DE PRODUCCION [m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /TON-AÑO]	* BIOGÁS GENERADO [m <sup>3</sup> /año]	TASA DE PRODUCCION [m <sup>3</sup> BIOGÁS/TON-AÑO]
1977	18,676.78	18,677	0	0	0.00E+00	0.00	0.00E+00	0.00
1978	21,319.36	39,996	0	1	1.60E+05	4.01	3.21E+05	8.03
1979	24,114.52	64,111	0	2	3.13E+05	4.88	6.26E+05	9.77
1980	27,056.86	91,168	0	3	4.58E+05	5.03	9.17E+05	10.06
1981	30,634.38	121,802	0	4	5.97E+05	4.90	1.19E+06	9.79
1982	34,384.76	156,187	0	5	7.28E+05	4.66	1.46E+06	9.32
1983	38,298.24	194,485	0	6	8.53E+05	4.39	1.71E+06	8.77
1984	42,364.48	236,849	0	7	9.72E+05	4.10	1.94E+06	8.21
1985	46,572.55	283,422	0	8	1.08E+06	3.83	2.17E+06	7.66
1986	50,910.98	334,333	0	9	1.19E+06	3.57	2.38E+06	7.13
1987	55,367.67	389,701	0	10	1.29E+06	3.32	2.59E+06	6.65
1988	59,929.96	449,631	0	11	1.39E+06	3.10	2.78E+06	6.19
1989	64,546.94	514,177	0	12	1.48E+06	2.89	2.97E+06	5.78
1990	69,240.90	583,418	0	13	1.57E+06	2.70	3.15E+06	5.39
1991	76,904.71	660,323	0	14	1.66E+06	2.51	3.31E+06	5.02
1992	84,588.56	744,912	0	15	1.74E+06	2.33	3.47E+06	4.66
1993	92,240.32	837,152	0	16	1.81E+06	2.16	3.62E+06	4.33
1994	99,805.42	936,957	0	17	1.88E+06	2.01	3.77E+06	4.02
1995	107,226.81	1,044,184	0	18	1.95E+06	1.87	3.91E+06	3.74
1996	112,592.92	1,156,777	0	19	2.02E+06	1.74	4.04E+06	3.49
1997	117,841.07	1,274,618	0	20	2.08E+06	1.63	4.16E+06	3.26
1998	122,942.17	1,397,560	0	21	2.14E+06	1.53	4.28E+06	3.06
1999	136,812.67	1,534,373	0	22	2.20E+06	1.43	4.39E+06	2.86
2000	146,000.00	1,680,373	0	23	2.25E+06	1.34	4.50E+06	2.68
2001	0	1,680,373	1	24	2.14E+06	1.27	4.28E+06	2.55
2002	0	1,680,373	2	25	2.03E+06	1.21	4.07E+06	2.42

\* La cantidad total de biogás se considera como el doble de la cantidad de metano (Vidales 1994)

R= 70,016 Ton/año

K= 0.05 1/año

Lo= 47 m<sup>3</sup>/Ton

Con esto es posible apreciar la cantidad de biogás que ha escapado a la atmósfera contribuyendo al cambio climático, el cual es motivo de preocupación internacional. Todo esto muestra la necesidad de la clausura de este tipo de sitios de disposición final, ya que su operación significa un grave deterioro ambiental, no solo local o regional, ya que se trata de un problema de ámbito internacional.

### 5.6 Detección de partículas viables en el sitio

Como se mencionó en el punto 4.3, la naturaleza intrínseca de los tiraderos a cielo abierto provocan una enorme cantidad de partículas suspendidas totales y viables; las segundas son las más preocupantes ya que se trata de organismos que pueden causar diversas enfermedades a todas aquellas personas que viven o laboran en las cercanías del tiradero, y aún más en aquellas personas que vivan y laboren dentro del tiradero.

Debido a que no existen normas internacionales o nacionales que recomienden el tipo de microorganismo o la metodología a seguir para realizar dicha prueba, se recomienda en primera instancia tomar en cuenta los microorganismos considerados como indicadores biológicos de

contaminación en otros medios y que se han detectado en los escasos estudios efectuados en el aire de diferentes instalaciones de manejo de RSM, como lo son las estaciones de transferencia en el Distrito Federal (Sánchez, 1996 y Reyes, 1998) Los microorganismos a monitorear en este trabajo fueron: Coliformes, Staphylococcus, Hongos y levaduras, Candida Albicannis y Salmonella.

El procedimiento utilizado para dicho monitoreo fue el siguiente:

- a) Se colocaron a exposición directa al aire una caja petri previamente identificadas con medios de cultivo selectivo (para hongos y levaduras, coliformes fecales y *Salmonella*, *Candida*, etc.) durante un periodo de cinco minutos de forma simultanea
- b) Terminado el tiempo de muestreo para cada uno de los medios, se registra y se identifica cada caja con número de muestra, fecha, fase y datos que pudieran ser útiles para el análisis
- c) Las cajas se colocaron en forma invertida para prevenir la condensación y se incuban a 35°C, durante un periodo de 24 – 48 hrs
- d) Al término del periodo de incubación, se cuenta el número de colonias de cada caja considerando que una sola bacteria cuenta como una unidad formadora de colonia.

Los cultivos utilizados para cada tipo de microorganismo fueron los siguientes:

- a) Para la identificación de Coliformes, se empleó el medio de cultivo: Agar de Endo
- b) Para el cultivo de Staphylococcus, se empleó el Agar Voguel Jonson
- c) Para hongos y levaduras se utilizó Agar de Dextrosa Sabouraud
- d) Para aislamiento e identificación de Candida, se empleó Agar Biggy
- e) Y para Salmonella se empleo Agar para Salmonella.

La preparación de los cultivos, así como su incubación fueron realizadas en el laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Los resultados de dichos muestreos pueden observarse en los cuadros 23, 24 y 25.

Cuadro 23. Resultados del muestreo en el tiradero a cielo abierto de Tultitlan

LUGAR: TIRADERO A CIELO ABIERTO DE TULTITLAN		
FECHA: 28/04/01		
TIEMPO DE EXPOSICIÓN: 5 MINUTOS		
LUGAR DE EXPOSICIÓN: ZONA HABITACIONAL		
MICROORGANISMO	NUMERO DE COLONIAS	OBSERVACIONES
Coliformes (Agar de Endo)	1	El tiempo de incubación fue de 24 horas a 37°C, por duplicado
Staphylococcus (Agar Voguel Jonson)	13	
Hongos y levaduras (Agar de Dextrosa Sabouraud)	3	
Candida (Agar Biggy)	Incontables	
Salmonella (Agar para Salmonella)	No detectada	

Cuadro 24. Resultados del muestreo en el tiradero a cielo abierto de Tultitlan

LUGAR: TIRADERO A CIELO ABIERTO DE TULTITLAN		
FECHA: 28/04/01		
TIEMPO DE EXPOSICIÓN: 5 MINUTOS		
LUGAR DE EXPOSICIÓN: FRENTE DE TRABAJO # 1		
MICROORGANISMO	NUMERO DE COLONIAS	OBSERVACIONES
Coliformes (Agar de Endo)	No detectada	El tiempo de incubación fue de 24 horas a 37°C por duplicado
Staphylococcus (Agar Voguel Jonson)	24	
Hongos y levaduras (Agar de Dextrosa Sabouraud)	5	
Candida (Agar Biggy)	1	
Salmonella (Agar para Salmonella)	No detectada	

Cuadro 25. Resultados del muestreo en el tiradero a cielo abierto de Tultitlán

LUGAR: TIRADERO A CIELO ABIERTO DE TULTITLÁN		
FECHA: 28/04/01		
TIEMPO DE EXPOSICIÓN: 5 MINUTOS		
LUGAR DE EXPOSICIÓN: LAGUNA DE EVAPORACIÓN		
MICROORGANISMO	NUMERO DE COLONIAS	OBSERVACIONES
Coliformes (Agar de Endo)	3	El tiempo de incubación fue de 24 horas a 37°C por duplicado.
Staphylococcus (Agar Vogel Jonson)	4	
Hongos y levaduras (Agar de Dextrosa Sabouraud)	6	
Candida (Agar Biggy)	1	
Salmonella (Agar para Salmonella)	No detectada	

Es posible observar en los cuadros anteriores que en el tiradero de Tultitlán al tratarse de un sitio sin control alguno, donde los RSM solamente son apilados y compactados y en pocas ocasiones se les da una cubierta con escoria de fundición o con algún otro residuo sólido que pueda estabilizar los taludes, el aire circundante al frente de trabajo está colmatado de microorganismos patógenos, lo cual se demuestra en los resultados de los cuadros 24 y 25, ya que no hay cubierta que contenga estos organismos. En este lugar los vientos predominantes son de norte a sur, pero debido a las condiciones antes mencionadas las zonas aledañas son fuertemente impactadas por los microorganismos, como se muestra en el cuadro 23

En las figuras 14 a 18 se muestra el aspecto de las cajas Petri después de haber incubado cada uno de los microorganismos seleccionados para la elaboración de este trabajo

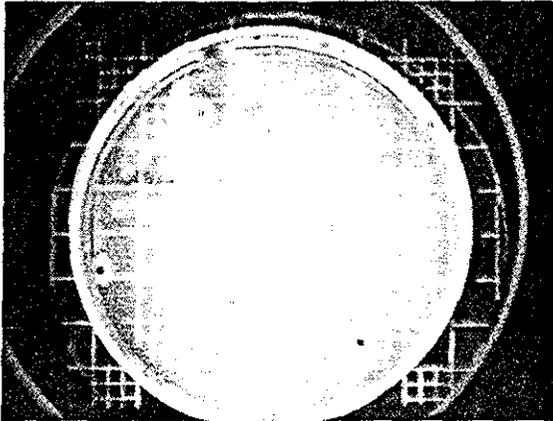


Figura 14. Cultivo de coliformes fecales

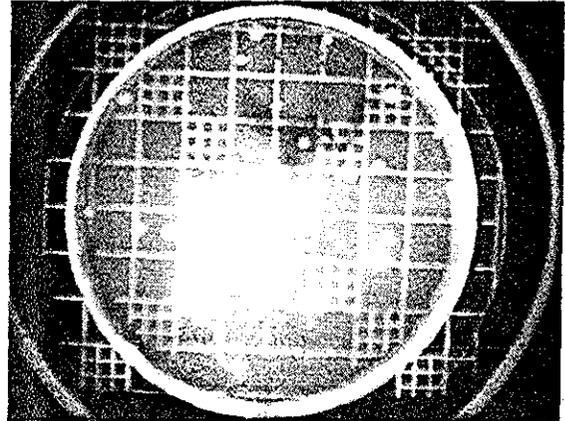


Figura 15. Cultivo de Staphylococcus sp

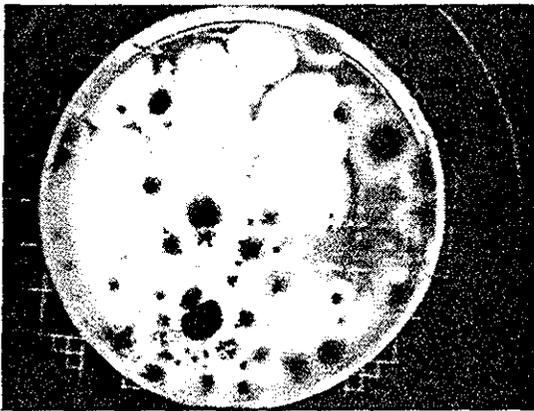


Figura 16. Cultivo de Hongos y Levaduras

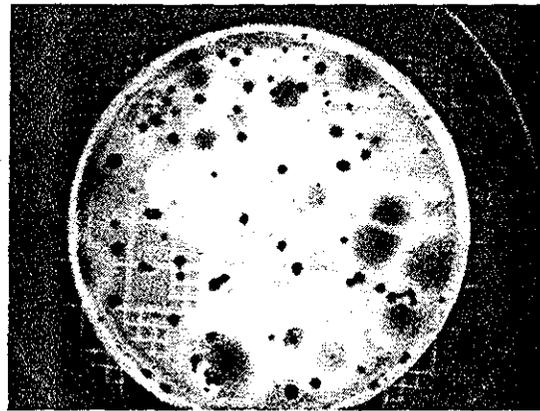


Figura 17. Cultivo de Cándida Albicans.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

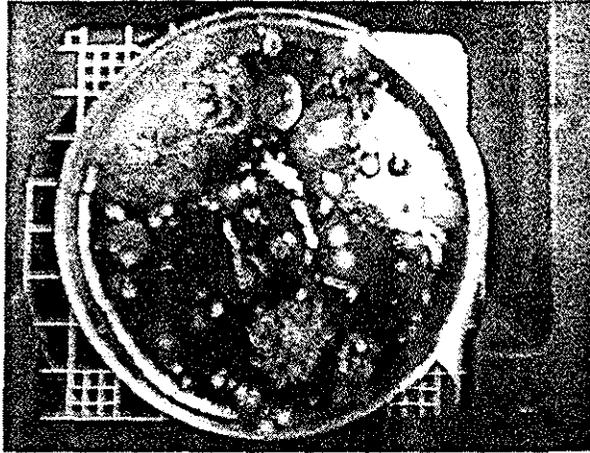


Figura 18 Cultivo de Salmonella

Observando los resultados, en definitiva los tiraderos a cielo abierto representan un grave riesgo para la salud humana ya que al permanecer los RSM un largo periodo de tiempo a la intemperie, se generan polvos en los cuales se transportan los microorganismos patógenos, viajando por las corrientes de aire y propagándose por las zonas aledañas al sitio, provocando que la salud humana se deteriore

Cabe recalcar que se deben realizar chequeos médicos específicos, es decir, encaminados a detectar algunas de las enfermedades más frecuentemente causadas por este tipo de patógenos, ya que por lo general solamente se realizan chequeos de forma general, lo cual puede ocultar enfermedades más recurrentes por la actividad que se desempeña en este tipo de sitios. Este tipo de chequeos debe realizarse a cargo de los organismos operadores de rellenos sanitarios, así como por los municipios encargados de la operación de los tiraderos a cielo abierto, ya que también los choferes de camiones recolectores están expuestos a todo estos organismos y hay que recordar que el descuido de este tipo de acciones preventivas puede generar un foco de infección o el inicio de alguna enfermedad crónica en la región en la que opere el sitio de disposición final.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 6. CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO

La condición principal para poder realizar la clausura de un tiradero a cielo abierto es contar con un sitio alternativo para la disposición de los RSM que se generan diariamente en el municipio, ya que de lo contrario no es posible pensar en una clausura, por esta razón es que muchos municipios en México siguen con una mala disposición de sus RSM, pues no cuentan con otro lugar para dichos fines, aunque también es cierto que muchos casos no existe el interés o los recursos suficientes para realizar esta etapa tan importante

El municipio de Tultitlán actualmente está gestionando la ubicación del nuevo sitio de disposición final, el cual será operado como un relleno sanitario, con todas las obras de ingeniería necesarias para ello; el lugar destinado para el nuevo relleno sanitario se encuentra en la etapa de alternativa, pues existen dos posibles lugares de ubicación del nuevo sitio. La información específica de cada lugar no está disponible, ya que se maneja como un secreto, debido a las posibles protestas sociales o intervención de grupos económicos que pueden darse al saber que cierta área está siendo considerada como alternativa para el nuevo relleno sanitario del municipio.

Estos lugares pueden observarse en la figura 19.

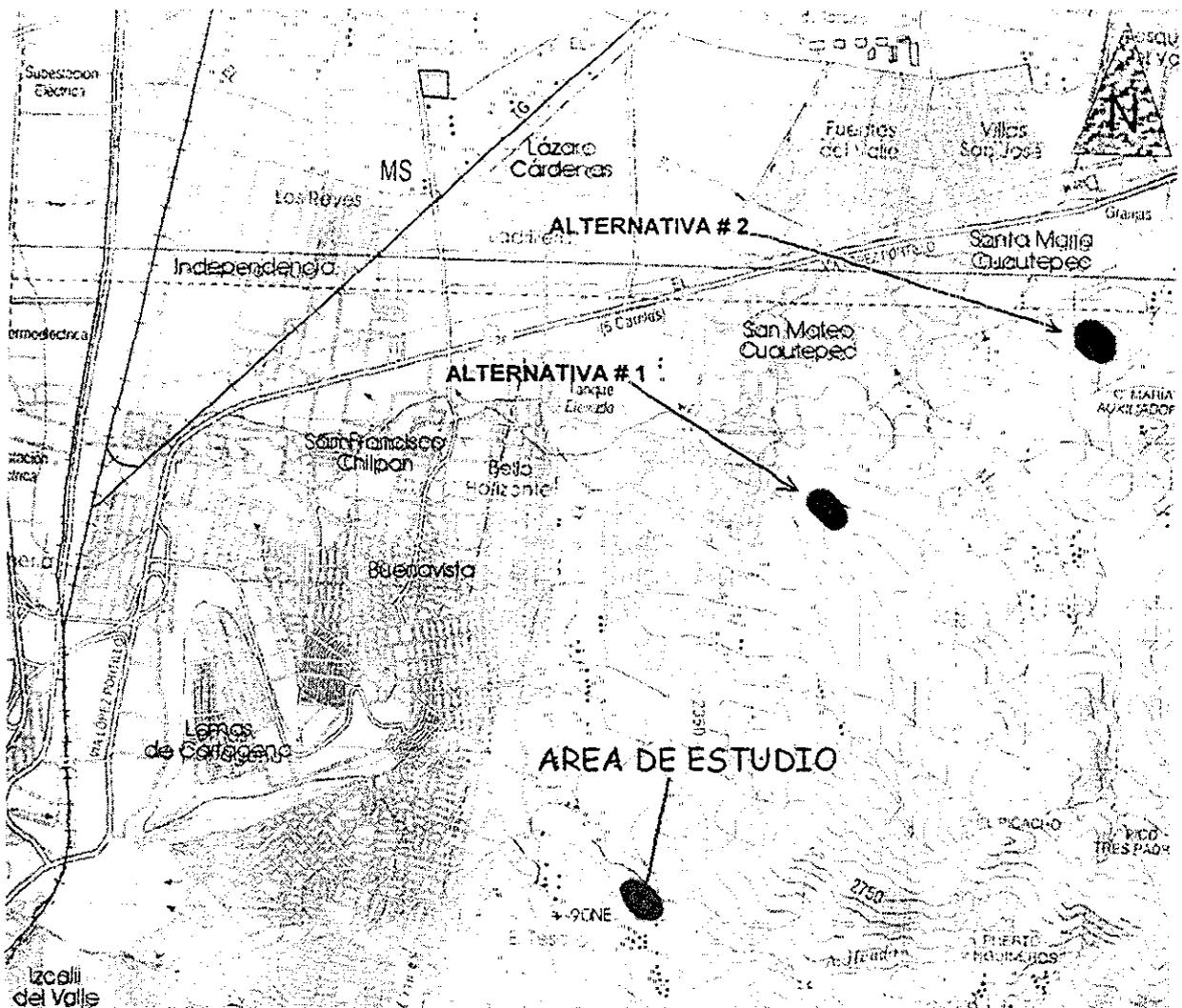


Figura 19. Localización de las alternativas para la construcción del nuevo relleno sanitario del municipio de Tultitlán Estado de México

### 6.1 Reubicación de pepenadores

Debido al tipo de operación que se lleva a cabo en un tiradero a cielo abierto y dadas las condiciones socio – económicas que predominan en la ciudad de México y la zona conurbada, de donde pertenece el municipio de Tultitlán, la separación de los subproductos contenidos en los RSM se ha vuelto a través de los años un modo de vida para un gran número de familias, las cuales sobreviven gracias a la venta de los subproductos que ellos separan en el tiradero, además que se ha generado toda una industria de los residuos en las cercanías del sitio; por esta razón, es que en la mayoría de las ocasiones en las que se pretende clausurar un sitio, organizaciones de pepenadores protestan e incluso pueden llegar a detener o evitar la clausura del tiradero.

La protesta se justifica debido a que se les está cerrando su fuente de empleo y subsistencia, por ello es que este rubro es uno de los más importantes puntos que deben ser analizados por el municipio, ya que debe generar y ofrecer alternativas de empleo y vivienda para estos grupos de pepenadores, ya que de lo contrario, son susceptibles de ser manipulados por diferentes organizaciones que los utilicen con fines políticos, acabando por evitar la realización de una obra tan necesaria para este municipio.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Entre los casos en los que los grupos de pepenadores han sido manipulados por organizaciones políticas se encuentra el del sitio controlado de Santa Catarina, el cual debió cerrarse en 1999, pero debido a que los pepenadores están organizados y guiados por organizaciones políticas, se amenaza con un paro de la recolección en el D.F. en caso de clausurar el sitio, debido a ello el lugar sigue operando aún cuando el sitio está sobrepasado en su capacidad.

Por tanto, esta actividad depende mucho del presupuesto del municipio y las concertaciones que se tengan con los grupos de pepenadores, pero en el plan de cierre de este tiradero se contempla por el municipio la reubicación y el empleo de los pepenadores en diversas actividades del nuevo relleno sanitario.

## **6.2 Preparativos de clausura**

Antes de comenzar la clausura de un tiradero a cielo abierto es necesario realizar una serie de actividades que garanticen la buena ejecución de esta obra y la seguridad del equipo y personal que laboren en ella.

### **6.2.1 Personal**

Se debe asignar el personal necesario para poder garantizar la clausura del sitio, es decir, se requieren trabajadores que resguarden el lugar de quienes quieran disponer sus RSM en el sitio aún cuando estén enterados de su clausura. También este tipo de personal es requerido para resguardar el equipo utilizado en la clausura y evitar cualquier tipo de acto que vaya en contra de la clausura del lugar.

Para ello se propone que se contraten tres veladores, los cuales deben reguardar dicho lugar en tres turnos diferentes a lo largo del día.

### **6.2.2 Señalamientos**

Debe colocarse también el señalamiento correspondiente a la clausura del tiradero, indicando la nueva dirección del relleno sanitario y que el programa de clausura se está llevando a cabo y sobre todo las restricciones de entrada a personal o vehículos no autorizados por la obra. Estos señalamientos también incluyen avisos que prohíban todo tipo de pepena en el tiradero y el acceso a personal ajeno a la obra.

### **6.2.3 Control de accesos**

Esto se realizará con el cercado del tiradero días antes de comenzar las actividades de clausura, contar con accesos controlados por los veladores que reguardarán dichos accesos las 24 horas del día. En dichos accesos deberán colocarse las indicaciones correspondientes acerca del plan de clausura que se lleva a cabo, así como la dirección del nuevo sitio de disposición final, esto con la finalidad de que no se admita RSM frescos en el lugar, ya que de lo contrario se entorpecen las actividades de dicha obra.

### **6.2.4 Limpieza general**

Esta actividad se refiere al retiro de todos los materiales o subproductos que se encuentren almacenados en el sitio; esto deberá ser realizado por los propios pepenadores dueños de dichos materiales. Así mismo deberán retirarse las viviendas de los pepenadores de toda la zona del tiradero y de la que se destine a terreno parte de la clausura.

### 6.3 Eliminación de fauna nociva

Una de las actividades más importantes que deben realizarse al comenzar las actividades de clausura del tiradero es la implementación de un programa intensivo de eliminación de fauna nociva, principalmente de roedores, perros y gatos. Esto es con la finalidad de evitar que estos animales emigren a los vecindarios cercanos al cortarse el suministro de RSM al lugar, ya que estos son la razón de su estancia allí y en el lugar donde se encuentran sus madrigueras

Debe tomarse en cuenta que esta actividad es determinante para la aceptación de la obra, ya que de no realizarse se crearía un problema más grave que el que se piensa remediar, pues la fauna nociva como los perros, los gatos y sobretodo las ratas podrían representar una plaga en los vecindarios aledaños al sitio de la clausura cuya afectación a la salud humana es muy grave.

### 6.4 Sistema de control de lixiviados

Como se describió en el punto 5.4, es muy probable que los mantos acuíferos subyacentes al sitio de estudio aún no entren en contacto con los lixiviados, pero de seguir la infiltración de los lixiviados, los mantos serán alcanzados en 13.6 años. Por ello es necesario detener la generación de lixiviados y evitar con ello la contaminación de los acuíferos.

Debido a la naturaleza del sitio, es decir, como se trata de un tiradero a cielo abierto que se formó sin planeación alguna, carece de todos los sistemas de captación y conducción de biogás y sobre todo de lixiviados, por lo que los lixiviados fluyen hacia la superficie y el subsuelo sin control. En la figura 20 se muestra que de forma natural los lixiviados afloran por la parte más baja del predio, donde al paso de los años se han acumulado y actualmente se utiliza como laguna de evaporación



Figura 20 Afloramiento natural de lixiviados del tiradero a cielo abierto de Tultitlán Estado de México

La laguna formada en este sitio, no puede cumplir la función de evaporar los lixiviados, ya que se encuentra en gran parte cubierta por residuos que no permiten dicha evaporación, además de encontrarse casi azolvada por RSM que caen de las partes más altas de los taludes del tiradero. También se ha observado que en épocas de lluvia la laguna no puede contener el total de estos lixiviados y parte de ese volumen escurre por el cauce natural que se encuentra al noreste del sitio, dicho flujo sigue el cauce pasando por las zonas habitadas adyacentes a dicho cauce y perdiéndose por infiltración.

Es claro que para el control de este subproducto se requiere detener su formación, esto se logrará con la cubierta final del lugar, pero ya que existe la posibilidad de que se infiltre agua de lluvia por algunas fracturas en la cubierta, por la infiltración natural del agua a los RSM o por la generación de líquido debido a la degradación de los residuos a través del tiempo, es necesario colocar un sistema que capte dichos lixiviados y los conduzca a una laguna de evaporación, este método de disposición final se seguirá utilizando en tanto no existan metodologías más avanzadas y económicas de disposición.

Para la evacuación de los lixiviados en este tipo de casos se cuenta con muy poca información, ya que en la mayoría de los casos no se realizan obras para ello, pues se piensa que la generación se detendrá totalmente con la capa de cubierta, lo cual es parcialmente cierto, sobretodo si se utiliza una capa sintética, pero si esta capa llega a romperse permitirá el paso del agua al interior de los RSM; en el caso de utilizar material natural de baja permeabilidad, la infiltración de agua tardará aproximadamente 2 años en llegar a los residuos, este resultado se obtiene utilizando la misma ecuación aplicada en el punto 5.4 para un material de cubierta de 1 m de espesor y un coeficiente  $k=173 \times 10^{-8}$  m/seg.

Cabe señalar que no existe algún dispositivo de evacuación de lixiviados en los tiraderos ya clausurados en el Distrito Federal y de los clausurados en el interior de la república no se tiene información alguna, solamente en la clausura de Prados de la Montaña donde se construyeron pozos para su evacuación, lo cual se debió a las características tan singulares del sitio, pues el socavón en el que se construyó dicho sitio de disposición es cóncavo y es posible la acumulación de lixiviados (López y Sámano, 1996).

En cambio, en Tultitlán el tiradero está construido en las faldas de la sierra de Guadalupe, por lo que su pendiente natural va del 15% al 20% y los lixiviados escurren o se infiltran pero no se acumulan, debido a ello la construcción de pozos verticales resultaría inútil.

Por estas razones y para facilitar la salida de los lixiviados se propone la construcción de uno o dos pozos horizontales en la base del montículo de residuos (esto depende del presupuesto existente), dichos pozos seguirán la superficie del terreno natural y serán hechos de tubos de acero de 24" de diámetro, el cual estará perforado al tres bolillo con perforaciones de 1 centímetro de diámetro, dicho tubo estará recubierto por pintura anticorrosiva en sus dos caras y estará lleno de material granular de 1cm de diámetro que permitirán el paso del líquido y por diferencia de presión los lixiviados podrán salir por el tubo. La U.S. EPA dicta un tubo de 30 cm para tubos de captación de lixiviados, pero un diámetro menor sería muy difícil hincarlo. Este sistema conducirá el líquido a la laguna de evaporación, dicho funcionamiento asemejará el funcionamiento de los drenes en los muros de contención utilizados comúnmente en la construcción de carreteras y demás obras de ingeniería civil.

Para aquellos lixiviados que no puedan ser captados por los pozos, estos escurrirán utilizando las pendientes naturales del lugar hasta aflorar en las partes bajas del tiradero; en este lugar es factible construir drenes de piedra que permitan la evacuación del líquido y sea conducido hasta llegar a la laguna de evaporación; la cual será construida en la parte baja del predio con la finalidad de que los lixiviados escurran por gravedad. Los detalles de dichos pozos se encuentran en los planos L-1 y L-2 correspondientes al control de lixiviados. Se ha elegido este tipo de sistema para evacuar los lixiviados, por que es una de las formas económicamente más factibles, además, si se toma en cuenta que la parte superior de los RSM se sellará con una capa de baja permeabilidad, entonces el escurrimiento decrecerá con el tiempo, hasta que teóricamente deje de escurrir o sea muy pequeño, por ello la construcción de más pozos o la utilización de otra alternativa es poco viable.

En caso de no existir presupuesto suficiente para este tipo de obra, es factible dejar escurrir los lixiviados como hasta ahora lo han venido haciendo, y construir el dren de piedra en la parte en la que afloran actualmente los lixiviados, para que puedan ser evacuados rápidamente del interior del tiradero. Esta alternativa solucionará el problema en parte pero la cantidad de lixiviados que seguirán percolando a los mantos acuíferos será mayor.

La laguna de evaporación se ubicará en el mismo lugar donde se encuentra actualmente la laguna de lixiviados, para el cálculo de las dimensiones se tiene:

Generación anual de lixiviados = 16,450 m<sup>3</sup>/año  
 Evaporación potencial = 578 mm/año  
 Superficie propuesta = 6500 m<sup>2</sup>  
 Volumen evaporado = 3,757 m<sup>3</sup>  
 Volumen almacenado = 16,450 – 3757 = 12,693 m<sup>3</sup>  
 Profundidad de Laguna = 12,693 / 6500 = 1.95 m

Cabe señalar que la evaporación depende en gran parte de la velocidad del viento y de la diferencia entre las presiones del líquido y del aire, por lo que estos cálculos de evaporación son muy conservadores, por lo que se prevé que se tendrá una evaporación mayor a la calculada. También es oportuno hacer notar que debido al sello de los RSM los lixiviados se generarán de manera temporal, por lo que gran parte de la laguna podrá clausurarse años más tarde.

Los detalles de la laguna de evaporación se observan en el plano L-3.

### 6.5 Cubierta final y sistema de control de biogás

La cubierta es la parte fundamental de la clausura de un tiradero a cielo abierto, por que es esta la que impedirá la continua formación de lixiviados y reducirá consecuentemente por falta de humedad la producción de biogás. Por esta razón, se contempla el diseño de la cubierta final y del sistema de control de biogás en el mismo subcapítulo.

Es importante señalar que en México se han hecho muy pocas clausuras de sitios de disposición de RSM tales como Santa Cruz Meyehualco y "Prados de la Montaña", lugares que comenzaron a operar como tiraderos a cielo abierto y que después se adecuaron como sitios controlados, por lo que su clausura se diseñó como si se tratara de rellenos sanitarios, el caso de Prados de la Montaña fue el más relevante debido a que se clausuró con la normatividad que la U.S. EPA señala (DGSU, 1986 y López y Sámano, 1996). También cabe apuntar que debido al gran impulso económico que recibió la zona aledaña a Prados de la Montaña, la clausura tuvo que llevarse a cabo bajo altas especificaciones de calidad. Por esta razón, este caso especial de clausura no puede tomarse como guía para la clausura de tiraderos a cielo abierto o sitios controlados del resto del país.

Por ello, para el diseño de la cubierta final de este sitio se tomará parte de las especificaciones que dicta la U.S. EPA y de los procedimientos utilizados por GTZ, haciendo adecuaciones para las condiciones del municipio en cuestión, tomando en cuenta que el presupuesto de este municipio así como el de la mayoría del país no pueden financiar una clausura parecida a la mencionada con anterioridad.

#### 6.5.1 Estabilización de taludes

La estabilización de taludes se realizará utilizando en parte, los mismos RSM dispuestos en el sitio formando taludes con pendientes de 3 H : 1V utilizando equipo pesado, como Retro-excavadoras y Bulldozers. Esta estabilización es necesaria para evitar deslizamiento de los RSM por el exceso de fuerzas horizontales en los actuales taludes.

El diseño de los taludes se observa en los planos K1 y K-2.

### 6.5.2 Capa de venteo de biogás

Al igual que para el sistema de control de lixiviados, el sitio de estudio tiene la problemática de que no se construyeron pozos de venteo de biogás durante su operación, por lo que el biogás se encuentra migrando de forma lateral y vertical, constituyendo un peligro para todas aquellas personas que operan dentro del sitio y para aquellas personas que viven en las zonas aledañas, además de constituir un punto de emanación de gases invernadero

La solución óptima para este problema es la perforación de 12 pozos de venteo de biogás, es decir 2 por hectárea (NOM-084-ECOL), los cuales estarán distribuidos en toda el área del tiradero y estarán interconectados por una red de tubería horizontal colocada en una capa de venteo de biogás en la cubierta final. Cabe señalar que para la construcción de pozos de venteo es posible encontrar los siguientes problemas, desde el punto de vista constructivo

- Si los pozos son construidos por medio de equipo de percusión, es decir, hincando un tubo por medio de fuerzas verticales puede aumentar la densidad de los RSM alrededor de dicho tubo, formando una pared de poca permeabilidad impidiendo el paso de biogás
- Si los pozos son construidos con equipo rotatorio, se corre el riesgo de que el motor del equipo colapse, debido a la fricción y naturaleza de los RSM, ya que puede toparse con zonas con metales, llantas o escoria de fundición
- La perforación requiere de la adición de grandes cantidades de aditivos lubricantes, ya que el riesgo de una explosión es inminente en este sitio.

Tomando en cuenta que las emanaciones de biogás se encuentran distribuidas en toda la superficie del tiradero, se optó por construir una capa de venteo, es decir, una capa de material granular de ¾" de diámetro, este material puede ser tezontle o grava. Para ello se extenderá una capa de 15 cm de material y sobre ella se colocará una red de tubos de Polietileno de Alta Densidad (PAD) de 4" de diámetro @ 50 metros, con perforaciones de 1 cm de diámetro al tresbolillo @ 20 cm, los cuales interconectarán los pozos verticales; obteniendo los pozos de venteo que dicta la normatividad (NOM-084-ECOL); después de este tendido se colocarán los restantes 15 cm de material granular, enterrando la red de colección. Los detalles de este sistema de control de biogás se encuentran en el plano G-1 y G-2.

### 6.5.3 Capa de baja permeabilidad

Esta capa tiene la finalidad de sellar los RSM confinados, evitando que ingrese agua a los residuos y que salga el biogás, por ello es que las especificaciones de esta capa son las más importantes, ya que de su baja permeabilidad y de su buena construcción depende el buen funcionamiento de los sistemas de control de lixiviados, de biogás; también protege la estabilidad de los taludes y evita la proliferación de vectores. Como es posible observar, esta es la capa que define el éxito o fracaso de la clausura de un sitio como este.

La capa debe tener un espesor de 60 cm y estará conformado por un material natural o combinado que tenga una conductividad hidráulica igual o menor que  $1 \times 10^{-5}$  cm/seg. Esta característica tan importante puede encontrarse en las áreas aledañas al sitio de estudio, ya que los trabajos de geotécnica así lo demuestran (González, 2000)

La configuración de la capa de baja permeabilidad se puede apreciar en el plano F-1

#### 6.5.4 Capa de drenaje

Esta capa sirve como drenaje para el agua que se infiltre de las capas superiores, la conductividad hidráulica que puede tener esta capa es de  $1 \times 10^{-2}$  cm/seg a  $1 \times 10^{-3}$  cm/seg, también pueden utilizarse conductividades hidráulicas mayores, ya que la finalidad es desalojar de manera rápida el agua infiltrada de las capas superiores y evitar el daño o la infiltración del agua a la capa de baja permeabilidad. Los materiales típicos que cumplen con estas especificaciones son gravas de 3/8" de diámetro; el espesor de esta capa según lo dicta la U.S. EPA debe ser de 30 cm, pero tomando en cuenta que un espesor como ese representa grandes costos por movimiento de materiales, es posible reducir el espesor a 10 cm, ya que se considera innecesario un espesor tan alto.

Los detalles de dicha capa se pueden observar en el plano F-2.

#### 6.5.5 Capa de control de erosión

Esta capa tiene la función de soportar una capa vegetativa y con ello proteger de la erosión a la capa inmediata inferior de baja permeabilidad, que como ya se ha mencionado con anterioridad es una de las capas más importantes de la clausura del sitio.

La erosión es una de las causas principales de daño a la capa de baja permeabilidad, ya que socava la capa, creando grietas por las cuales comienza a entrar el agua y deja expuestos los RSM a la intemperie, por lo que la capa de protección es de suma importancia, además de su cubierta de vegetación, la cual ayudará a evitar dicha erosión. Así mismo, cabe resaltar que la responsabilidad de la empresa que se encargue de la clausura del sitio, debe encargarse del mantenimiento de su cubierta, principalmente en la de baja permeabilidad, es decir, de darle mantenimiento a la clausura de dicho lugar.

El material que se utilizará para la construcción de esta capa será una mezcla de limos y arcillas orgánicas que pueda sostener una capa vegetativa superficial, es decir con plantas de raíz superficial y resistente a condiciones de poco mantenimiento.

El espesor de esta cubierta es un parámetro muy importante, el cual se calcula por medio de la ecuación universal de pérdida de suelo (<sup>2</sup>U.S. EPA, 1989), donde se dicta una pérdida no mayor de 4.9 toneladas/hectárea – año (U.S. EPA, 1994), por lo que se recomienda como espesor mínimo el de 15 cm. Pero dado que en nuestro país no existen los recursos suficientes ni el interés suficiente para dar el debido mantenimiento a este tipo de obras, se recomienda que la cubierta tenga un espesor de 60 cm, con lo cual se garantiza la integridad de la capa por 2,000 años, dato obtenido del siguiente cálculo:

$$\begin{aligned}
 & \text{Pérdida de suelo} = 4.9 \text{ ton/ha} - \text{año} \\
 & \text{Superficie del sitio} = 6 \text{ Has} \\
 & \text{Espesor} = 0.6 \text{ m} \\
 & W_{\text{suelo}} = 1.75 \text{ ton/m}^3 \\
 & \text{Volumen} = 60,000 \times 0.6 = 36,000 \text{ m}^3 \\
 & \text{Peso} = 36,000 \times 1.75 = 63,000 \text{ ton} \\
 & \text{Total perdido por año} = 4.9 \times 6 = 29.4 \text{ ton} \\
 & \text{Años para erosionar todo el material} = 63,000/29.4 = 2,000 \text{ años}
 \end{aligned}$$

Es posible pensar que este lapso de tiempo es excesivo, pero se debe tomar en cuenta que la capa vegetal requiere de un espesor así, ya que las plantas y raíces requieren cierta profundidad mínima para favorecer su desarrollo.

Como medida de protección contra la erosión que pudiera causar el agua de lluvia se construirá un sistema de drenaje pluvial que pueda permitir el desalojo de las aguas pluviales, evitando su acumulación dentro de la zona de clausura, así como su escurrimiento por lugares donde pueda provocar una erosión indeseada. Dicho sistema consistirá en una red de cunetas que captarán el agua.

proveniente de la sierra de Guadalupe, conduciéndolas hasta la alcantarilla que se conecta al sistema de drenaje local. Los detalles de dicho sistema se encuentran en el plano Q-1.

## 6.6 Diseño paisajístico

Al efectuar el saneamiento del sitio se logra un área con aspecto muy diferente al entorno inicial, la cual de no recibir atención puede convertirse en un lugar muerto, sin vida ni vegetación, con problemas graves de erosión y una utilización pobre o deficiente por parte de los habitantes de las zonas aledañas. Además, en conjunto con los esfuerzos que se llevan a cabo para la reforestación y recuperación de la sierra de Guadalupe, es necesario elaborar un plan para que el lugar sea un sitio amable al uso, ya sea para fines recreativos o sólo de reforestación.

Debido a que la capa vegetal de 60 cm de espesor no es suficiente para sostener la vida de árboles como los Eucaliptos, que son los que predominan en la zona y que el área no es apropiada para el uso habitacional, se recomienda utilizar dicha área como recreativa, con la finalidad de que pueda dar un servicio a la comunidad como espacio recreativo tan necesario en esta zona.

Dado que el diseño paisajístico que se requiere para este tipo de obra es de restauración, es decir, devolver al sitio sus características naturales o de forma que armonice con el entorno, pero tomando en cuenta que es muy conveniente cambiar el uso de suelo al de una zona recreativa, con la finalidad de dar servicio a la comunidad además de con esto evitar que el actual sitio una vez restaurado sea invadido por asentamientos humanos irregulares.

Por tanto, el programa arquitectónico paisajístico y las políticas se muestran en el cuadro 25, en la cual se determinan las soluciones a la problemática y de qué manera se integran al proyecto, definiendo con ello los espacios, áreas y mobiliario.

### 6.6.1 Concepto

El concepto que se maneja en este estudio de restauración de un área tiene por objetivo proporcionar un espacio a las personas de todas las edades para que puedan recrearse y descansar. La mayoría de los parques son inspirados en niños y jóvenes, ya que forman la mayoría de los usuarios de este tipo de lugares; pero sin descartar a las demás personas.

Por tanto se deben definir espacios de juegos infantiles que provoquen en los niños una identificación de sus gustos con el parque mismo; así mismo, son necesarias las áreas de esparcimiento para adolescentes que gusten del recreo en áreas sin obstáculos y de la práctica de deportes como el fútbol rápido y el básquetbol, además de zonas de descanso y de estar, zonas arboladas y empastadas que inviten a la convivencia familiar (Campos, 1997).

También dentro de la conceptualización de un parque integral, se encuentran las áreas para hacer deporte como ciclistas y pistas para trotar; y además espacios que fomenten la difusión de la cultura, con áreas especiales para exposiciones escolares y artísticas.

El programa arquitectónico de paisaje que se ha estructurado para este trabajo se encuentra resumido en el cuadro 26, donde se definen las diferentes problemáticas y de qué manera se integran al diseño por sus soluciones conceptuales y de diseño.

Cuadro 26. Listado de requerimientos, soluciones conceptuales y de diseño

REQUERIMIENTOS	SOLUCIÓN CONCEPTUAL	SOLUCIÓN DE DISEÑO
Zonas sombreadas	Proporcionar áreas sombreadas con elementos naturales y artificiales que complementen y enriquezcan el espacio por medio del contraste	Se manejarán estructuras escultóricas y arbolado que den un carácter sano al parque
Plazas	El manejo de las plazas con base en las formas y elementos representativos que orienten y fomenten el descanso	Se propone una plaza de acceso peatonal y una multiusos
Andadores	Manejo de andadores que orienten y dirijan por medio del manejo de las formas, causando un sentido de expectación e interés	Andadores y caminos serpenteantes rampas ciclopista y pista de trote
Juegos infantiles	Crear espacios de recreación dinámica que estimulen los sentidos y la imaginación por medio de las formas y materiales	Zona de juegos de aventura juegos infantiles de estructuras, laberintos, montículos y pista de patinaje
Canchas deportivas	Colocar canchas que satisfagan la necesidad de espacios para esparcimiento activo dentro de un espacio libre de obstáculos	Canchas de fútbol rápido y básquetbol
Zona cultural	Crear espacios dinámicos que inciten el recorrido y satisfagan la necesidad de zonas para exposiciones y actividades que requieran de este tipo de áreas	Zona de exposiciones formal e informal

Fuente: Campos, 1997

### 6.6.2 Vegetación

Una de las grandes restricciones del diseño paisajístico en este tipo de proyectos es el uso libre de la vegetación, ya que por necesidad de plantas con raíces superficiales para protección de la capa de baja permeabilidad la selección de vegetación se ve restringida. En el proyecto se propone el empleo de tres especies de árboles: dos especies de acacias (*Acacia mearnsii*, *Acacia retinodes*) resistentes a problemas de contaminación y de raíces superficiales, y trueno (*Ligustrum lucidum*) que tiene similares características a las acacias

El empleo de vegetación arbustiva se reduce a pocas especies, entre ellas, Lantana (*Lantana camara*) e hipericum (*Hypericum calycinum*), utilizándose para delimitar espacios, y dirigir visuales. Se propone césped (*Cynodon dactylon*) y cortina (*Mesembryanthemum spectabilis*) como cubresuelos para cubrir taludes, montículos y zonas de suave pendiente (Campos, 1997).

La cortina de arbustos funciona como barrera de las pendientes pronunciadas, evitando que las personas accedan por esas partes. Otra de las finalidades del uso de la vegetación es crear un microclima que ofrezca mayor confort a los usuarios, esto es posible colocando núcleos de árboles a lo largo de los andadores que ofrezcan mayor frescura al ambiente, contrarrestando los rayos solares, además de funcionar como barreras, para desviar los vientos dominantes del norte. En el cuadro 27 se muestra la paleta vegetal que se utilizará en este proyecto

Cuadro 27. Nombres y características de las plantas a utilizar en la clausura del tiradero a cielo abierto del municipio de Tullitlan, Estado de México.

Nombre científico	Nombre común	Familia	Dimensiones	Forma de vida	Tipo de raíz	Tipo de suelo	Tipo de follaje	Riego	Mantenimiento	Crecimiento	Resistencia a la contaminación
<i>Laurus nobilis</i>	Laurel	Lauraceas	H=8-10 m F=5-6 m	Arbol	Profunda	Tolerante a cualquier tipo	Perenne	Regular	Bajo	Moderado	Regular
<i>Ligustrum lucidus</i>	Trueno	Oleaceas	H=8-10 m F=6-8 m	Arbol	Superficial	Tolerante a cualquier tipo	Perenne	Escaso	Bajo	Moderado	Regular
<i>Alnus oblongifolia</i>	Alamillo	Betulaceas	H=8-10 m F=6-8 m	Arbol	Superficial	Tolerante a cualquier tipo	Perenne	Escaso	Bajo	Rápido	Regular
<i>Acacia mearnsii</i>	Acacia	Leguminosas	H=4-6 m F=4-6 m	Arbol	Superficial	Tolerante a cualquier tipo	Perenne	Escaso	Bajo	Moderado	Regular
<i>Acacia retinoides</i>	Acacia	Leguminosas	H=4-6 m F=4-6 m	Arbol	Superficial	Tolerante a cualquier tipo	Perenne	Escaso	Bajo	Rápido	Regular
<i>Cestrum nocturnum</i>	Huele de noche	Solanacea	H=2-3 m F=1-2 m	Arbusto	Profunda	Tolerante a cualquier tipo	Perenne	Regular	Bajo	Moderado	Regular
<i>Hypericum calycinum</i>	Hipericun	Hipericacea	H=0.8-1.5 m F=0.5-1.5 m	Arbusto	Superficial	Tolerante a cualquier tipo	Perenne	Regular	Bajo	Moderado	Regular
<i>Boxus microphylla japonica</i>	Boj	Buxaceas	H=1-2.5 m F=0.6-1.5 m	Arbusto	Profunda	Tolerante a cualquier tipo	Perenne	Regular	Bajo	Moderado	Regular
<i>Lantana camara</i>	Lantana	Verbenaceas	H=0.8-1 m F=0.8-1 m	Herbacea Profunda	Profunda	Tolerante a cualquier tipo	Perenne	Regular	Bajo	Moderado	Regular
<i>Cosmos bipinnatus</i>	Cosmos	Compuestas	H=0.3-0.8 m F=0.5-1 m	Herbacea	Profunda	Tolerante a cualquier tipo	Perenne	Escaso	Bajo	Rápido	Regular
<i>Mesembryant henum spectabilis</i>	Cortina	Aizoaceas	H=0.5-0.8 m F=0.2-0.3 m	Rastrera	Pivotante	Tolerante a cualquier tipo	Perenne	Regular	Bajo	Rápido	Regular
<i>Cynodon dactylon</i>	Pasto bermuda	Gramineas		Cubre piso	Pivotante	Tolerante a cualquier tipo	Perenne	Regular	Poda	Rápido	Regular

Los detalles del diseño pueden observarse en el plano A-1.

## 6.7 Control de la post - clausura

La responsabilidad de los operadores del sitio o la empresa ganadora de la licitación deberá hacerse cargo del control del sitio en la Post – clausura por un periodo de 30 años después de la clausura de dicho lugar (U.S. EPA, 1993). Los lineamientos que deben tenerse en cuenta para la post – clausura son los siguientes:

- Mantenimiento de la integridad de la cubierta final y de la capa de control de la erosión, incluyendo las reparaciones pertinentes debidas a asentamientos diferenciales o fracturas, así como prevenir la erosión por el escurrimiento superficial
- Mantenimiento del sistema de control de lixiviados y en el caso en el que al paso de los años el lixiviado no represente un peligro para el ambiente o a salud humana, deberá demostrarse a las autoridades correspondientes
- Monitoreo de las aguas subterráneas en los pozos de suministro de aguas abajo del sitio, corroborando la ausencia de contaminación por lixiviados en las aguas subterráneas
- Mantenimiento del sistema de control de biogás, incluyendo las reparaciones pertinentes por daño a las conducciones debidas a los asentamientos del terreno.

El periodo de mantenimiento y control de la post – clausura puede extenderse o acortarse, dependiendo del peligro que represente a la salud humana y el ambiente, por lo que para cualquiera de los dos casos anteriores se deben realizar los estudios certificados que sean pertinentes

## 7. DETERMINACIÓN DE COSTOS

Con el fin de obtener un costo unitario por la clausura del tiradero a cielo abierto, se realiza un presupuesto el cual se basa en el catálogo de conceptos de la Comisión Nacional del Agua en su versión 2000. Dicho presupuesto se realiza a nivel anteproyecto, por lo que el monto es aproximado. Cabe señalar que este catálogo maneja cuatro zonas las cuales se dividen por nivel económico, la primera corresponde a zonas cuyo nivel socioeconómico es muy bajo, la segunda es una zona intermedia, la tercera corresponde a las zonas de grandes ciudades y la cuarta a zonas en donde el trabajo requiere una ejecución delicada. Por lo tanto para el cálculo de los montos se toma en cuenta la zona tres ya que corresponde a una ciudad dotada de la mayoría de servicios y con un nivel socioeconómico promedio superior al del resto del país.

Debido a que el área de los residuos sólidos es una de las más nuevas dentro de la ingeniería mexicana, es que no existen catálogos de actividades referentes a la disposición final de RSM y mucho menos a la clausura de tiraderos a cielo abierto, por lo que ha sido necesario utilizar los conceptos existentes en el catálogo de la CNA para poder realizar un presupuesto de todas las actividades que se realizarán para la clausura del tiradero a cielo abierto. Es necesario conocer todas las actividades que se deben realizar de principio a fin en la clausura, para que de esta forma sean elegidos los conceptos que se adecuen a las actividades ya establecidas en el programa de trabajo, así mismo debe estar muy claro cual será el aspecto final de la clausura, ya que de ello dependen una serie de actividades que deben colocarse en el presupuesto.

En este caso, las principales actividades de clausura son: eliminación de fauna nociva, estabilización y formación de taludes sobre los RSM, tendido de una capa de venteo de biogás, perforación de pozos de venteo y evacuación de lixiviados, tendido y colocación de una red de venteo de biogás, tendido y compactación de una capa de baja permeabilidad, tendido de una capa de drenaje, tendido de una capa de suelo vegetal, construcción de drenes para la evacuación de lixiviados y construcción de un parque recreativo. Cabe señalar que las anteriores actividades se componen a su vez de otras

actividades que deben ser tomadas en cuenta para el presupuesto, éstas últimas junto con las principales actividades se describen a continuación

- a) *Eliminación de fauna nociva.* Este concepto se toma como lote ya que se recomienda contratar a exterminadores especializados, sobre todo por que esta actividad se relaciona con el manejo de sustancias peligrosas
- b) *Excavación en corte para construcción de caminos.* Este concepto se refiere a todo el movimiento de materiales que se debe realizar para conformar los taludes 1:3 que requiere el proyecto, el concepto comienza por un trazo de proyecto, después por el corte y terraplén de los residuos para la formación de taludes y por último se refiere al tendido de material para la formación de la capa de baja permeabilidad compactada al 90 % proctor
- c) *Terraplenes y revestimientos y tendido de material* Este concepto se refiere a la formación de aquellas capas que no requiere una compactación específica, como las de venteo, drenaje y de suelo vegetal, ya que se puede considerar como un tendido de material
- d) *Instalación de tubería de PAD.* Este concepto se refiere a la instalación de la red de captación de biogás en la capa de venteo
- e) *Desmante, desenraice, desyerbe y limpia de terreno con propósitos de construcción.* Se refiere a limpiar aquellas zonas que no pertenecen al tiradero, pero que serán utilizadas para la construcción del parque y de la laguna de evaporación; debido a las condiciones del lugar se considera una zona semiárida
- f) *Construcción.* Se refiere a la construcción de los andadores, ciclistas y demás áreas de pavimento utilizadas en el parque recreativo
- g) *Excavación a mano para desplante.* Se refiere a las zanjas de cimentación que se requieren para desplantar las construcciones como casetas de vigilancia y baños públicos.
- h) *Excavación para cunetas y contracunetas* Se refiere a los preparativos en el suelo para la construcción de las cunetas que conducirán el agua pluvial fuera del área del parque
- i) *Plantilla apisonada al 85% proctor en zanjas.* Es la plantilla requerida para desplantar la cimentación
- j) *Relleno en zanjas.* Este relleno se realiza después de construidas las cimentaciones, hasta dejar relleno y apisonada dicha área.
- k) *Mampostería de piedra* Se refiere a la construcción de las cimentaciones que serán de mampostería junteada con mortero cemento arena 1:5
- l) *Muros de tabique rojo.* Se refiere a la construcción de los muros de la caseta de control y baños público, que llevarán una cara aparente.
- m) *Fabricación de concreto vibrado  $f'c=100 \text{ kg/cm}^2$*  Se refiere a la construcción de azoteas de los baños públicos y caseta de vigilancia
- n) *Fabricación y lanzado de concreto en paredes, pisos.* Se refiere a la construcción de una preparación de un relleno apisonado de tepetate o tezontle para que sobre él se construyan los pisos de los baños públicos y de la caseta de vigilancia.
- o) *Pisos, lambrines y zoclos.* Se refiere a los pisos de los baños y la caseta de vigilancia, los cuales para mayor higiene y facilidad de su aseo serán de un azulejo de alta resistencia

- p) *Postes y alambrados* Se refiere a la colocación de una malla perimetral en todo el parque para evitar la invasión del predio, esta cerca será de malla ciclónica con tres hilos de alambre de puas en su parte superior. La laguna de evaporación de lixiviados también contará con una cerca interna para evitar accidentes.
- q) *Acabado de azoteas* Se refiere a la impermeabilización integral que recibirán dichas azoteas, para evitar su deterioro.
- r) *Suministro e instalación de bajadas de agua.* Se refiere a la instalación hidráulica de la caseta de vigilancia y de los baños públicos.
- s) *Registros de albañal.* Se refiere a la construcción de una pequeña red de drenaje sanitario para desalojar las aguas servidas provenientes de los baños públicos y de la caseta de vigilancia.
- t) *Instalación de muebles sanitarios.* Es la colocación y suministro de los muebles sanitarios para los baños públicos y de la caseta de vigilancia.
- u) *Salida para centro de luz o contacto.* Se refiere a la instalación eléctrica de las instalaciones principales, ya que el parque no estará dotado por un sistema de iluminación.
- v) *Suministro e instalación de puertas.* Las puertas se colocarán en los baños públicos, en la caseta de vigilancia y en la entrada principal del parque.
- w) *Suministro e instalación de ventanas.* Este concepto incluye el suministro de vidrios, vinil y estructura metálica.
- x) *Suministro y colocación de pintura.* Esta pintura se colocará a los elementos metálicos del parque.
- y) *Construcción de pozos verticales para venteo de biogás.* Este concepto se refiere a la perforación de 12 pozos verticales de diferentes profundidades, con un tubo de PVC de 30 centímetros de diámetro, con perforaciones de  $\frac{3}{4}$  de centímetro @ 20 centímetros en toda la superficie de dicho tubo; dicho tubo estará ademado con material granular de 1 centímetro de diámetro. Dicho ademe servirá de filtro y evitará obturaciones de los orificios por residuos, permitiendo el paso del biogás y lixiviados.
- z) *Construcción de dren de piedra para evacuación de lixiviados.* Este concepto se refiere a la formación de una estructura hecha de piedra junteada en seco, capaz de permitir el paso de lixiviados y evitar el de los residuos, esta estructura conducirá dichos líquidos a la laguna de evaporación.
- aa) *Pozo horizontal para control de lixiviados.* Este concepto incluye el suministro de la tubería de acero al carbón de 24" de diámetro con costura longitudinal y de  $\frac{1}{2}$ " de espesor, perforaciones en tresbolillo de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro a cada 20 cm en ambos sentidos. Limpieza de la tubería a base de carda metálica, aplicada con pulidora para el retiro del óxido. Protección anticorrosiva a base de una mano de pintura alquidámica y una mano de pintura epóxica. Biselado y soldadura de los tubos con soldadura e-70. construcción de plataforma de hincado, así como su nivelación y alineamiento. Hincado de la tubería de acero mediante martillo neumático de 1500 ton de capacidad. Limpieza interior de la tubería mediante agua a alta presión (hidroblast). Relleno interior de la tubería con granzón de 3/8" para formar filtro.

El organigrama que representa la secuencia de actividades para la clausura de tiraderos a cielo abierto puede apreciarse en el plano D-1

Un aspecto importante a considerar es que en el concepto "b" se consideró como parte de la cubierta final una capa de baja permeabilidad formada por material natural, ya que ofrece diferentes ventajas sobre una capa sintética, tales ventajas residen en la versatilidad para recibir mantenimiento y realizar en ella reparaciones periódicas en caso de fisuras, pero quizá el factor más importante es el del costo, ya que representa ¼ del el costo de una cubierta con material sintético. Así mismo en la construcción de vialidades se consideran materiales deformables que absorban los diferentes asentamientos que ocurrirán en el área debido a la degradación de los RSM, esta misma idea es la que se utiliza en diferentes zonas del parque, las cuales son pensadas en sitios con este tipo de características.

El monto de este presupuesto puede variar en casos diferentes al que trata este estudio, ya que mucho depende de las distancias a las que se encuentren los bancos de donde se obtendrán los materiales necesarios para conformar las diferentes capas, pues como es posible observar en el cuadro 28, los conceptos que pertenecen al movimiento de materiales son los que encarecen el proyecto, debido a que el volumen de corte y formación de terraplenes es muy grande, así como los diferentes volúmenes pertenecientes a las capas de la cubierta.

Cuadro 28. Catálogo de conceptos, cantidades y montos correspondientes a la clausura del tiradero a cielo abierto de Tuitilán, Estado de México.

Concepto	Unidad	Zona				Cantidad	Importe			
		1	2	3	4		1	2	3	4
Campaña de eliminación de fauna nociva	lote	31,000	31,000	31,000	31,000	1	31 000	31,000	31,000	31,000
Excavación en corte para construcción de caminos...										
En material común, desperdiciando el material	m3.	10.25	10.30	10.34	10.40	219,610	2,251,439	2,261,533	2,271,391	2,283,544
Limpieza y trazo en el área de trabajo.	m2.	4.40	4.79	5.17	5.64	60,000	264,024	287,485	310,399	338,648
Terraplén compactado al 90% proctor con material de banco, incluye: extracción carga y acarreo 1er kilómetro	m3	43.40	43.74	44.08	44.49	32 790	1 422 997	1 434 244	1 445 229	1 458 771
Terraplenes y revestimientos y tendido de material...										
Terraplén compactado al 85% proctor con material producto de excavación.	m3	23.94	24.07	24.20	24.36	54 650	1 308 177	1 315 412	1 322 479	1 331 191
Instalación de tubería de polietileno de alta densidad de ...										
de 4" de diámetro.	m.	3.30	3.40	3.50	3.62	1,199	3,958	4 077	4,193	4,337
Desmonte, desentrañe, desyerbe y limpia de terreno p/propósitos de construcción en vegetación tipo...										
Montes de regiones áridas o semáridas.	ha.	3,249.42	3,264.10	3,278.44	3,296.11	2	5,524	5,549	5,573	5,603
Construcción de...										
Pavimento asfáltico o carpeta de 5 cm. de espesor	m2	87.85	88.61	89.34	90.24	18 323	1 609 746	1 623 509	1 636 952	1 653 524
Pavimento o banqueta de concreto f'c= 150 kg/cm2. 8 cm. espesor	m2	97.16	99.94	102.65	106.00	5 214	506 594	521 080	535 228	552 670
Excavación a mano p/ desplante de estructuras, en material común, en seco...										
Hasta 2.00 mts. de profundidad.	m3.	35.32	38.46	41.52	45.30	45	1,589	1 731	1,869	2,039
Excavación para cunetas y contracunetas.										
En cualquier material, excepto roca.	m3.	19.61	21.35	23.05	25.15	189	3,698	4 027	4,348	4,743
Plantilla apisonada al 85% proctor en zanjas...										
Con material producto de excavación.	m3	40.64	43.88	47.04	50.94	5	183	197	212	229
Relleno en zanjas.....										
A volteo con material producto de excavación	m3.	4.79	4.82	4.84	4.88	41	194	195	196	197
Mampostería de piedra, con paramentos rostreados, junteados con...										
Mortero cemento-arena 1:5.	m3.	568.74	582.70	596.34	613.14	68	38,390	39,332	40,253	41,387
Muros de tabique rojo recocido, hasta 6 m de altura, junteado con mortero cemento:arena 1:5										
D 14 cms. de espesor.	m2.	129.53	132.53	135.45	139.05	168	21,697	22,198	22,687	23,291
Bonificación por una cara aparente en muros de 14 cms. de espesor.	m2	22.14	23.82	25.46	27.49	168	3 709	3 990	4 265	4 604
Fabricación y colado de concreto vibrado y curado ...										
de f'c= 100 kg/cm2.	m3	895.65	916.92	937.69	963.29	162	145,096	148,541	151 906	156,054
Fabricación y lanzamiento de concreto en paredes, pisos y plafones, curado ...										
Relleno apisonado y compactado de pisos con tezontle o tepalate.	m3	204.68	208.11	211.46	215.59	162	33 158	33 714	34 257	34 926
Pisos, lambrines y zoclos, con todos los materiales y mano de obra...										
Piso de azulejo de color asentado con mortero cemento-arena 1:3 y lechadeado con	m2.	239.08	242.51	245.86	249.99	162	38 731	39 287	39 830	40 499

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

cemento blanco.											
<b>Postes y alambrados, con todos los materiales y mano de obra...</b>											
Poste galvanizado 2.50 m. altura libre, 2 1/2" de diámetro cédula standard, inc. accesorios así como exc. relleno y concreto.	pza	167.93	169.43	170.89	172.69	448	75.233	75.903	76.658	77.364	
Malla galvanizada c/abertura de 55 x 55 mm calibre 10. incluye soportería.	m <sup>2</sup>	41.83	42.21	42.58	43.03	3.620	151.437	152.803	154.137	155.781	
Alambre de puás calibre 12 1/2 con 4 puás cada 76 mm. incluye: colocación	m	6.90	7.04	7.17	7.33	4.344	29.980	30.561	31.128	31.828	
<b>Acabado de azoteas, con todos los materiales y mano de obra...</b>											
Sum. y coloc. de impermeabilizante integral	kg.	9.10	9.11	9.13	9.14	162	1.474	1.476	1.479	1.481	
Suministro y colocación de pasto y jardinería.	m <sup>2</sup> .	44.27	46.16	47.99	50.25	67.518	2.989.211	3.116.120	3.240.070	3.392.879	
<b>Sum. e instalación de bajadas de agua....</b>											
Sum. y col. de tinaco de polietileno de 1100 lt.	pza.	1.934.10	1.957.80	1.980.95	2.009.49	3	5.802	5.873	5.943	6.028	
<b>Registros de albañal c/ muros de tabique 14 cms., apañados c/ mortero cemento-arena 1:3 y tapa de concreto c/ marco de hierro...</b>											
de 0.40 x 0.60 y 0.50 mts. de profundidad.	pza.	708.99	728.51	747.57	771.07	6	4.254	4.371	4.485	4.626	
Incremento por cada 0.50 mts. de profundidad.	inc.	263.89	270.96	277.86	286.37	6	1.583	1.626	1.667	1.718	
<b>Instalación de muebles sanitarios c/colocación y sum. de alimentación de agua, con tubería de cobre</b>											
De lavabo, wc, regadera, fregadero o tinaco.	sal.	957.90	1,011.07	1,062.99	1,127.01	19	18.200	19.210	20.197	21.413	
<b>Salida para centro de luz o contacto....</b>											
Salida p/centro de luz o contacto con salida tubería poliducto 3/4" de diámetro.	sal.	438.20	458.30	477.93	502.13	8	3.506	3.666	3.823	4.017	
Salida p/centro de luz o contacto con salida tubería poliducto 3/4" diam para apagador de escalera	sal.	574.38	602.85	630.65	664.93	4	2.298	2.411	2.523	2.660	
<b>Suministro e instalación de puertas....</b>											
De herrería tubular, perfiles z y l tambor doble laminado No. 18	m <sup>2</sup>	529.70	552.00	573.77	600.62	9	4.767	4.968	5.164	5.406	
<b>Suministro e instalación de ventanas....</b>											
de herrería tubular, perfiles z y l.	m <sup>2</sup> .	500.93	521.85	542.29	567.48	8	3.757	3.914	4.067	4.256	
Suministro y colocación de vidrio medio doble 3 mm	m <sup>2</sup>	85.71	85.71	85.71	85.71	8	643	643	643	643	
Suministro y colocación de vinil negro o gris No.4	m	5.52	5.52	5.52	5.52	20	110	110	110	110	
<b>Suministro y colocación de pintura....</b>											
Vinílica en interiores y exteriores (tres manos)	m <sup>2</sup>	21.80	22.79	23.77	24.96	168	3.662	3.829	3.993	4.194	
Esmalte en herrería.	m <sup>2</sup> .	29.71	30.81	31.88	33.20	10	297	308	319	332	
<b>Sistema de control de Biogás...</b>											
Construcción de pozos verticales de venteo	ML	10,000	10,000	10,000	10,000	180	1.800.000	1.800.000	1.800.000	1.800.000	
<b>Sistema de control de lixiviados...</b>											
Construcción de dren de piedra	M2.	19.49	21.23	22.92	25.00	250	4.873	5.306	5.729	6.251	
Construcción de pozo horizontal	m	16.184	16.184	16.184	16.184	100	1.618.400	1.618.400	1.618.400	1.618.400	
							<b>Total</b>	<b>14,409,381</b>	<b>14,628,602</b>	<b>14,842,700</b>	<b>15,106,647</b>
							<b>S/Ha =</b>	<b>1,346,672</b>	<b>1,367,159</b>	<b>1,387,168</b>	<b>1,411,836</b>

Es posible observar en el cuadro 28 el costo que representa la clausura del tiradero a cielo abierto de Tultitlán que es de \$14,842,700; este monto incluye la construcción de la cubierta final, una red de captación de biogás, 100 metros de pozo horizontal para la evacuación de lixiviados, una laguna de evaporación de lixiviados y la construcción de un parque recreativo en una zona de 10.7 hectáreas. Si se toma en cuenta esta área es posible obtener un costo unitario de clausura de \$ 1,387,168 /Ha

Es posible observar en el cuadro 28 que los conceptos más significativos en este presupuesto son aquellos que tienen que ver con el movimiento de materiales para la formación de taludes y de las capas de la cubierta final (conceptos b y c), los cuales suman un total de más de cinco millones de pesos. Otros conceptos que son muy significativos en el costo de clausura de este tiradero a cielo abierto son el suministro y colocación de pasto y la construcción de vialidades para el parque recreativo, los cuales suman también más de cinco millones de pesos (conceptos f y q). Lo anterior nos indica que una clausura sin la finalidad de la construcción de un parque recreativo puede costar alrededor de \$ 10,000,000 por lo que el costo por hectárea sería de \$1,000,000 aproximadamente; esto proporciona un gran margen de acción, ya que es posible realizar una clausura completa y segura a un costo menor del que sería si se planea construir un parque recreativo

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 Conclusiones

El anteproyecto de la clausura del tiradero a cielo abierto del municipio de Tultitlán, Estado de México se planteó bajo el esquema de la integración de dicho lugar al entorno, haciéndolo útil a la sociedad, mediante la construcción de un parque recreativo y de esparcimiento sobre la cubierta final del antiguo sitio. Este concepto trae consigo varias ventajas, ya que por un lado evita la creación de asentamientos irregulares en el sitio clausurado, se construye un área recreativa que brindará un servicio social a la comunidad, elevará la plusvalía de la zona la cual se vio deteriorada por la presencia del tiradero y por último, se mejorará la estética del paisaje natural

Dicho anteproyecto estableció una metodología que podrá ser seguida para realizar este tipo de trabajos en diferentes sitios similares, contribuyendo con clausuras eficientes y seguras. En general los trabajos de clausura se resumen como:

- Eliminación de fauna nociva
- Formación y estabilización de taludes
- Formación de cinco capas de diferente material, las cuales cumplen un objetivo específico
- Sistema de evacuación de biogás y lixiviados
- Construcción de una cerca perimetral que permita un acceso restringido al parque, así como diferentes instalaciones que permitan el recreo y esparcimiento a las personas que visiten el lugar.

El control de la post - clausura es muy importante en este tipo de obras, ya que debe existir alguna empresa u organismo que se encargue de mantener en buen estado la obra y en condiciones de seguir operando en la forma que se diseñó. Incluso es muy recomendable que la misma empresa que se encargó de la clausura sea la encargada del control de esta etapa, ya que con ello se garantiza una ejecución de obra sin vicios o fallas. El periodo que se recomienda para el control de la post -

clausura es de 30 años, pudiendo acortarse o extenderse dependiendo del riesgo que represente a la salud pública el sitio clausurado.

Se demostró la urgencia con que este sitio debe ser clausurado, ya que debido a la naturaleza de los tiraderos a cielo abierto no existe infraestructura que controle la emanación de subproductos provenientes de la degradación de los RSM, tal es el caso de los lixiviados, los cuales son líquidos con un alto contenido de materia en suspensión proveniente del arrastre de material al percolar a través de los residuos, dichos lixiviados poseen características altamente contaminantes, las cuales pueden prevalecer como materia recalcitrante aún después de estabilizarse y dentro de esa materia se encuentra una gran parte de material tóxico, como pueden ser los metales pesados.

Debido a la falta de infraestructura de evacuación y control de lixiviados en el tiradero se propicia la infiltración de los mismos al subsuelo, y con ello se pone en grave riesgo la integridad de los acuíferos existentes en el mismo. Una característica que hace más vulnerable este sitio es que el tiradero en cuestión se encuentra en una zona de recarga de acuíferos, y se ha calculado que faltan 13.6 años para que dichos lixiviados entren en contacto con el acuífero, demostrando con esto la urgencia de la clausura de dicho sitio.

El daño al acuífero por contaminación de lixiviados representa un grave riesgo a la salud pública, ya que la población obtiene el agua para uso y consumo humano del subsuelo, por ello, para potabilizar el agua se tendría que tratar de una forma más específica, lo que representa onerosos gastos; también representa riesgos a la salud, ya que los efectos de ingerir agua contaminada por lixiviados pueden llegar hasta producir diferentes tipos de cáncer. Todo esto esquematiza un escenario poco deseable, pero posible en el caso de no atender la clausura de este tiradero y a muchos otros que se encuentran en el mismo tipo de zonas

Por otro lado, el biogás es otro subproducto que es producido por la degradación de los RSM, este gas se compone básicamente de  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$  (60-40% respectivamente), y si se toma en cuenta que el biogás está considerado como gas invernadero, siendo uno de los gases que provocan el cambio climático, además el  $\text{CH}_4$  representa un grave riesgo, ya que en concentraciones del 5-15 % en volumen de aire, la mezcla se vuelve explosiva generando un riesgo a la seguridad pública de las cercanías del sitio, por ello, el control de este subproducto es necesario.

También como afectación se toma la producción de malos olores, los cuales provienen principalmente del  $\text{H}_2\text{S}$  lo cual no solo afecta el bienestar de las personas que viven en las cercanías, sino que también reduce la plusvalía de todos esos terrenos en las cercanías del tiradero.

Otro impactante que contribuye a la justificación de la clausura de dicho sitio son las partículas suspendidas, las cuales son pequeñas porciones de sólidos desprendidos de los residuos que debido a su tamaño y forma pueden viajar arrastrados por las corrientes de aire en forma de polvo o aerosoles, estas pueden llevar consigo microorganismos patógenos y/o no patógenos adheridos, o simplemente restos inorgánicos, los cuales pueden penetrar al aparato respiratorio y provocar diferentes tipos de enfermedades respiratorias que van desde alergias hasta enfermedades asmáticas.

Este tipo de contaminante pone en riesgo a todas aquellas personas que laboran en el tiradero e incluso a aquellas que viven en las cercanías del lugar, ya que por medio del aire posee un mecanismo de transporte para los microorganismos patógenos de más alcance que en el caso de los microorganismos que viajan a través del agua.

Un problema más causado por la operación de este tiradero a cielo abierto es la proliferación de fauna nociva como las ratas, perros, gatos, aves e insectos; los cuales obtienen su comida a través de los RSM que se depositan diariamente en este lugar, razón por la cual no emigran a las afueras del tiradero y se concentran dentro del área donde tienen sus madrigueras. Esta fauna también llamada vectores debe ser eliminada ya que representa un grave riesgo a la salud de todas las personas que vivan en las inmediaciones del tiradero, esta eliminación debe ser el primer trabajo de la clausura, ya

que de lo contrario al no tener alimento fresco, esta fauna comenzaría a buscar su alimento en las viviendas cercanas, lo cual provocaría un grave riesgo a la salud pública

El problema de la pepena incontrolada en ese tipo de sitios responde a una situación económica nacional, ya que al no existir oportunidades de empleo suficientes, las personas recurren a esta clase de trabajos que no exige experiencia alguna ni estudios previos; obligándolos a vivir en condiciones de extrema pobreza y por lo tanto carente de cualquier servicio sanitario. Dadas las características de este grupo social existe la posibilidad de que sean manipulados por grupos políticos y obstaculicen este tipo de trabajos, argumentado que es la única fuente de empleo y lugar de vivienda que tienen, la cual es una razón muy válida; por lo que antes de la clausura deberá solucionarse la reubicación y dotación de trabajos dignos a estas personas, evitando así cualquier tipo de rechazo a la clausura del tiradero a cielo abierto

En cuanto al volumen de lixiviados producido por este sitio que se determinó por medio del método de balance de agua es de 16,500 m<sup>3</sup> por año y la cantidad que ha generado a lo largo de sus 24 años de operación es de 205,627 50 m<sup>3</sup> de lixiviados, lo cual indica una contaminación grave al suelo y posiblemente a los acuíferos

Así mismo, se obtuvo por medio de estequiometría y una ecuación cinética de primer orden la cantidad de biogás generada en el tiradero a cielo abierto a lo largo de su vida útil, concluyendo que el tiradero produce actualmente 4,000,000 de m<sup>3</sup> de biogás al año y que a lo largo de su operación ha generado 72,000,000 de m<sup>3</sup> del mismo gas, por lo que es evidente la urgencia del control de dicho subproducto.

El dimensionamiento de los diferentes sistemas de control de subproductos generados en el tiradero, así como de las especificaciones para el diseño de la cubierta final y el parque recreativo, se tomaron de diferentes normatividades, tales como de la U.S. EPA, GTZ y de trabajos realizados en México, aprovechando los lineamientos, la experiencia y el conocimiento de dichos documentos; por lo que el resultado fue un diseño flexible que puede adecuarse a diferentes condiciones tanto físicas como económicas, pensado en municipios con sitios similares que no cuentan con suficientes recursos.

En cuanto al costo que representa la clausura de un tiradero a cielo abierto en condiciones parecidas a las del municipio de Tultitlán, Estado de México el costo por la clausura es de aproximadamente de un millón de pesos por hectárea clausurada, llevando la clausura hasta la construcción de un parque público. El costo puede incrementarse a 1,400,000 /Ha si se construyen los pozos horizontales para el control de los lixiviados.

## 8.2 Recomendaciones

Deben realizarse los estudios preliminares en los tiraderos a cielo abierto existentes en México con fines de clausura, dando prioridad a aquellos tiraderos que se encuentren en zonas de alto riesgo, como zonas de recarga de acuíferos, fallas geológicas activas, cuerpos de agua y aquellos cuya localización afecta de forma directa a las comunidades cercanas.

Se recomienda crear un fondo federal destinado a la clausura de tiraderos a cielo abierto y creación de rellenos sanitarios, ya que si bien los tiraderos se encuentran en ciertas delimitaciones territoriales, la contaminación que causan o pueden causar, va más allá de cualquier límite territorial, por lo que la protección de los recursos naturales es de competencia federal

Se deben idear e implementar sistemas de recuperación de biogás para poder comercializarlo, obteniendo así un beneficio que ayude a amortizar el costo de la clausura de los tiraderos a cielo abierto, ya que actualmente existe un total desinterés por parte de los organismos operadores en tomar atención a este rubro, debido a que ven en este tipo de sitios un gasto no redituable.

Es necesario investigar más acerca de procesos de tratamiento de lixiviados económicamente viables, debido a que actualmente sólo se están captando en los diferentes sitios de disposición final de RSM grandes cantidades y no se sabe que utilización darle o de qué manera reincorporarlos al entorno sin afectaciones.

Es posible realizar una clausura en etapas, planificando el flujo del dinero en el tiempo dando a sí mejores posibilidades a aquellos municipios que no cuenten con suficientes fondos para una obra de esta magnitud. La clausura en una primera etapa podría abarcar la exterminación de fauna nociva, estabilización y formación de taludes, formación de capas de venteo, baja permeabilidad, drenaje y suelo vegetal; en la segunda etapa es posible comenzar con la construcción de vialidades y estructuras del parque recreativo y por último será la colocación y suministro de pasto y jardinería, así como el mobiliario correspondiente a un parque de este tipo.

## 9. BIBLIOGRAFIA

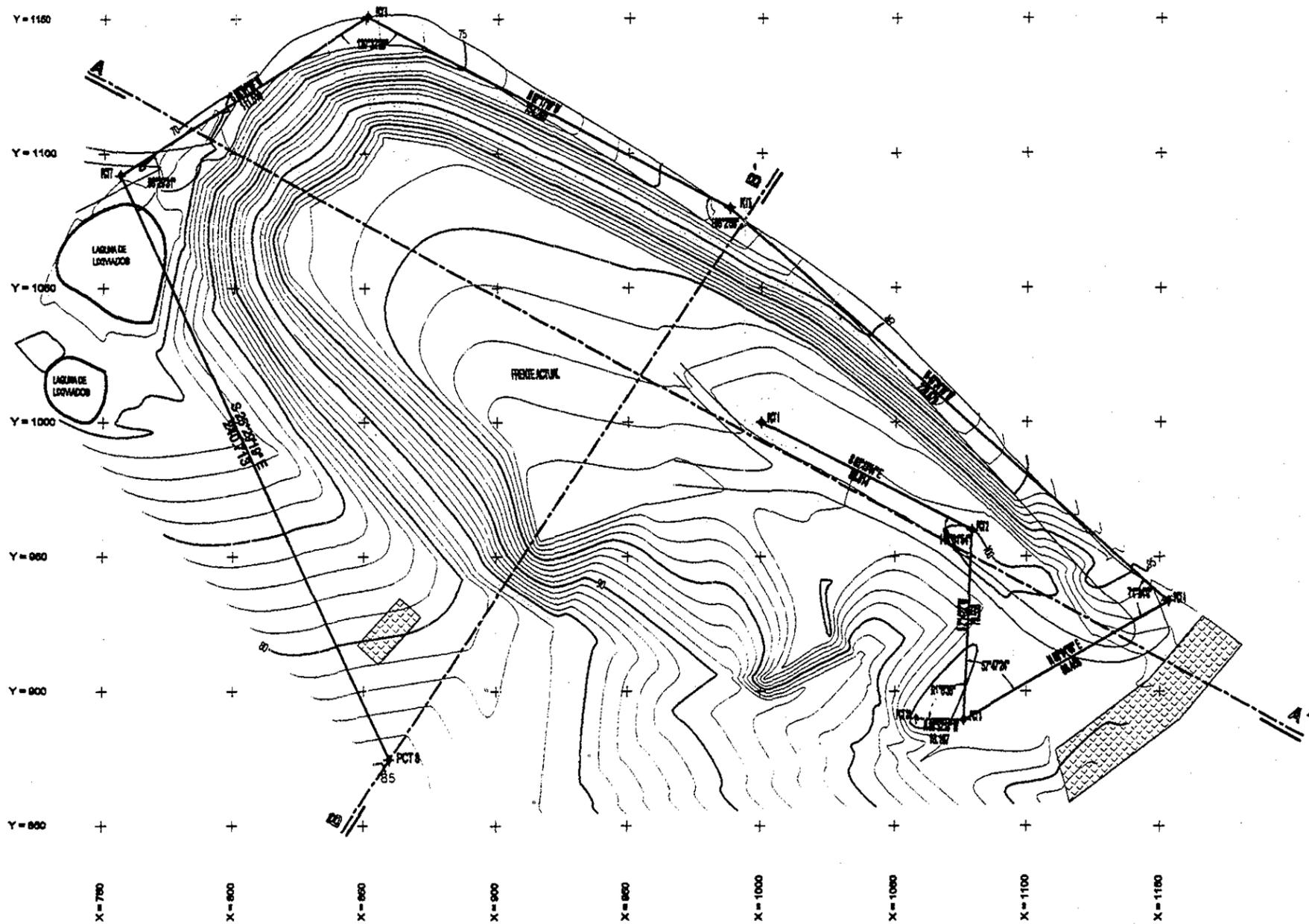
1. Admín, 1993; "Toxic Gases Emitted From Landfills" Publicación Electrónica. Environmental Research Fundation, P.O. Box 5036, Annapolis, MD. 21403.
2. Argus Environmental Ltd, (1999) Landfill Monitoring URL: <http://www.argusenv.demon.co.uk>
3. Bravo, A. H., 1987; "La contaminación del aire en México". Universo veintiuno México, D.F. 295 pp.
4. Bachi A., 1990; "Design, construction and monitoring of sanitary landfill," chapter 4, Wiley Intercience
5. Campos A. I G, 1997; Proyecto paisajístico para la habilitación del relleno sanitario Prados de la Montaña", Tesis de licenciatura, Facultad de Arquitectura, UNAM, México, D.F
6. CNA, 2000; "Catálogo de conceptos y precios unitarios, versión 2000", Comisión Nacional del Agua, México, D.F.
7. Deffis C.A., 1989; "La basura es la solución", pp 9-90, Edi Concepto, México, D.F.
8. DGSU, 1986; "Acciones para la disposición final de los desechos sólidos en el D.F.", Secretaria General de Obras, D.G.S.U., México, D.F. 15 pp
9. Edmonds, L. R. 1979; "Aerobiology: The Ecological Systems Approach" US/IBP SYNTHESIS SERIES 10. Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. USA 385 pp
10. ERIC, 1996; "Extractor Rápido de Información Climatológica", Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

- 11 Freeze R A y Cherry J.A , 1979; "Groundwater", Prentice hall, Inc New Jersey, U.S.A. 603 pp.
- 12 Gamboa, R Ma. T., 1983; "Identificación y Cuantificación de Microorganismos (Bacterias y Hongos) y su relación con la Distribución del Tamaño de Partículas Suspendidas en cuatro Sitios de la Atmósfera de la Ciudad de MÉXICO", Tesis- Facultad de Ciencias, Realizada en la Sección de Contaminación Ambiental, Centro de Ciencias de la Atmósfera, México, D. F.
- 13 Garden, N., Manley, B.J.W. & Pearson, J.M., 1993; "Gas Emissions from Landfills and their Contributions to Global Warming" *Applied Energy* 44, 165-174.
- 14 González de la F. R , 2000; "Estudio de prospección geofísico – hidrogeológica como parte de los estudios de caracterización del sitio abandonado con residuos sólidos peligrosos, relleno sanitario de Tultitlán en el estado de México" Informe final, Geofísica y perforaciones del medio ambiente, S.C, México, D.F. 120 pp
- 15 Graevenitz V.A., 1977; "The role of opportunistic bacteria in human disease", *Ann. Rev. Microbiologic* , 31:447 – 471.
- 16 Henry J G y Heinke G.W,1999; "Ingeniería Ambiental", Prentice Hall, México, capítulo XIV
- 17 <http://www.epa.gov/history/topics/rcra/05htm>; "New Law to Control Hazardous wastes, End Open Dumping, Promote Conservation of Resources, EPA
- 18 <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-date.../waste-avoidance.htm>; "Waste Avoidance, Recycling and Disposal Act", Federal Environmental Agency, Germany.
- 19 <http://www.foe.org/ptp/chapter1.html>; "Landfill Manual: Chapters 1, 2 and 3", Friends of the Earth
- 20 <http://sma.df.gob.mx/sima/dqpa/acuifero.htm>; " Recarga del sistema de acuíferos en la ciudad de México"
- 21 INEGI, 1995;"Cuaderno municipal de Tultitlán, Estado de México", INEGI, México, D.F.
- 22 INE, 1999; "Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos", SEMARNAP, México, D.F., parte 1-3
- 23 Lemus V E , 1992; "Las celdas de control como dispositivos para el monitoreo ambiental y para el conocimiento de los procesos de estabilización en los sitios de disposición final de residuos sólidos", Tesis de maestría, IPN, México
- 24 López S.F., Sámano L.H.J., 1996; "Clausura del Relleno Sanitario de Prados de la Montaña: Primera Experiencia Mexicana Apegada a una Rigurosa Normatividad", Memorias del XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Volumen III, Tratamiento y Disposición de Residuos Sólidos, Celanese Mexicana, México, D.F.
- 25 Matsufuji, Y , Hanashima, M., Nagano, S and Tanaka, A., 1993;"Generation of greenhouse effect gases from different landfill types" In: M. Arnoul, T. Furuichi and H Koide (Editors), *Management of Hazardous and Radioactive Waste Disposal Sites*. Engineering Geology, 34, 181-187.
- 26 McBean E.A., Rovers F.A., Farquha G.J, 1995; "Solid wastes landfill engineering and design" Chapter 11, Prentice Hall, New Jersey.
- 27 Monje Ramírez I, 2001; "Ozonación de lixiviados de rellenos sanitarios para transformar o eliminar materia orgánica recalcitrante, (Defensa de tema de tesis)", UNAM

28. NOM-083-1996 Que Establece las Condiciones que deben Reunir los Sitios Destinados a la DISPOSICIÓN FINAL DE LOS SÓLIDOS MUNICIPALES Publicada en el D O F el 26 de noviembre
29. NOM-084-ECOL-1994; "Requisitos para el diseño de un relleno sanitario y la construcción de sus obras complementarias"
30. Oeltzschner H. & Mutz D., 1994; "Guidelines for an Appropriate management of Domestic Sanitary Landfill Sites", Deutsche gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Federal Republic of Germany
31. Orta L. M.T., Rojas V. N. y Monje I., 1997; "Manejo de lixiviados y biogás procedentes de rellenos sanitarios en México. *Revista de Ingeniería y Ciencias Ambientales*. año 10, núm, 42, pp.25.
32. Orta L. M.T, Sánchez G J, Cruz R.R. Rojas V. N. y Monje I., 2001; "Aspectos teóricos y prácticos para la operación ambientalmente segura de rellenos sanitarios", 286 pp. Instituto de Ingeniería, UNAM (trabajo en revisión, no publicado).
33. Restrepo, I. 1992; " La contaminación Atmosférica en México: Sus causas y efectos en la salud", Comisión Nacional de Derechos Humanos; Impreso en México.
34. Reyes M., et al, 1998; " Monitoreo Ambiental e n Instalaciones para el manejo de Residuos Sólidos, DGSU, D F. 1998.
35. Sánchez G.J., Ortega R.R., Semadeni M I. y Cedillo V., 1996; "Obtención de parámetros de Ajuste para el Cálculo del Balance de Agua en Sitios de Disposición Final de Residuos Sólidos Peligrosos." Memorias del XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Volumen III, Tratamiento y Disposición de Residuos Sólidos. Celanese Mexicana
36. Sánchez G.J., Mata G M y Semadeni M.I., 1996; "El monitoreo Enfocado Hacia el Control de los Impactantes Generados por el Manejo de Residuos Sólidos", Memorias del XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Volumen III, Tratamiento y Disposición de Residuos Sólidos, Celanese Mexicana
37. Senior E., Shibani B.S., 1993; "Microbiology of landfill sites" Chapter 4 Landfill leachates. CRC Press. USA, pp 81-111
38. Senior E., Shibani, B S., 1990; "Landfill leachate. Microbiology of landfills sites" Chapter 4CRC Press
39. Tchobanoglous G, et al, 1993; "Integrated solid waste management", McGraw Hill, Part V, pp. 769-798
40. <sup>1</sup>U.S. EPA, 1989; "Discussion of options for landfill closure Mexico city landfill", P119/Mex-P.72/eh:3 044-01 01
41. <sup>2</sup>U.S. EPA, 1989; " Seminar Publication – Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction and Closure"; EPA/625/4-89/022; U.S. EPA; Center for Environmental Research Information; Office of Research and Development; Cincinnati, Ohio 45268.
42. U.S. EPA, 1993; "Technical Manual - Solid Waste Disposal Facility Criteria", EPA 530-R-93-017; Office of Research and Development; Washington, D C. 20460

43. U.S. EPA, 1994; "Seminar Publication – Design, Operation, and Closure of Municipal Solid Waste Landfills", EPA/625/R-94/008; Office of Research and Development; Washington, D.C. 20460
44. Vidales A. H., 1994; " Generación y cuantificación de biogás en rellenos sanitarios", Notas de los residuos sólidos y peligrosos, Revista, Tomo I., Vol 8, AMCRESPAC, México, D.F.

# PLANOS



- Simbología**
- NOMBRE DEL VERTICE
  - VERTICE DE POLIGONAL
  - MEDIDA DEL ANGULO
  - CURVA DE NIVEL
  - CAMINO DE ACCESO
  - ZONA DE CASAS
  - LAGUNA DE EVAPORACION
  - POLIGONAL



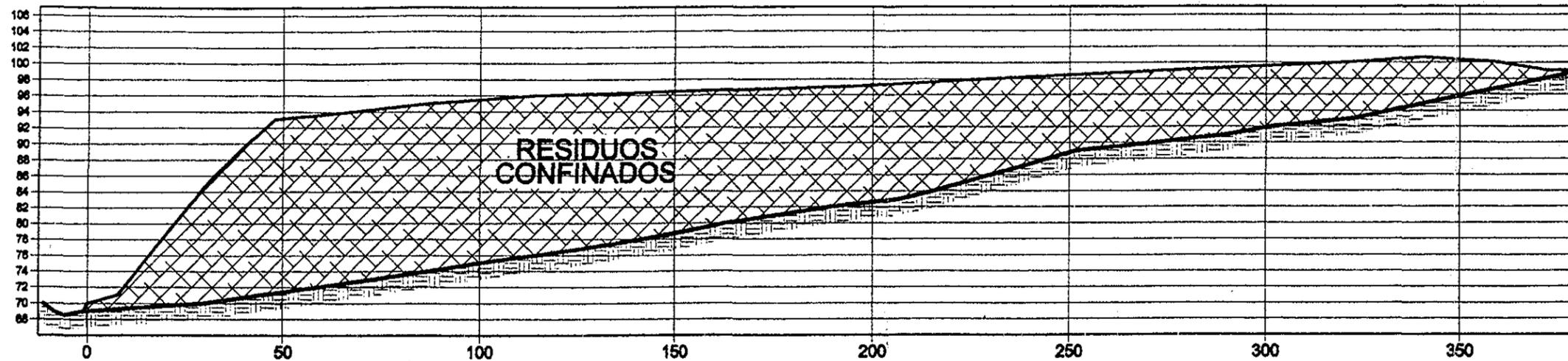
**NOTAS:**

- LOS NIVELES ESTAN DADOS EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR
- LAS CURVAS DE NIVEL TIENEN UNA SEPARACION DE UN METRO

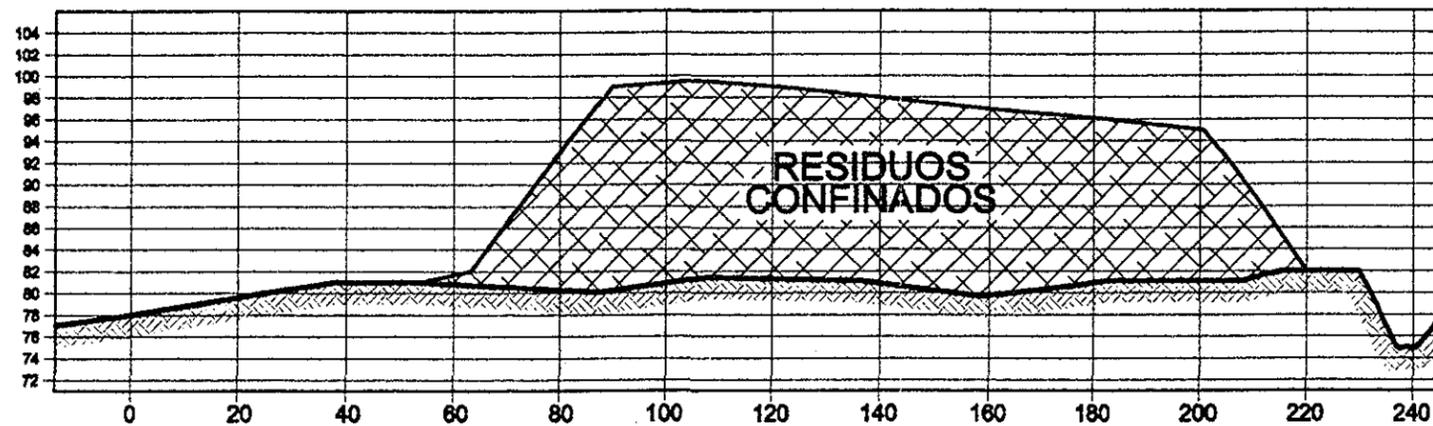
**ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLAN, ESTADO DE MEXICO**

		JURADO:	DESCRIPCIÓN:	ESCALA:	UNIDADES:
		DRA. M <sup>te</sup> . TERESA ORTA LEDESMA M.L. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ M.C. CONSTANTINO GUTÉRREZ P. M.L. LANDY I. RAMÍREZ BURGOS	<b>TOPOGRAFIA</b>	1:2000	METROS
PROYECTO: ING. REYNALDO CRUZ RIVERA		ESCALA GRÁFICA: 		CLAVE: <b>T-1</b>	

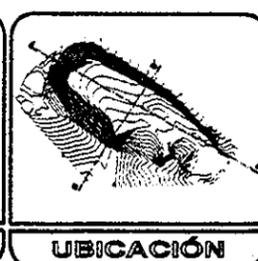
**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



**CORTE LONGITUDINAL A - A'**



**CORTE TRANSVERSAL B - B'**

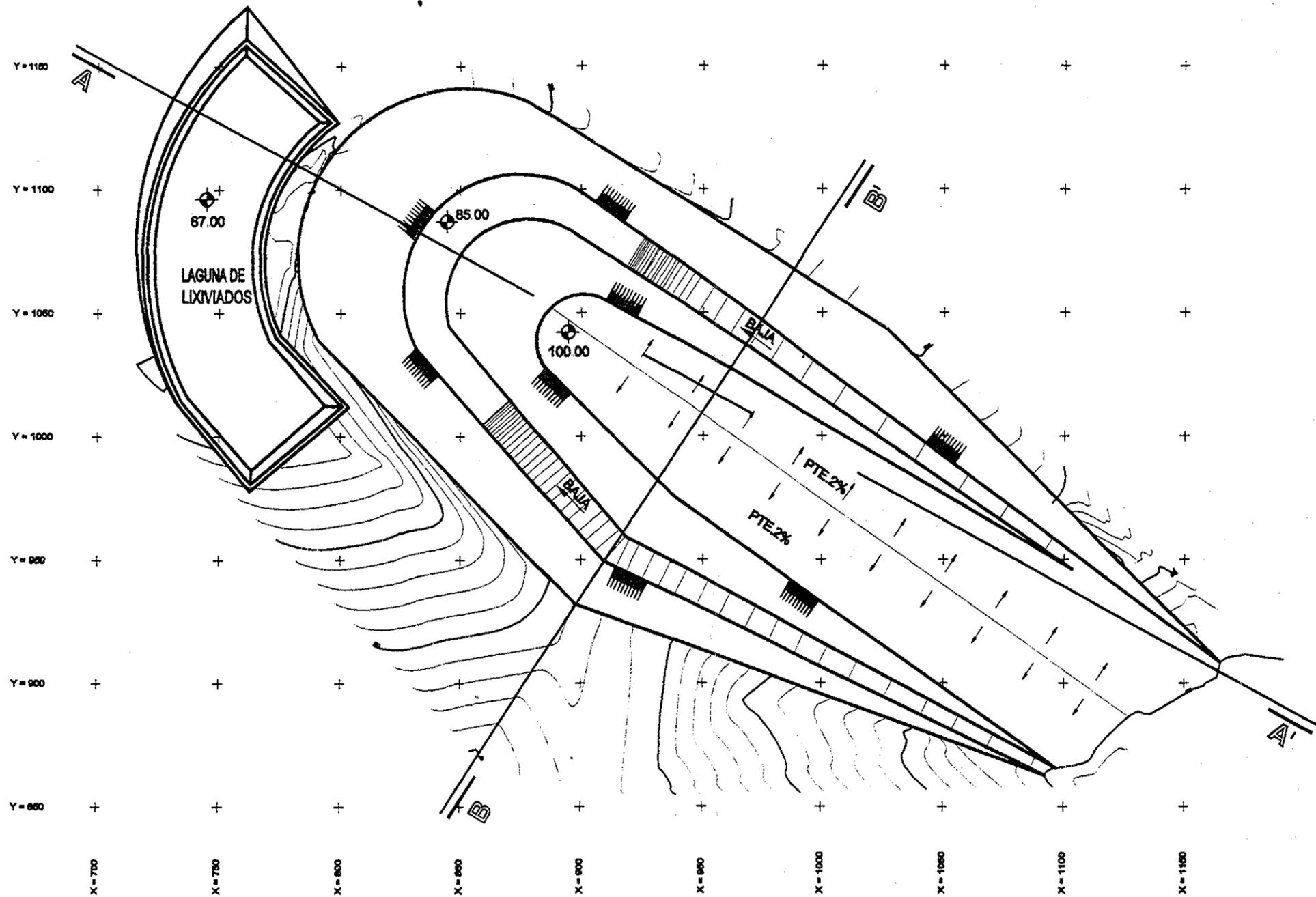


**NOTAS:**  
 - LOS NIVELES ESTÁN DADOS EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR  
 - LAS CURVAS DE NIVEL TIENEN UNA SEPARACIÓN DE UN METRO

**ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLAN, ESTADO DE MÉXICO**

<p><b>UNAM</b></p>	<p><b>INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM</b></p>	<p><b>JURADO:</b>          DRA. M<sup>o</sup>. TERESA ORTA LEDESMA          M.L. JORGE BÁNCHEZ GÓMEZ          M.C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ P.          M.L. LANDY I. RAMÍREZ BURGOS</p>	<p><b>DESCRIPCIÓN:</b>  <b>TOPOGRAFIA</b></p>	<p><b>ESCALA:</b>          8/E</p>	<p><b>UNIDADES:</b>          METROS</p>
		<p><b>PROYECTO:</b>          ING. REYNALDO CRUZ RIVERA</p>	<p><b>ESCALA GRÁFICA:</b></p>	<p><b>CLAVE:</b>  <b>T-2</b></p>	

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



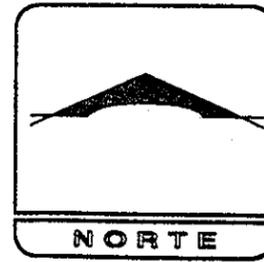
- SIMBOLOGIA:**
- TALUDES 1:3
  - NIVEL DE TALUD
  - CURVA DE NIVEL
  - PENDIENTE DEL 2%

**NOTAS:**

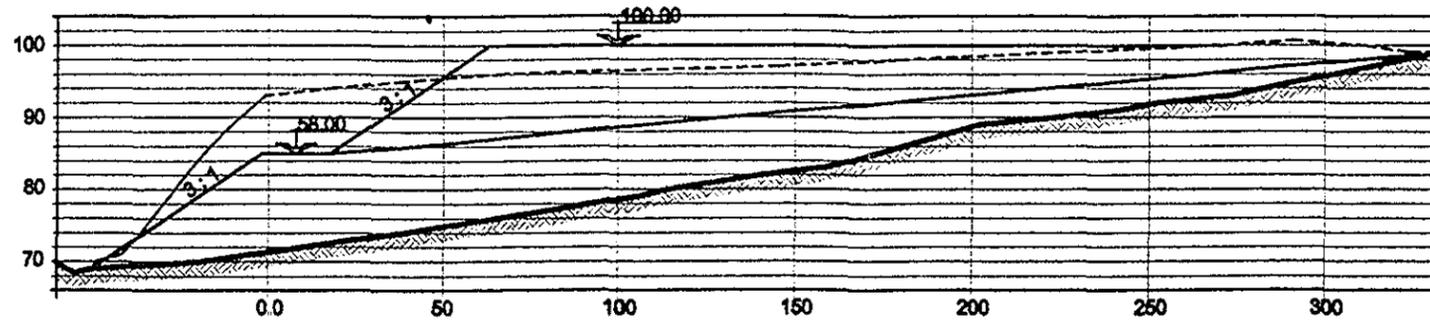
- LOS TALUDES PRINCIPALES SERÁN 2:1 COMO MÁXIMO
- EN EL ÁREA CUYA ELEVACIÓN SEÑA DE 100.00 SE CONTEMPLA UNA PENDIENTE DEL 2% PARA SEGUROS DE SUPERFICIALES PROPORCIONADOS DE LAS AGUAS DE LLUVIA, ASÍ COMO EN TODOS LOS ANCHOS DEL BTD

**ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLAN, ESTADO DE MÉXICO**

		JURADO:	DESCRIPCIÓN:	ESCALA:	UNIDADES:
		DRA. M <sup>te</sup> . TERESA ORTA LEDESMA M.L. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ M.C. CONSTANTINO GUTIERREZ P. M.L. LANDY I. RAMÍREZ BURGOS	<b>ESTABILIZACIÓN DE TALUDES</b>	12000	METROS
PROYECTO: ING. REYNALDO CRUZ RIVERA		ESCALA GRÁFICA: 		CLAVE: <b>K-1</b>	

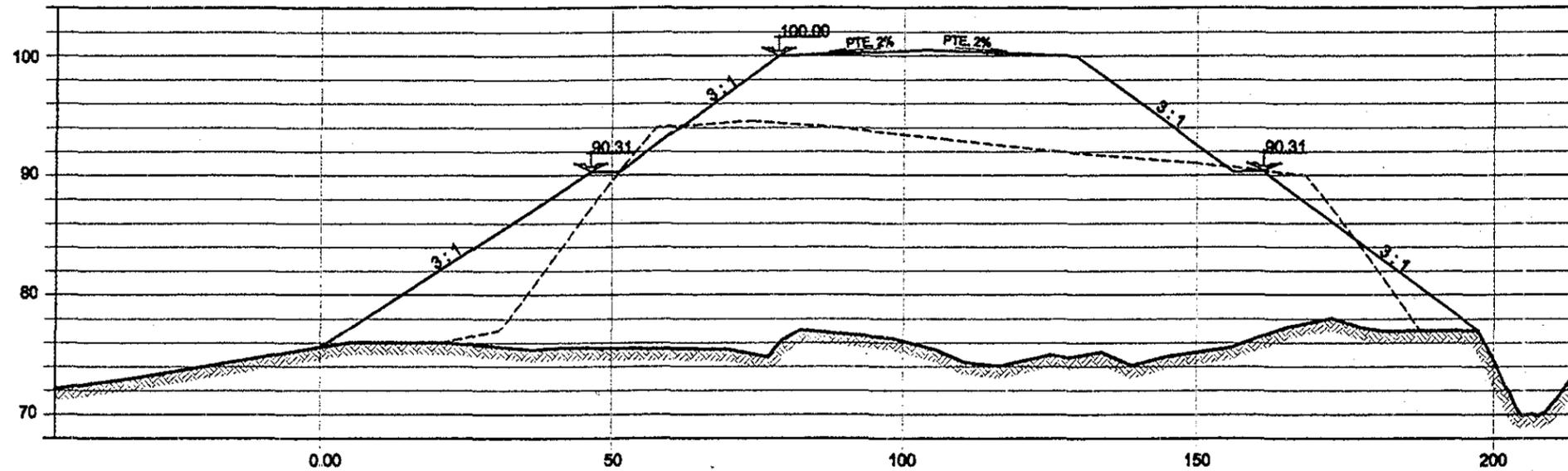


**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



**CORTE A - A'**

ESCALA VERTICAL = 1:1000  
ESCALA HORIZONTAL = 1:2000

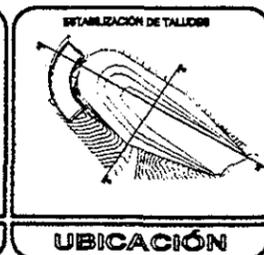
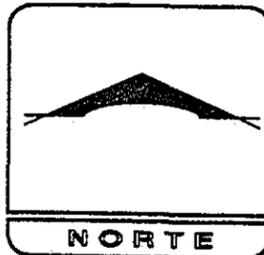


**CORTE A - A'**

ESCALA VERTICAL = 1:500  
ESCALA HORIZONTAL = 1:1000

**SIMBOLOGÍA:**

- TALUDES 1:3
- ANTIGÜO PERFIL DE RESIDUOS CONFINADOS
- TERRENO NATURAL



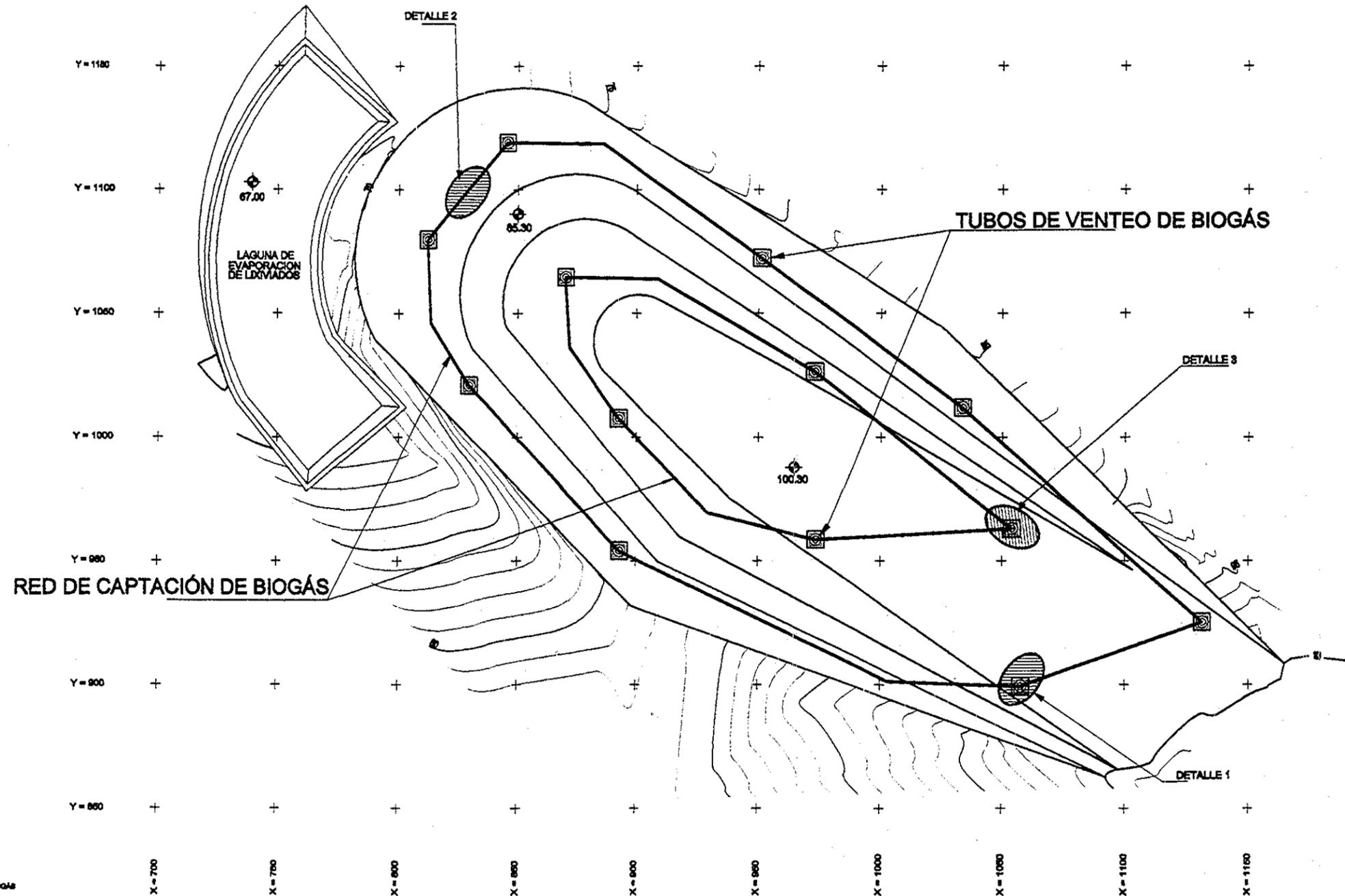
**NOTAS:**

- LOS TALUDES PRINCIPALES SERÁN 3:1 COMO MÁXIMO
- EN EL ÁREA DONDE EL PASADIZO DEBÍA DE 100.00 MTRS SE CONTEMPLA UNA PENDIENTE DEL 2% PARA ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES PROVENIENTES DE LAS AGUAS DE LLUVIA, ASÍ COMO EN TODOS LOS ANCHOS DEL SITIO

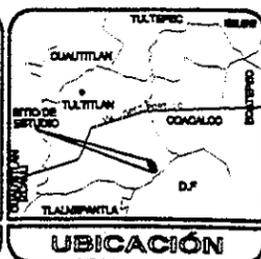
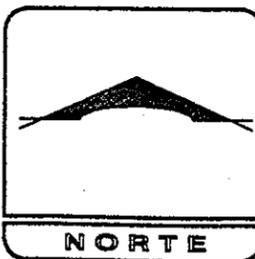
**ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLÁN, ESTADO DE MÉXICO**

<p><b>UNAM</b></p>	<p><b>INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM</b></p>	JURADO:	DESCRIPCIÓN:	ESCALA INDICADA:	UNIDADES:
		DRA. M <sup>te</sup> . TERESA ORTA LEDESMA M.L. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ M.L. CONSTANTINO GUTIÉRREZ P. M.L. LANDY I. RAMÍREZ BURGOS	<b>ESTABILIZACIÓN DE TALUDES</b>	UNIDADES: METROS	
PROYECTO: ING. REYNALDO CRUZ RIVERA		ESCALA GRÁFICA:		CLAVE: <b>K-2</b>	

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



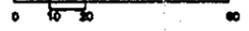
- SIMBOLOGIA:**
-  POZO DE VENTEO DE BIOGÁS
  -  CURVA DE NIVEL
  -  TUBO DE PISO PARA CAPTA BIOGÁS



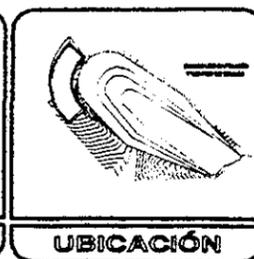
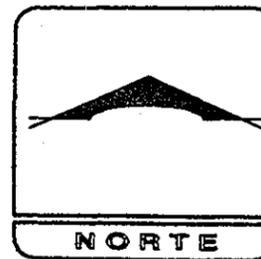
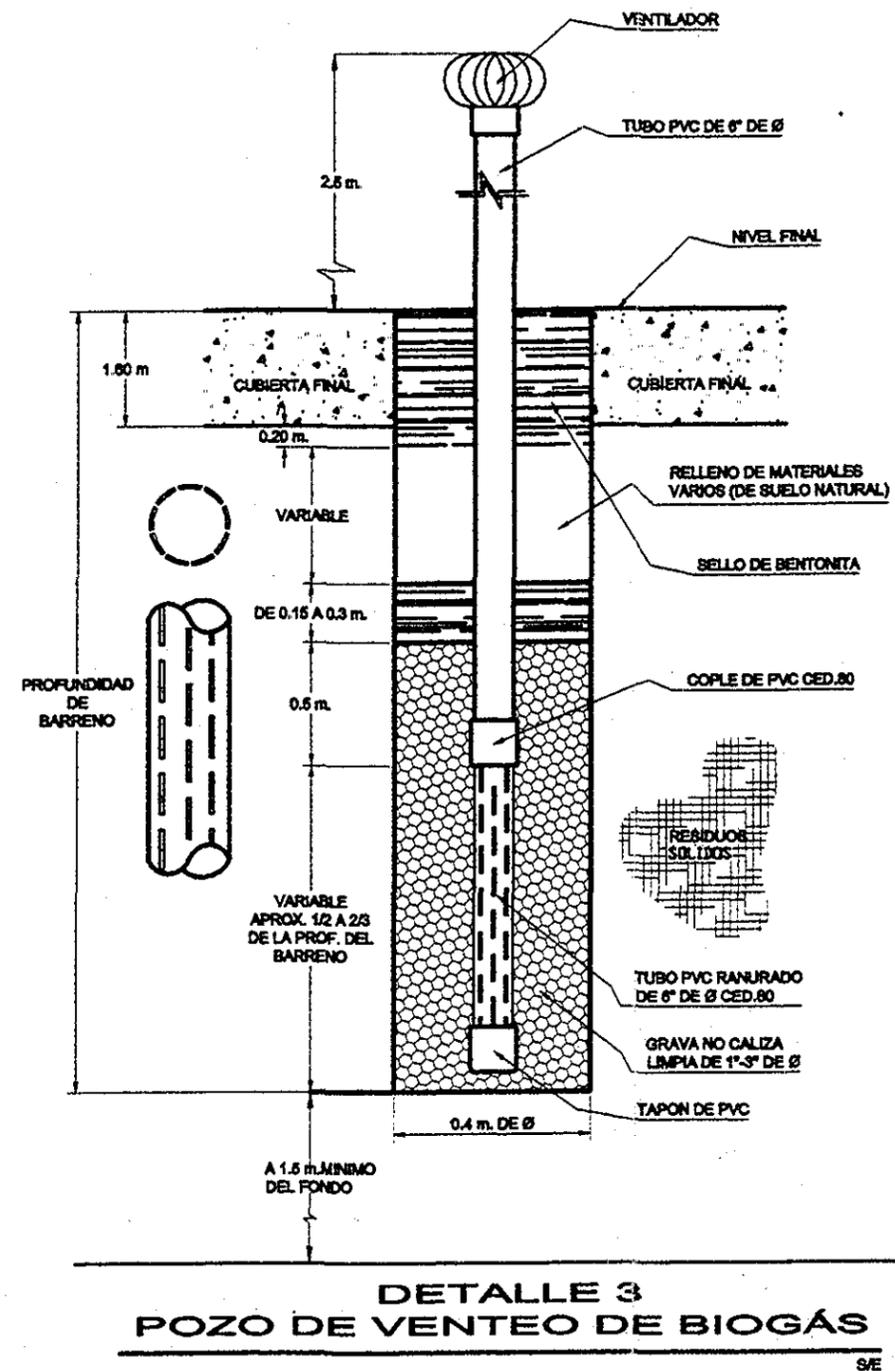
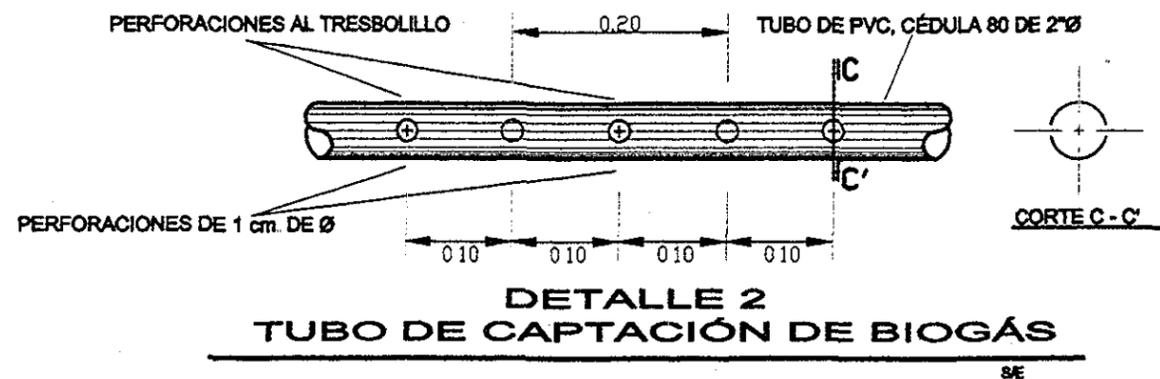
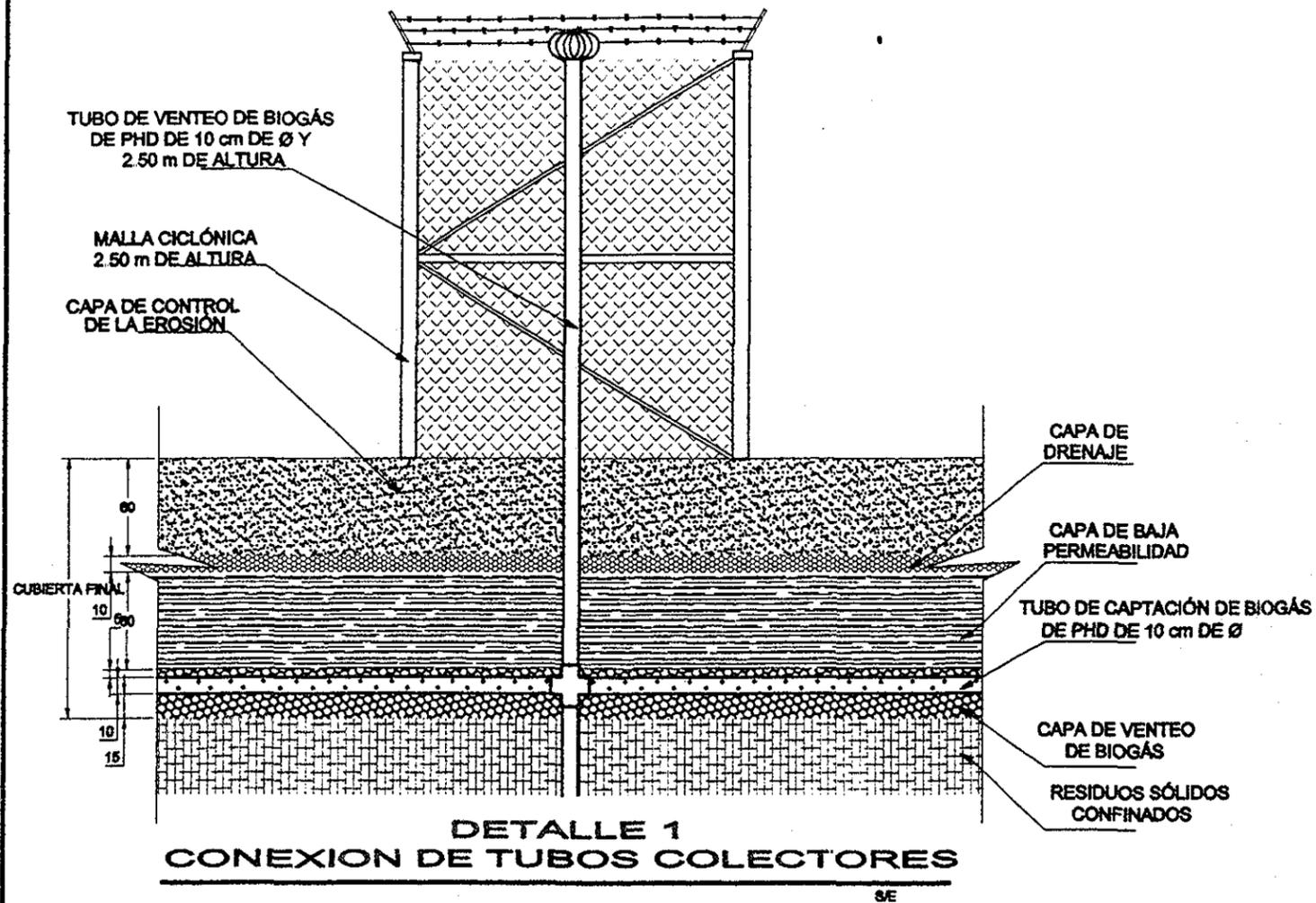
**NOTAS:**

- EL MATERIAL DE LA RED DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS SERÁ DE PISO DE 70 CM DE Ø
- EL MATERIAL ORINAL DE LA CAJA DE VENTEO DE BIOGÁS SERÁ DE Ø 15 CM O TRIZENTE DE 5 CM DE Ø
- PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CAJA DE VENTEO DE BIOGÁS SE EXIGIRÁ UNA CAPA DE 10 CM DE MATERIAL Y DESPUÉS EL TENDIDO DE LA RED
- SE UTILIZARÁN UNICIONES POR TIRAFUERTE DONDE SE REQUIERA.

**ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLAN, ESTADO DE MÉXICO**

 <b>UNAM</b>	 <b>INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM</b>	<b>JURADO:</b> DRA. M <sup>te</sup> . TERESA ORTA LEDESMA M.L. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ M.C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ P. M.L. LANDY I. RAMÍREZ BURGOS	<b>DESCRIPCIÓN:</b> <b>CONTROL DE BIOGÁS</b>	<b>ESCALA:</b> 1:500	<b>UNIDADES:</b> METROS
		<b>PROYECTO:</b> ING. REYNALDO CRUZ RIVERA	<b>ESCALA GRÁFICA:</b> 	<b>CLAVE:</b> <span style="font-size: 2em; font-weight: bold;">G - 1</span>	

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



**NOTAS:**

- LAS COTAS ESTÁN DADAS EN CENTÍMETROS
- EL MATERIAL UTILIZADO ES DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PHD) DEBIDO A SU ALTA RESISTENCIA A LAS DEFORMACIONES Y AL CONTACTO CON LÍQUIDOS DE ALTO PESO ESPECÍFICO
- LAS CONEXIONES INDICADAS SON TIPO, PUDIENDO HABER VARIACIONES Y COMBINACIONES DIFERENTES AL COMBINARLAS
- TODOS LOS POZOS DE VENTEO DEBERÁN ESTAR PROTEGIDOS CON MALLA CICLÓNICA PARA EVITAR EL DAÑO DE LOS TUBOS POR PARTE DE LOS HELADOS DEL INVIERNO
- LOS POZOS VERTICALES DE VENTEO DE BIOGÁS PODRÁN UTILIZARSE PARA LA EVACUACIÓN DE LIQUORES

ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLÁN, ESTADO DE MÉXICO

**UNAM**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM**

**JURADO:**  
DRA. M<sup>te</sup>. TERESA ORTA LEDESMA  
M<sup>te</sup>. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ  
M<sup>te</sup>. CONSTANTINO GUTIÉRREZ P.  
M<sup>te</sup>. LANDY I. RAMÍREZ BURGOS

**PROYECTO:**  
ING. REYNALDO CRUZ RIVERA

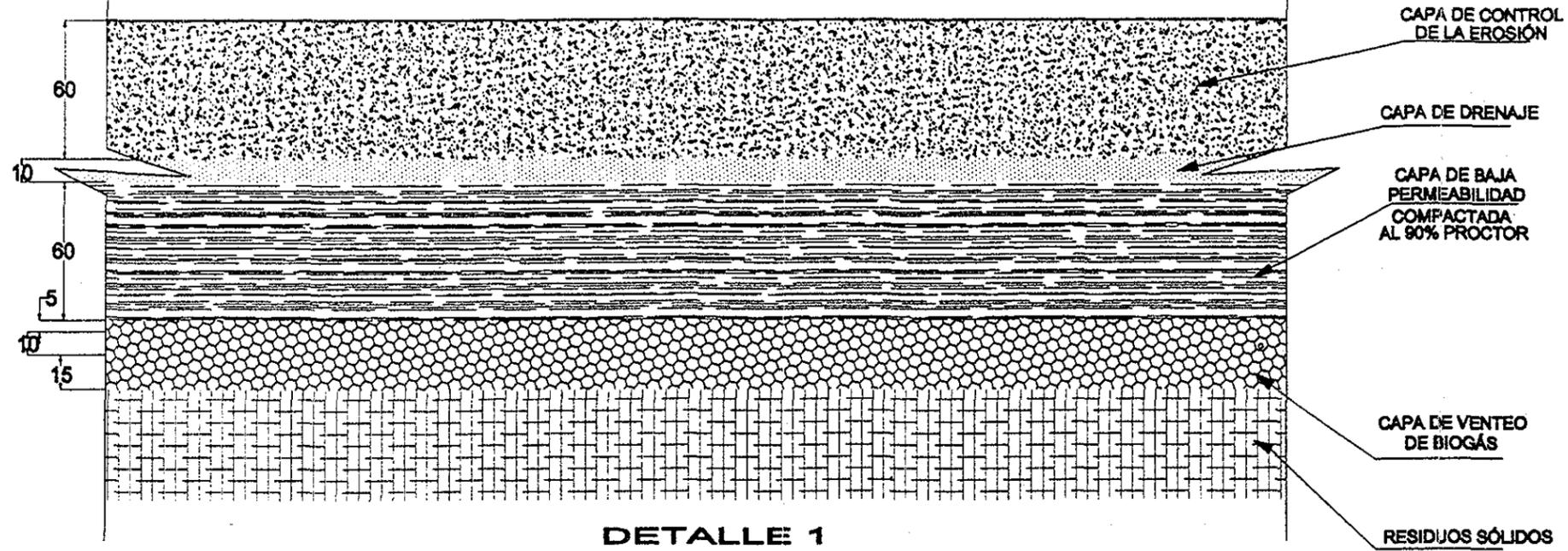
**DESCRIPCIÓN:**  
**CONTROL DE BIOGÁS**

ESCALA GRÁFICA:

ESCALA INDICADA: UNIDADES: CENTÍMETROS

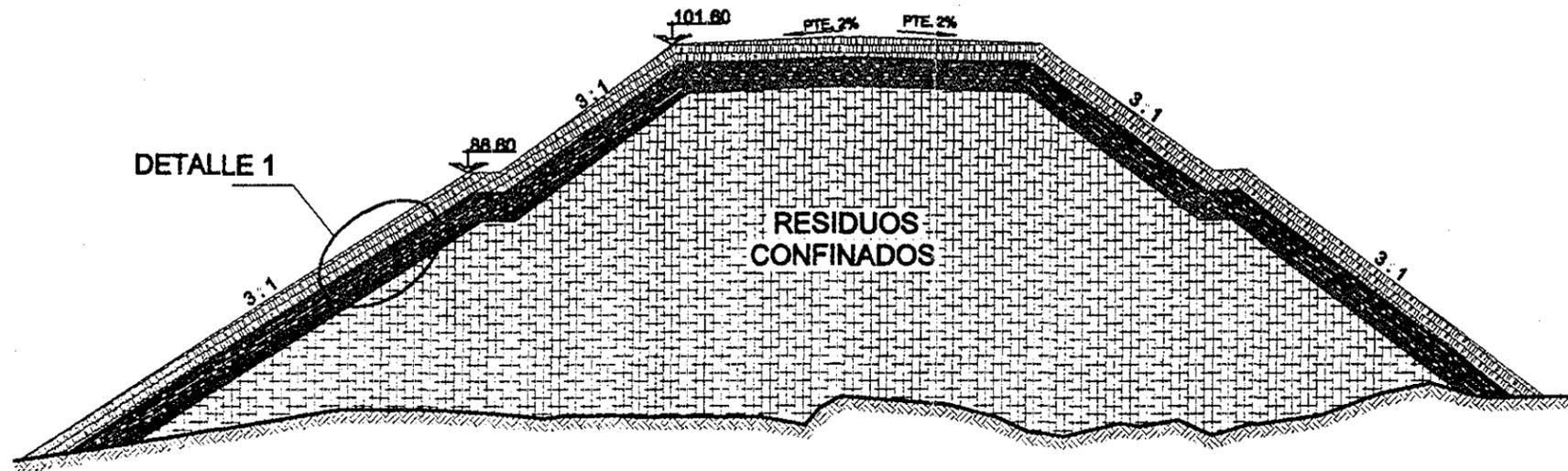
CLAVE: **G - 2**

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



**DETALLE 1**  
**CAPAS DE CUBIERTA FINAL PARA CLAUSURA**

8/E

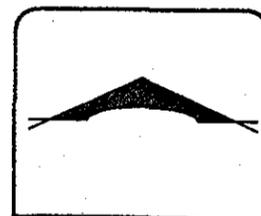


**CAPAS DE CUBIERTA PARA LA CLAUSURA**

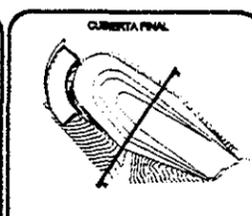
8/E

**SIMBOLOGIA:**

- TALUDES 1:3
- - - - - ANTIGUO PERFIL DE RESIDUOS CONFINADOS
- ~~~~~ TERRENO NATURAL



**NORTE**



**UBICACIÓN**

**NOTAS:**

LOS TALUDES PRINCIPALES SERÁN 3:1 COMO MÁXIMO  
EN EL ÁREA CUYA ELEVACIÓN SEERÁ DE 100.00 MÍNIM SE CONTEMPLA UNA PENDIENTE DEL 2% PARA ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES  
PROVENIENTES DE LAS AGUAS DE LLUVIA, ASÍ COMO EN TODOS LOS AVENADORES DEL SITIO

**ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLÁN, ESTADO DE MÉXICO**

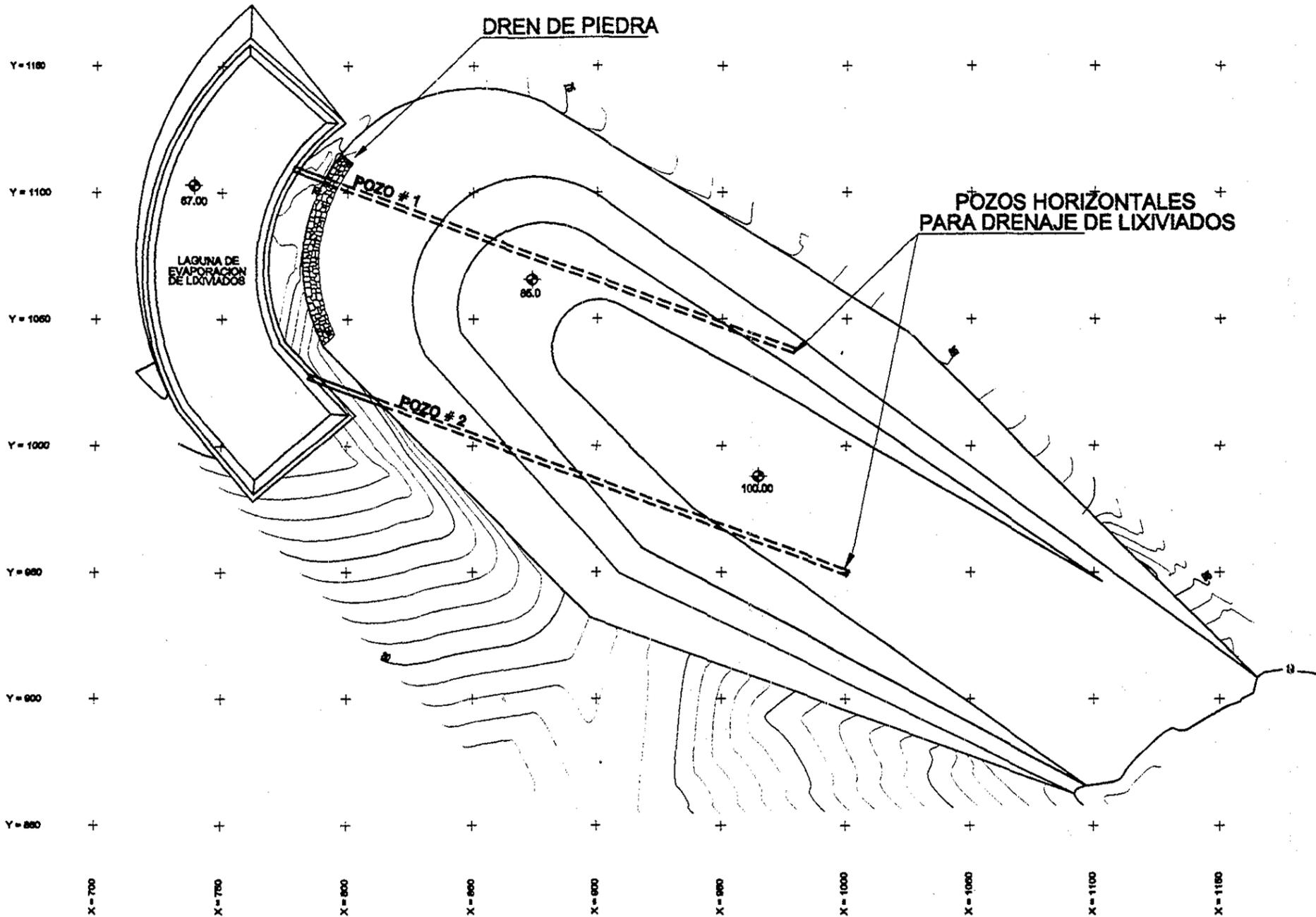


**JURADO:**  
DRA. M<sup>te</sup>. TERESA ORTA LEDESMA  
M.L. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ  
M.C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ P.  
M.L. LANDY L. RAMÍREZ BURROO  
**PROYECTO:**  
ING. REYNALDO CRUZ RIVERA

**DESCRIPCIÓN:**  
**CUBIERTA FINAL**  
**ESCALA GRÁFICA:**

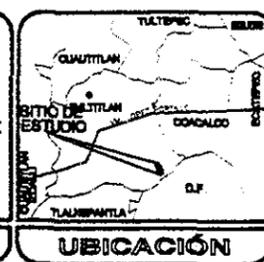
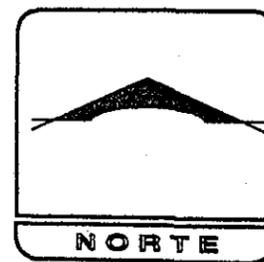
**ESCALA:**  
INDICADA  
**UNIDADES:**  
METROS  
**CLAVE:**  
**F-1**

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**



SIMBOLOGIA:

- POZO HORIZONTAL
- DREN DE PIEDRA
- CURVA DE NIVEL



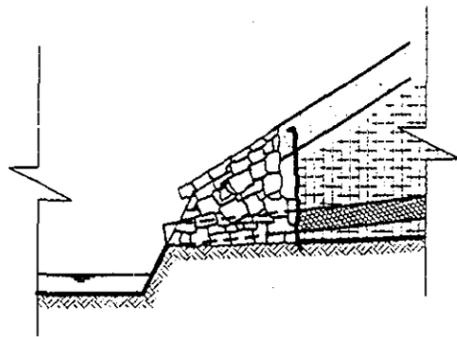
NOTAS:

- EL POZO HORIZONTAL # 1 IMPEDIRÁ A SER CONSTRUIDO EN EL PUNTO CON COORDENADAS: X=1012.1 Y=1015.1 Y TENTATIVAMENTE TERMINARÁ EN EL PUNTO CON COORDENADAS: X=1012.1 Y=1015.1
- EL POZO HORIZONTAL # 2 IMPEDIRÁ A SER CONSTRUIDO EN EL PUNTO CON COORDENADAS: X=1012.1 Y=1015.1 Y TENTATIVAMENTE TERMINARÁ EN EL PUNTO CON COORDENADAS: X=1012.1 Y=1015.1
- TODAS LAS COTAS ESTÁN DADAS EN METROS Y LAS ELEVACIONES EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR.

ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLAN, ESTADO DE MÉXICO

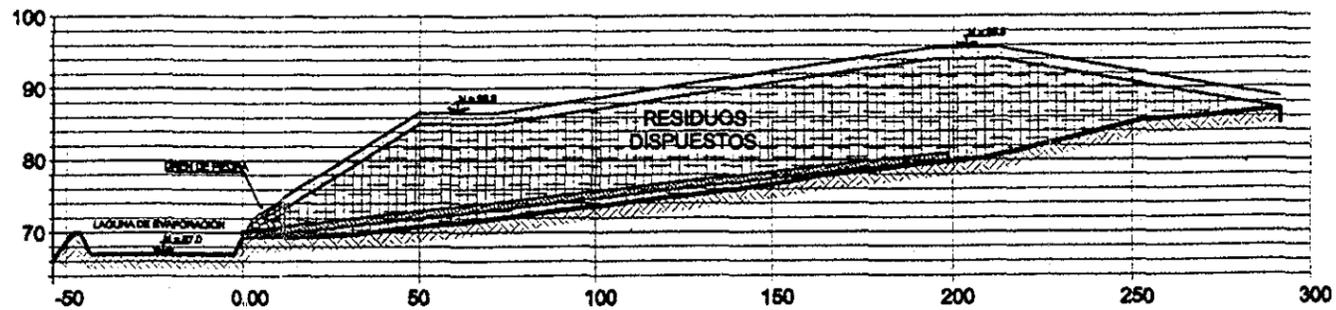
		JURADO:	DESCRIPCIÓN:	ESCALA:	UNIDADES:
		DRA. M <sup>te</sup> . TERESA ORTA LEDESMA M.L. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ M.L. CONSTANTINO GUTIÉRREZ P. M.L. LANDY L. RAMÍREZ BURGOS	<b>CONTROL DE LIXIVIADOS</b>	1:2000	METROS
PROYECTO: ING. REYNALDO CRUZ RIVERA		ESCALA GRÁFICA: 		CLAVE: 	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



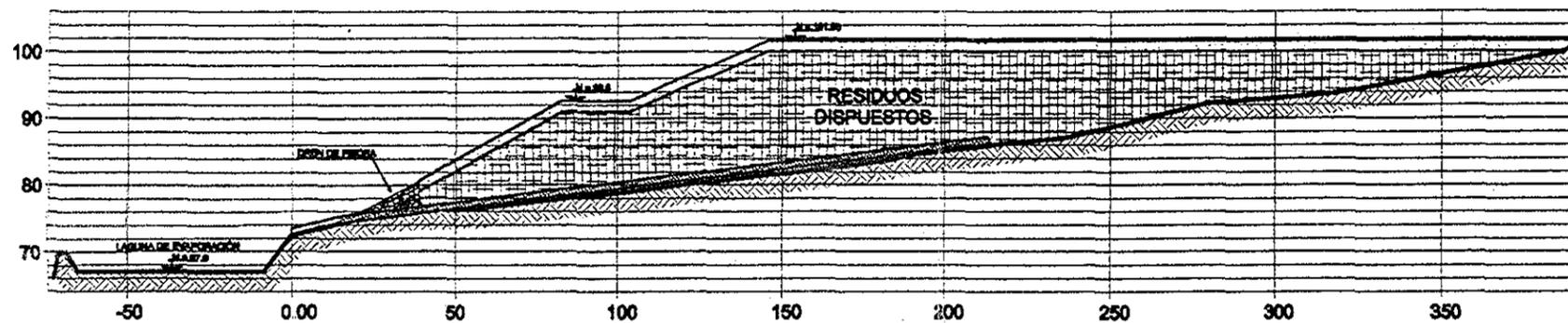
**DETALLE 1  
DREN DE PIEDRA**

8/E



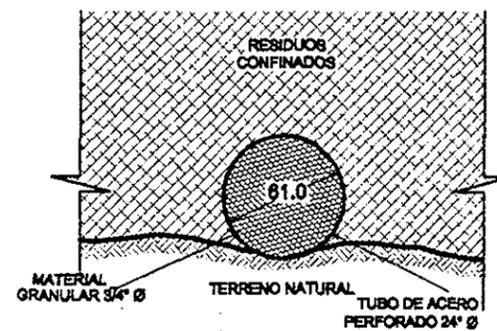
**CORTE LONGITUDINAL DE DREN # 1**

ESCALA VERTICAL = 1:1000  
ESCALA HORIZONTAL = 1:2000



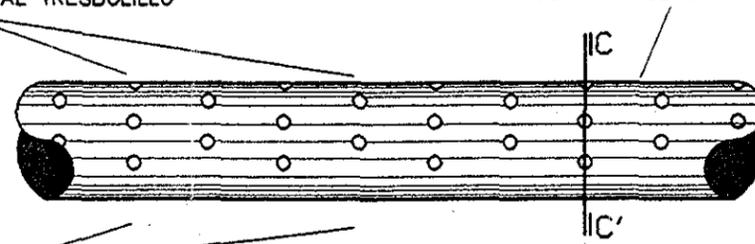
**CORTE LONGITUDINAL DE DREN # 2**

ESCALA VERTICAL = 1:1000  
ESCALA HORIZONTAL = 1:2000



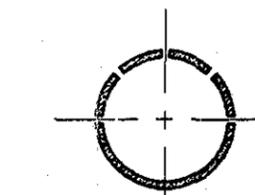
PERFORACIONES AL TRESBOLILLO

TUBO DE ACERO 24" DE Ø



PERFORACIONES DE 1 cm. DE Ø

0.20 0.20 0.20 0.20 0.20 0.20



CORTE C - C'

**DETALLE DEL TUBO COLECTOR DE LIXIVIADOS**

8/E



NORTE



UBICACIÓN

NOTAS:

EL PISO HORIZONTAL # 1 EMPEZARA A SER CONSTRUIDO EN EL PUNTO CON COORDENADAS : X=105.31, Y=96.8 Y TENTATIVAMENTE TERMINARA EN EL PUNTO CON COORDENADAS : X=115.8, Y=108.7  
EL PISO HORIZONTAL # 2 EMPEZARA A SER CONSTRUIDO EN EL PUNTO CON COORDENADAS : X=78.1, Y=97.2 Y TENTATIVAMENTE TERMINARA EN EL PUNTO CON COORDENADAS : X=122.1, Y=108.7  
TODAS LAS COTAS DEFIAN DADAS EN METROS Y LAS ELEVACIONES EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLAN, ESTADO DE MÉXICO

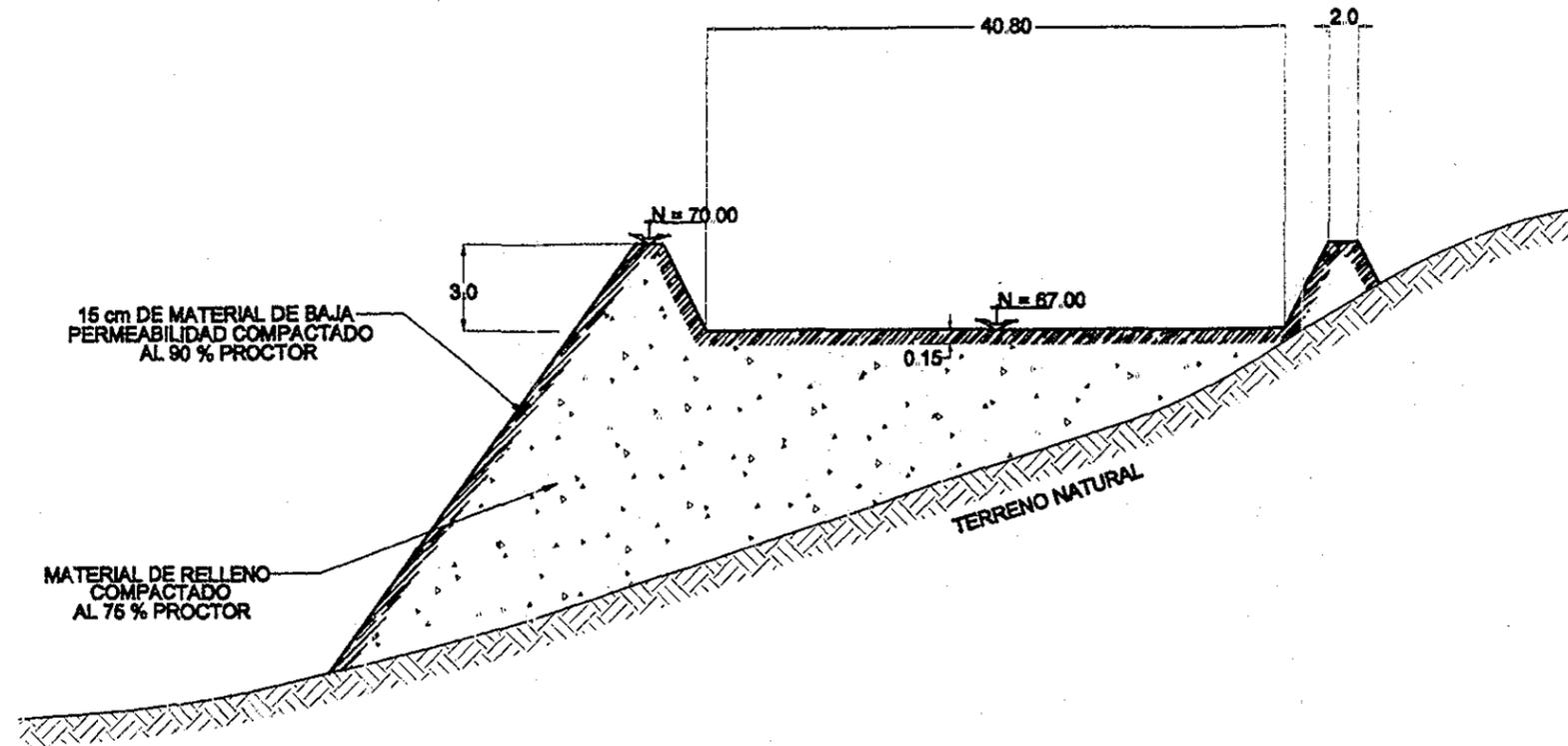
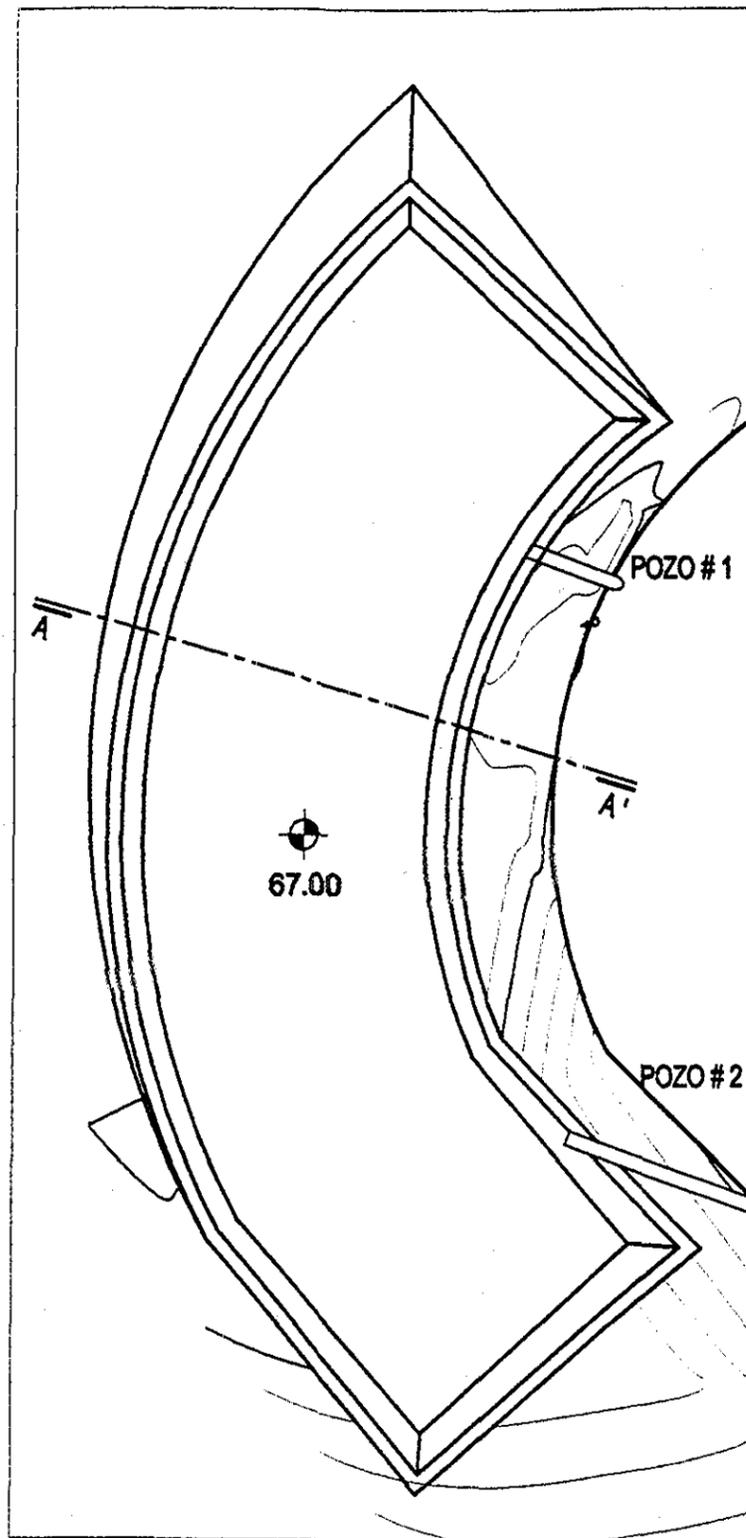


JURADO:  
DRA. M<sup>te</sup>. TERESA ORTA LEDESMA  
M.L. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ  
M.C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ P.  
M.L. LANDY I. RAMÍREZ BURGOS  
PROYECTO:  
ING. REYNALDO CRUZ RIVERA

DESCRIPCIÓN:  
**CONTROL DE LIXIVIADOS**  
ESCALA GRÁFICA:

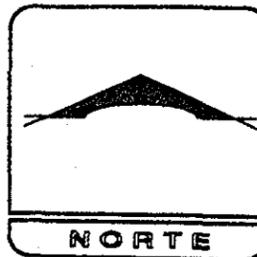
ESCALA:  
INDICADA  
UNIDADES:  
METROS  
CLAVE:  
**L-2**

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**CORTE A - A'**

ESCALA VERTICAL = 1:500  
 ESCALA HORIZONTAL = 1:1000



NOTAS:  
 - EL POZO HORIZONTAL # 1 EMPEZARÁ A SER CONSTRUIDO EN EL PUNTO CON COORDENADAS: X=108.51, Y=108.51 Y TERMINARÁ EN EL PUNTO CON COORDENADAS: X=108.51, Y=108.57  
 - EL POZO HORIZONTAL # 2 EMPEZARÁ A SER CONSTRUIDO EN EL PUNTO CON COORDENADAS: X=108.1, Y=107.2 Y TERMINARÁ EN EL PUNTO CON COORDENADAS: X=108.1, Y=107.2  
 - TODAS LAS COTAS ESTÁN DADAS EN METROS Y LAS ELEVACIONES EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR.

ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLAN, ESTADO DE MÉXICO

UNAM

INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

JURADO:

DRA. M<sup>te</sup>. TERESA ORTA LEDESMA  
 M.L. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ  
 M.C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ P.  
 M.L. LANDY L. RAMÍREZ BURGOS

PROYECTO:

ING. REYNALDO CRUZ RIVERA

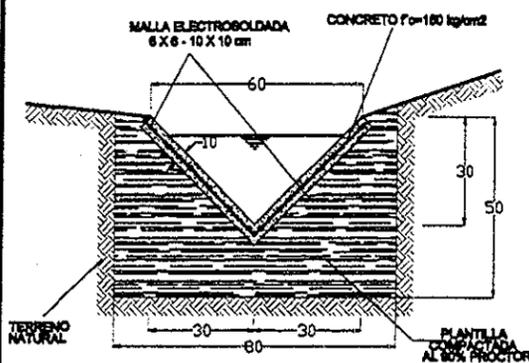
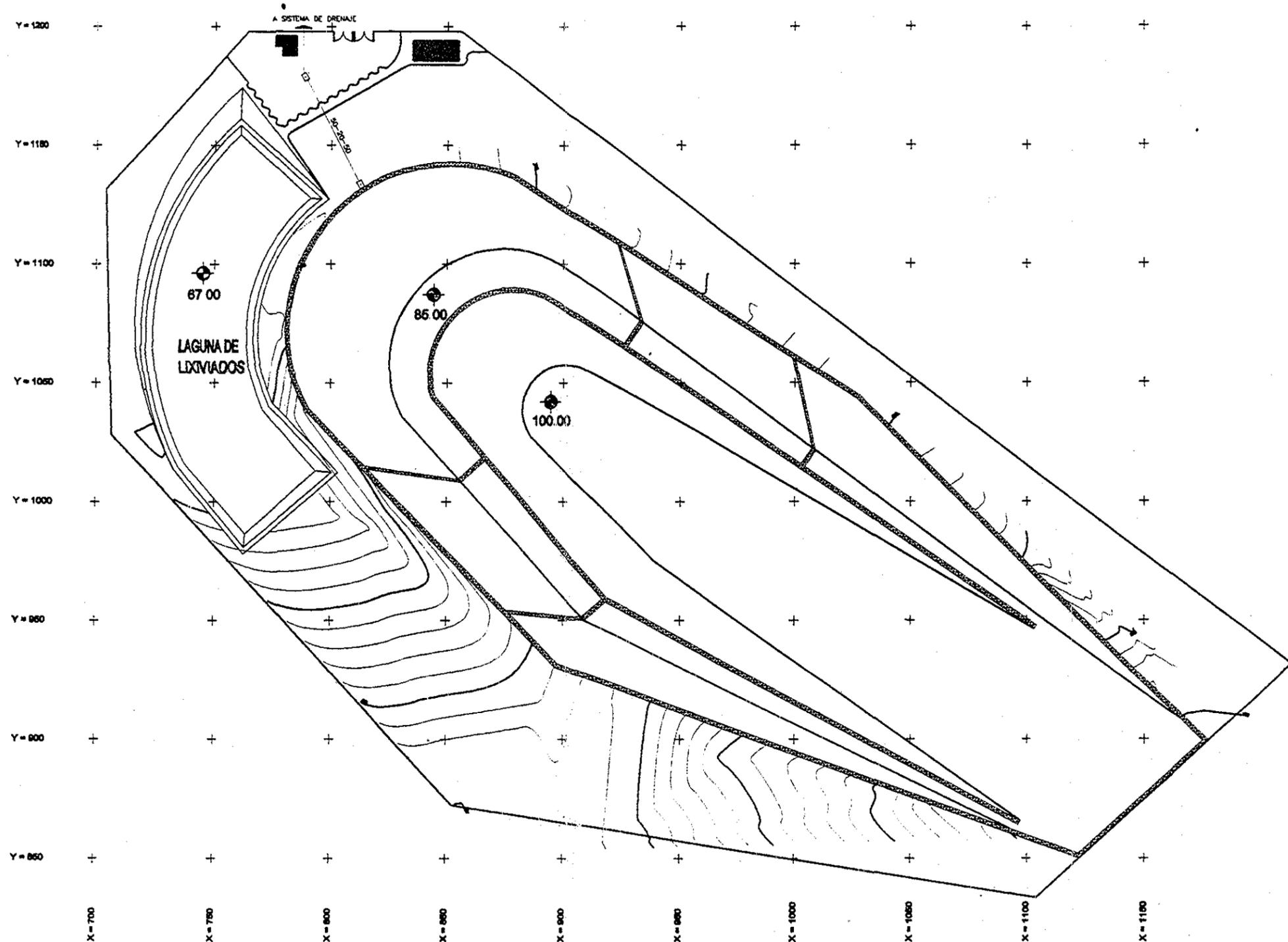
DESCRIPCIÓN:

LAGUNA DE EVAPORACIÓN DE LLOVIADOS

ESCALA GRÁFICA:

ESCALA:	UNIDADES:
1:1000	METROS
CLAVE:	
L - 3	

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



**DETALLE DE CUNETAS**

- SIMBOLOGIA:**
- DISTANCIA-PENDIENTE-DIÁMETRO DRENAJE PLUVIAL
  - NIVEL DE TALUD
  - CURVA DE NIVEL
  - CUNETAS PLUVIALES
  - REGISTRO

**NOTAS:**

- LAS CUNETAS DEBERÁN CONSTRUIRSE DE UNA PLANTILLA DE CONCRETO Fc=180 kg/cm² DE 10 CM DE ESPESOR.
- EN LA CONSTRUCCIÓN DE LAS CUNETAS SE UTILIZARÁ MALLA ELECTROBOLDADA 6 x 6 - 10 x 10
- LOS ORÍGENES SEÑALAN LAS PENDIENTES DE LOS TALUDES FINALES
- EL AGUA PLUVIAL SERÁ CONDUCCION AL SISTEMA DE DRENAJE LOCAL EXISTENTE

**ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLAN, ESTADO DE MÉXICO**



UNAM

**INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM**

**JURADO:**  
 DRA. M<sup>te</sup>. TERESA ORTA LEDESMA  
 M.L. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ  
 M.C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ P.  
 M.L. LANDY I. RAMÍREZ BURGOS

**PROYECTO:**  
 ING. REYNALDO CRUZ RIVERA

**DESCRIPCIÓN:**  
**SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL**

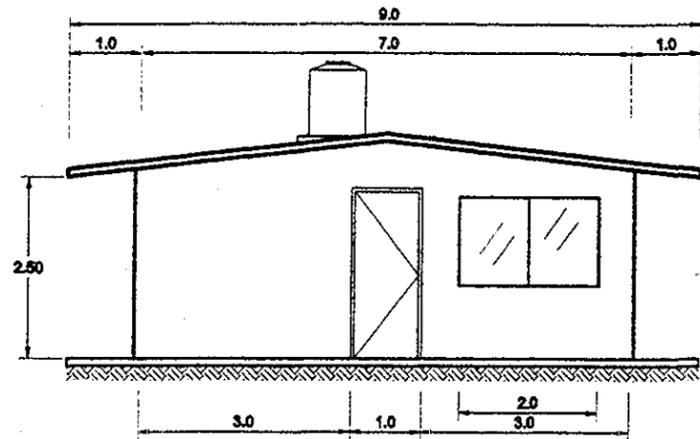
**ESCALA:** 1:2000

**UNIDADES:** METROS

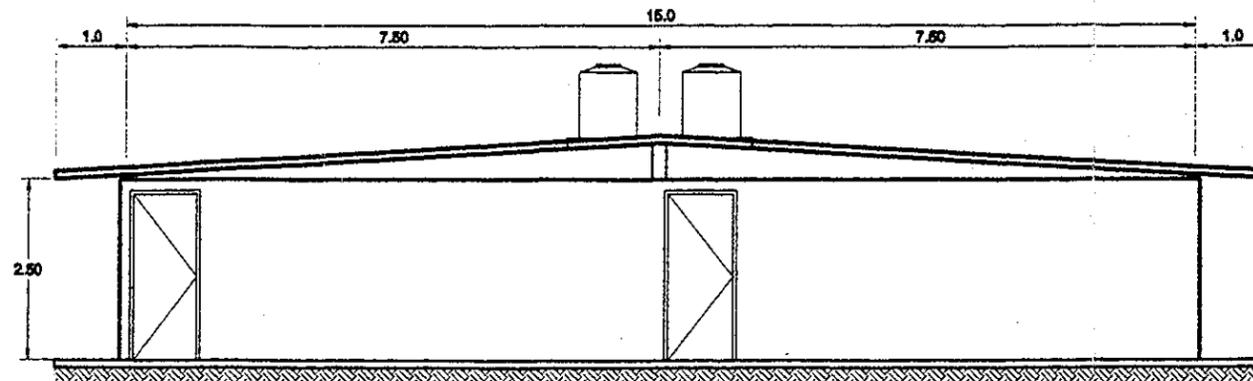
**ESCALA GRÁFICA:**

**CLAVE:** Q-1

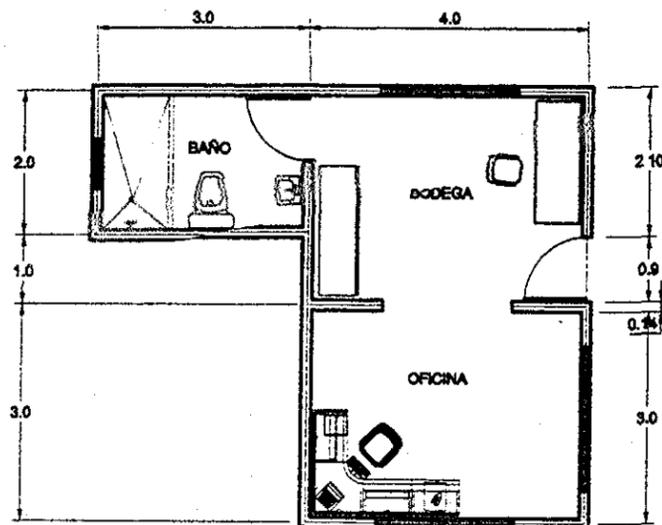
TESIS CON FALLA DE ORIGEN



FACHADA



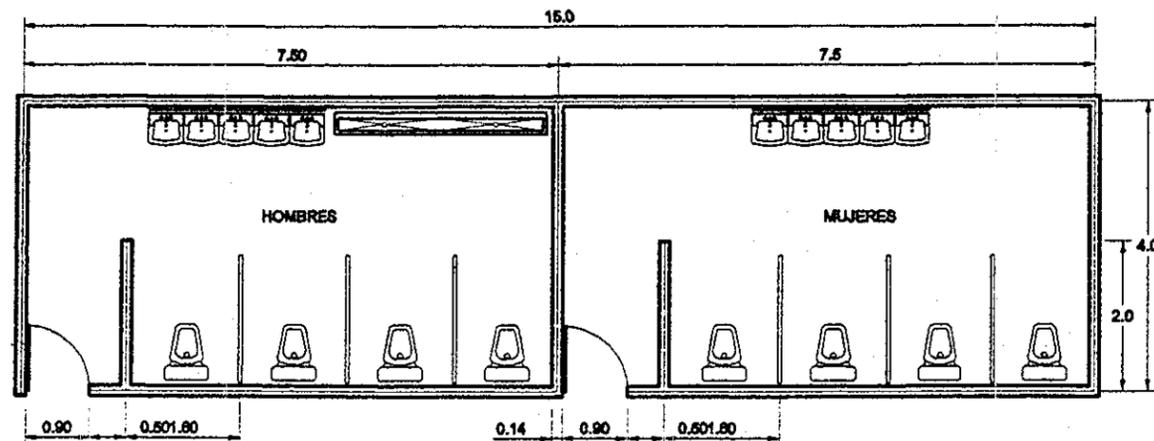
FACHADA



PLANTA

CASETA DE VIGILANCIA

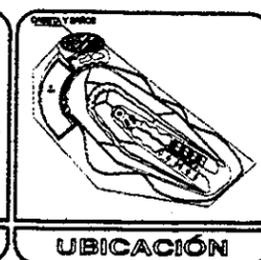
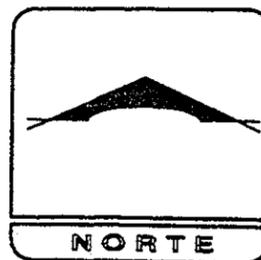
ESCALA= 1:100



PLANTA

BAÑOS GENERALES

ESCALA= 1:100



NOTAS:

ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLÁN, ESTADO DE MÉXICO



JURADO:  
 DRA. M<sup>te</sup>. TERESA ORTA LEDESMA  
 M.L. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ  
 M.C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ P.  
 M.L. LANDY L. RAMÍREZ BURGOS

PROYECTO:  
 ING. REYNALDO CRUZ RIVERA

DESCRIPCIÓN:  
**CASETA Y BAÑOS**

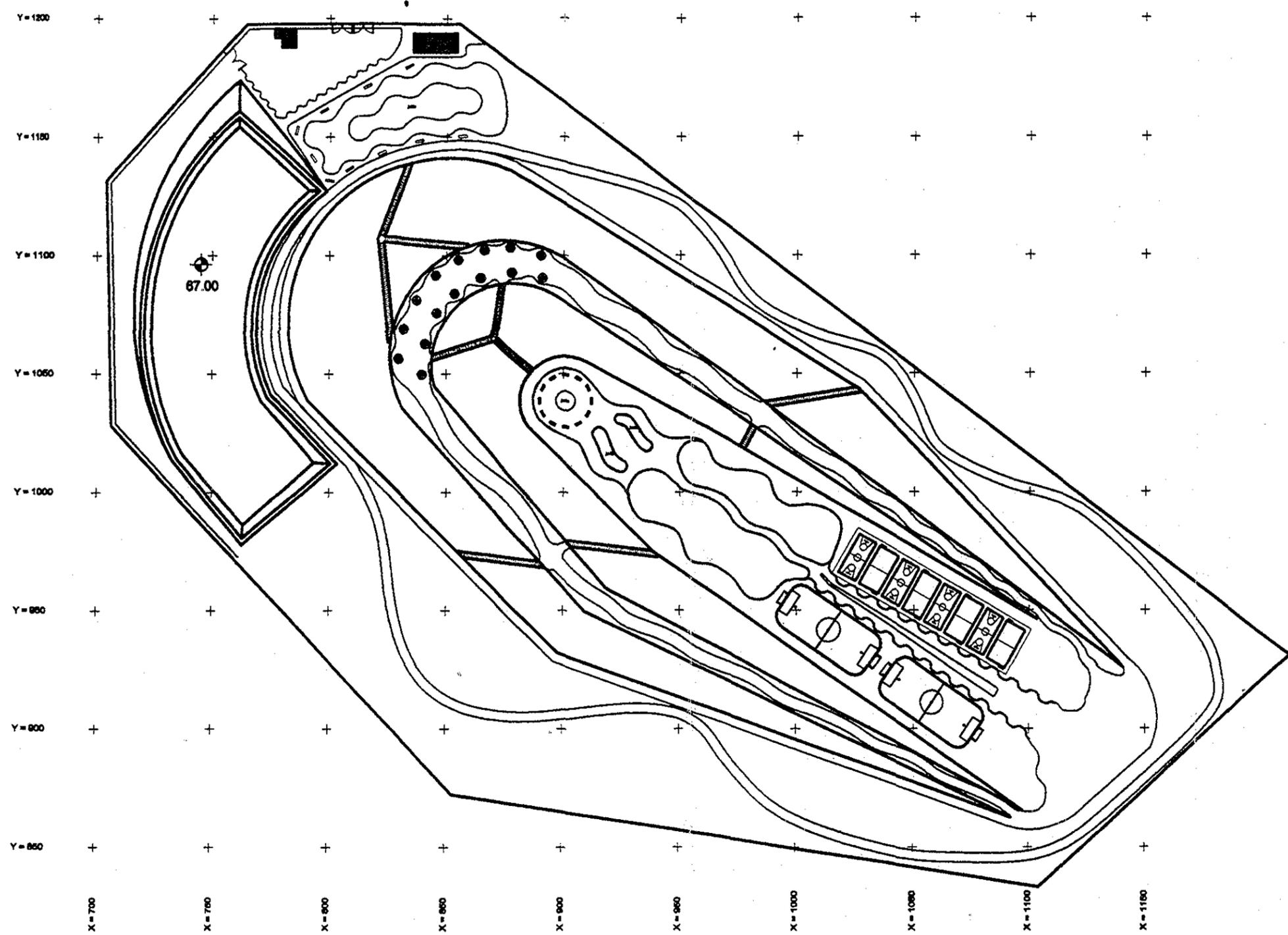
ESCALA GRÁFICA:

ESCALA:  
 1:100

UNIDADES:  
 METROS

CLAVE:  
**C-1**

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



AREA=107,798.68 m2

**SIMBOLOGIA:**

- TALUDES 1:3
- NIVEL DE TALUD
- CURVA DE NIVEL
- PENDIENTE DEL 2 %



**NOTAS:**

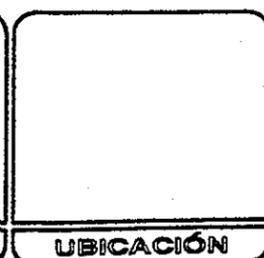
- LOS TALUDES PRINCIPALES SERÁN 2:1 COMO MÍNIMO
- EN EL ÁREA CUYA SITUACIÓN SEÑALA DE 100.00 MMSI SE CONTEMPLA UNA PENDIENTE DEL 2% PARA ESCORRIMIENTOS SUPERFICIALES PROVENIENTES DE LAS AGUAS DE LLUVIA, ASÍ COMO EN TODOS LOS ANCHOS DEL SITIO

<b>ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLAN, ESTADO DE MÉXICO</b>			
		<b>JURADO:</b> DRA. M.L. TERESA ORTA LEDESMA M.L. JORGE BÁNCHEZ GÓMEZ M.L. CONSTANTINO GUTIÉRREZ P. M.L. LANDY I. RAMÍREZ BURGOS	<b>DESCRIPCIÓN:</b> <b>PLANTA ARQUITECTÓNICA</b> <b>ESCALA GRÁFICA:</b> 
<b>PROYECTO:</b> ING. REYNALDO CRUZ RIVERA		<b>ESCALA:</b> 1:2000	<b>UNIDADES:</b> METROS <b>CLAVE:</b> <span style="font-size: 2em; font-weight: bold;">A-1</span>

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

95

ACTIVIDAD	SECUENCIA DE ACTIVIDADES DE CLAUSURA																								
NUEVO SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL	■																								
REUBICACIÓN DE PEPENADORES		■																							
CONSTRUCCIÓN DE CERCA PERIMETRAL			■																						
INSTALACIÓN DE AVISOS INFORMATIVOS				■																					
CONTROL DE ACCESOS					■																				
LIMPIEZA DEL AREA CERCADA						■																			
EXTERMINIO DE FAUNA NOCIVA							■																		
DESMONTE, DESENRAICE, DESYERBE Y LIMPIA DE TERRENO								■																	
EXCAVACIÓN EN TALUDES PARA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS									■																
FORMACIÓN DE TALUDES DE DISEÑO										■															
CONSTRUCCIÓN DE POZOS PARA VENTEO DE BIOGÁS											■														
CONSTRUCCIÓN DE POZOS HORIZONTALES												■													
CONSTRUCCIÓN DE LAGUNA DE EVAPORACIÓN													■												
CONSTRUCCIÓN DE DREN PARA EVACUACIÓN DE LIXIVIADOS														■											
FORMACION DE CAPA DE VENTEO															■										
TENDIDO DE TUBOS DE PVC																■									
FORMACIÓN DE CAPA DE BAJA PERMEABILIDAD																	■								
FORMACIÓN DE CAPA DE DRENAJE																		■							
FORMACIÓN DE CAPA DE CONTROL DE LA EROSIÓN																			■						
CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y ANDADORES																				■					
COLOCACIÓN DE INSTALACIONES DEPORTIVAS																					■				
COLOCACIÓN DE PASTO																						■			
COLOCACIÓN DE JARDINERÍA																							■		



NOTAS:  
 EL DIAGRAMA SOLO MUESTRA LA SECUENCIA DE ACTIVIDADES, YA QUE PARA ELLO SE REQUIEREN LOS RECURSOS CORRESPONDIENTES AL PERSONAL Y LA MAQUINARIA NECESARIA, POR LO QUE ELLO SE ENCUENTRA FUERA DEL ALCANCE DE ESTE TRABAJO

ANTEPROYECTO DE LA CLAUSURA DEL TIRADERO A CIELO ABIERTO DEL MUNICIPIO DE TULTITLAN, ESTADO DE MÉXICO

UNAM

INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

JURADO:  
 DRA. M<sup>te</sup>. TERESA ORTA LEDESMAN  
 M.L. JORGE SÁNCHEZ GÓMEZ  
 M.C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ P.  
 M.L. LANDY I. RAMÍREZ BURGOS

PROYECTÓ:  
 ING. REYNALDO CRUZ RIVERA

DESCRIPCIÓN:  
 DIAGRAMA DE OBRA

ESCALA GRÁFICA:

ESCALA: UNIDADES:

CLAVE:  
D-1

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

96

APÉNDICE

A1. BALANCE HIDRÁULICO

En el cuadro A1 se muestra la composición de los RSM del municipio de Tultitlán utilizada para la determinación de la cantidad de lixiviados generados.

Cuadro A1. Datos utilizados para el balance de agua de Tultitlán, México.

Parámetro	
Carbono	43.02 %
Hidrógeno	5.96%
Oxígeno	49.08%
Nitrógeno	1.94 %
Capacidad de campo	1.62 L/Kg
Peso volumétrico de los RSM confinados	700 Kg/m <sup>3</sup>
Porosidad: n	40 %
H =	45 %
Porcentaje base humedad de materia degradable	80%
Porcentaje en base seca de cenizas en materia degradable	5 %
Peso del aire	1 Kg/m <sup>3</sup>

A1.1 Determinación de la fórmula mínima de los residuos sólidos.

Para determinar los diferentes tipos de procesos que se dan dentro de los RSM confinados, es necesario obtener primero la fórmula mínima que represente químicamente a los residuos sólidos; para ello se deben determinar los contenidos de carbono, Hidrógeno y Oxígeno que se requieren para establecer esta fórmula, en la tabla A2 se presentan los diferentes valores de los elementos que se han mencionado

Cuadro A2 Parámetros para la determinación de la fórmula mínima de los residuos sólidos municipales

ELEMENTOS	VALORES
Carbono	43.02%
Hidrógeno	5.96%
Oxígeno	49.08 %
Nitrógeno	1.94 %

Con los valores de la tabla anterior, y ajustándolos al 100% con base en el porcentaje de materia orgánica los valores considerados para obtener la fórmula mínima de la basura será de la siguiente manera:

Cuadro A3. Valores ajustados al 100%

ELEMENTOS	VALORES
Carbono	43.02/12
Hidrógeno	5.96/1
Oxígeno	49.08/16
Nitrógeno	1.94 /14



Para mayor facilidad se toma al carbono como base y se obtiene la siguiente expresión:

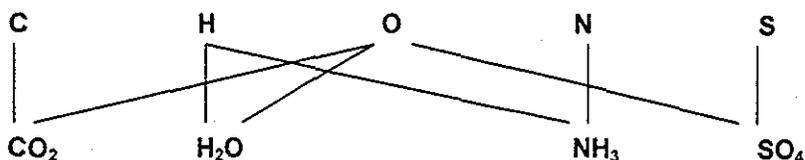


La anterior se denomina como fórmula mínima de los residuos sólidos, y es la que representa en cuanto a composición química a los residuos sólidos en estudio.

Los residuos sólidos se descomponen en dos fases principales en la fase aerobia y en la fase anaerobia; en la fase aerobia la fracción orgánica está sujeta a la oxidación, por lo que a continuación

se determina las relaciones entre los elementos presentes en la descomposición de los residuos sólidos en la fase aerobia

**Fase Aerobia**



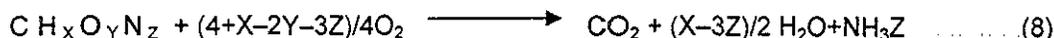
A partir de esta fórmula es posible determinar el CO<sub>2</sub>, el H<sub>2</sub>O y el NH<sub>3</sub>, que se formarán en esta fase de la degradación de los residuos sólidos, mediante la siguiente ecuación estequiométrica:



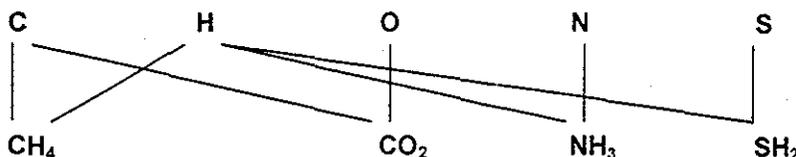
Resolviendo la ecuación por el método de coeficientes indeterminados se tiene:

- Para el Carbono 1 = B ..... (2)
- Para el Hidrógeno X = 2D + 3E ..... (3)
- Para el oxígeno Y + 2A = 2B + D ..... (4)
- Para el Nitrógeno Z = E ..... (5)
- De (6.3-5) y (6.3-7) D = (X + 3Z)/2 ..... (6)
- De (6.3-6), (6.3-8) y (6.3-4) A = (4 + X - 2Y - 3Z)/4 ..... (7)

Sustituyendo (2), (5), (6) y (7) en (1) se tiene la ecuación que gobierna la descomposición aerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos:



**Fase Anaerobia**



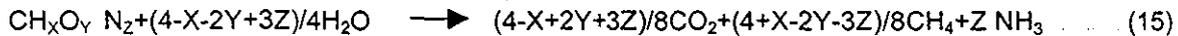
A partir de la fórmula anterior se determina el CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, así como el NH<sub>3</sub>. En esta fase de descomposición la fracción orgánica esta sujeta a la reducción que le proporciona el H<sub>2</sub>O que se encuentra en los elementos que contienen los residuos sólidos



De la misma manera que se resolvió la ecuación estequiométrica anterior, se resuelve esta, por el método de coeficientes indeterminados:

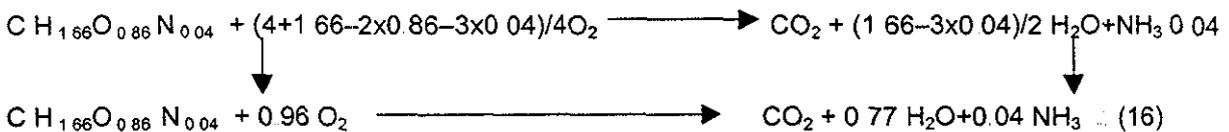
- Para el Carbono 1 = B + D ..... (10)
- Para el Hidrógeno 2A + X = 4D + 3E ..... (11)
- Para el oxígeno Y + A = 2B ..... (12)
- Para el Nitrógeno Z = E ..... (13)
- De (10) y (13) 2A + X = 4D + 3Z ..... (14)

Resolviendo las ecuaciones (10), (12) y (14) y remplazando en (9) se obtiene la ecuación que gobierna la descomposición anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos:



### A1.2 Cálculo de la Humedad y el oxígeno en la fase aerobia de la degradación de los residuos sólidos.

Partiendo de la ecuación estequiométrica (8), y sustituyendo en esta ecuación los valores obtenidos para la expresión química mínima de los residuos sólidos en donde se toma como base el carbono obteniendo lo siguiente:



Por lo tanto la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica de los residuos sólidos en la fase aerobia es de :

$$C H_{1.66} O_{0.86} N_{0.04} + (4+1.66-2(0.86)-3(0.04))/4O_2 = 1X_{12} + 1.66 X_1 + 0.86 X_{16} + 0.04 X_{14} = 27.98$$

$$0.96O_2 = 0.96 X_{16} X_2 = 30.72$$

$$30.72/27.98 = 1.09$$

El anterior valor nos indica que para estabilizar 1 gr de materia orgánica de los residuos sólidos se requiere 1.1 gr de O<sub>2</sub>

De la misma manera se obtiene la cantidad de agua que se produce en este proceso, que es de :

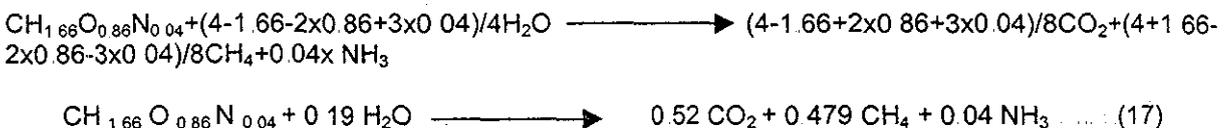
$$0.77 H_2O = 0.77 X (2 X_1 + 16) = 13.86$$

$$13.86 / 27.98 = 0.495$$

El anterior valor nos indica que por cada 1 gr de residuos sólidos que se estabiliza, se produce 0.5 gr de H<sub>2</sub>O

### A1.3 Cálculo de la humedad requerida para la estabilización de los residuos sólidos, en la fase anaerobia.

Partiendo de la ecuación estequiométrica (15), y sustituyendo en esta ecuación los valores obtenidos para la expresión química mínima de los residuos sólidos en donde se toma como base el carbono, obteniendo lo siguiente



La cantidad de agua requerida es de:

$$0.19 H_2O = 0.19 X ((2 X_1) + 16) = 3.42$$

$$3.42 / 27.98 = 0.12$$

Lo que quiere decir que se requieren 0.12 gr de agua para estabilizar 1gr. de basura.

## A2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS PARA LA APLICACIÓN DEL BALANCE DE AGUA

Es muy evidente que la importancia que tiene la cantidad y calidad de lixiviados en un sitio de disposición final es muy alta, por ello es que en esta sección se utiliza una metodología adaptada para estimar la generación de lixiviados en un metro cúbico de confinamiento de residuos sólidos; la metodología aplicada está basada en el método de balance de agua desarrollada por C. W. Thornthwaite.

Esta metodología desarrollada por Thornthwaite, establece una relación entre la hidrología básica de superficie con la hidrología subterránea, a través de las cuales las variaciones en la cantidad de agua vienen determinadas por la diferencia entre las entradas y salidas de todas las fuentes posibles a nuestro volumen en estudio. A continuación se presentan los parámetros que emplea el método y las fórmulas para su determinación.

- a) Precipitación ( $h_p$ ), y se mide en milímetros (mm.).
- b) Capacidad de campo del suelo ( $C_c$ ), expresada en milímetros (mm)
- c) Capacidad de infiltración
- d) Escurrimiento superficial. Calculada con la siguiente expresión

$$E = h_p - K_e \quad (18)$$

Donde:

- $h_p$  : Es la altura de precipitación media mensual ( mm )
- $K_e$  : Coeficiente de escurrimiento que depende del tipo de suelo en estudio, adimensional.
- $E$  = Escurrimiento superficial mensual (mm.)

- a) *Evapotranspiración* ( $E$ ), y se mide en milímetros ( mm. ).
- b) *Evapotranspiración potencial* ( $E_p$ ), y se mide en milímetros ( mm. )
- c) *Evapotranspiración real* ( $E_r$ ) Para la medición de la Evapotranspiración C. W. Thornthwaite estableció una correlación entre la temperatura media mensual y la evapotranspiración media mensual, determinando las siguientes ecuaciones:

$$i = (T_j / 5)^{1.514} \quad (19)$$

$$ET = 16 \left( \frac{10 T}{I} \right)^{12} \quad (20)$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} ij \quad (21)$$

$$a = 0.49239 + 1972.10E-5 I - 771.10E-7 I^2 + 675.10E-9 I^3 \quad (22)$$

Identificando a cada uno de los términos anteriores como:

ET = Evapotranspiración potencial sin corregir, en mm.

$T_j$  = Temperatura media mensual, en °C

$I$  = Sumatoria de los índices mensuales de calor tomando meses de 30 días con 12 horas diarias de sol, adimensional.

$ij$  = Índice mensual de calor, adimensional.

$a$  = Coeficiente que está en función de la sumatoria de los índices mensuales de calor, adimensional.

$j$  = Número del mes considerado.

Finalmente se hace una corrección tomando en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar, y se llega a la expresión siguiente:

$$ET_p = K_c \times ET \quad \dots \dots \dots (23)$$

Donde:

$K_c$  = Es el coeficiente que toma en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar.

$ET$  = Evapotranspiración potencial mensual sin ajuste, en mm.

$ET_p$  = Evapotranspiración potencial mensual ajustada, en mm

h) Infiltración

$$I_j = h_p - h_p K_e - ET_p \quad \dots \dots \dots (24)$$

Donde:

$I_j$  = Infiltración mensual, en mm.

$h_p$  = Altura de precipitación mensual, en mm

$K_e$  = Coeficiente de escurrimiento mensual, adimensional.

$ET_p$  = Evapotranspiración potencial mensual, en mm.