

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCION DE  
LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANTTARIO DE  
SALINAS VICTORIA, N. L.

Por  
ELIAS VAZQUEZ GODINA

Como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRIA EN CIENCIAS con Especialidad en  
Ingeniería Ambiental

Octubre 2001

2001

c.1

.v3

TM

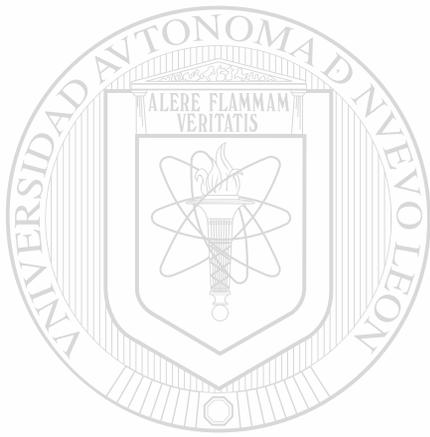
TH6021

CUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCION DE

LIXIVIADOS EN EL REILLENADO SANITARIO DE

SALLINAS VICTORIA, N. L.

E. V. G.



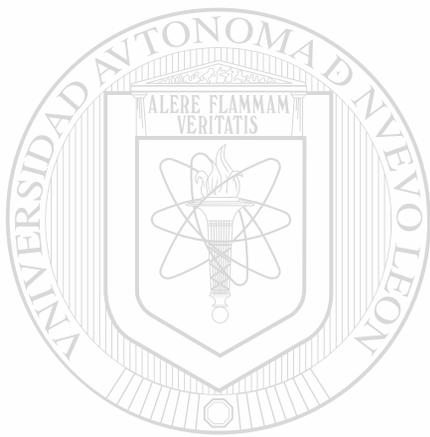
# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



# UANL

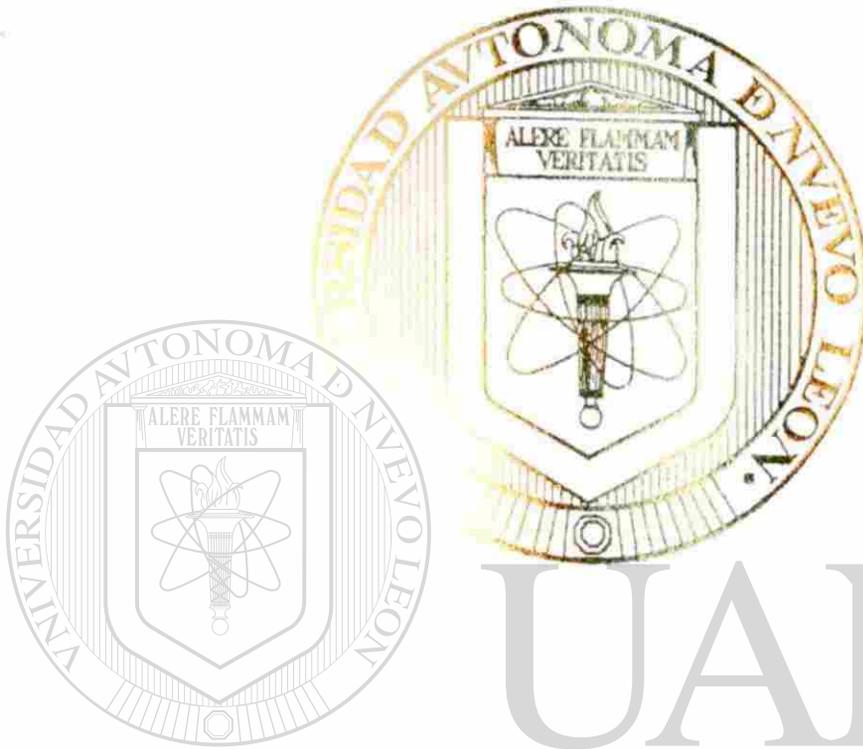
---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**  
**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
ESTADÍSTICA DE LA PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS  
ESTUARIO DE SALINAS VICTORIA, N.L. ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Por

VAZQUEZ GODINA

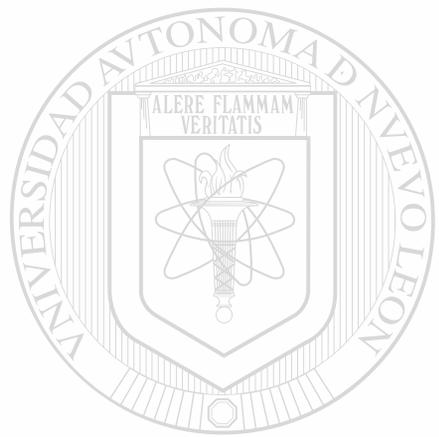
Trabajo de tesis parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS con Especialidad en  
Ingeniería Ambiental

Octubre del 2001

TM  
THG021

.V3

C.1



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN<sup>®</sup>  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

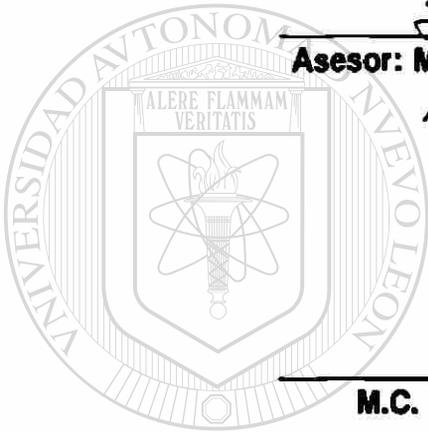


**CUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS  
EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, N.L.**

Aprobación de Tesis:



**Asesor: M.I.A. Martha V. Herrejón Figueroa**



**M.C. Vladimir Sánchez Hernández**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

®



**M.C. Ing. Benjamín Limón Rodríguez**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**Ing. Elías Vázquez Godína**

PRESENTE

Por medio de la presente se le informa que el *Comité de Maestría* ha evaluado su tesis **"CUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, N.L."**, que presentó Usted como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental. El resultado definitivo de la evaluación de su tesis es de APROBADA. Todo lo anterior es atendiendo a los artículos 112 y 114 del Reglamento General de los Estudios de Posgrado de la UANL.

ducación  
POR LA VIDA

Sin otro particular por el momento, quedo a sus ordenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

**A T E N T A M E N T E**

**"ALERE FLAMMAM VERITATIS"**

**Cd. Universitaria, a 22 de octubre del 2001**

**M. E. C. Francisco Gámez Treviño**

**Presidente del Comité de Maestría**

Av. Pedro de Alba,  
Cd. Universitaria,  
Apartado Postal 58-F  
San Nicolás de los Garza,  
Nuevo León, México.

C.c.p. : Archo

☎ (01) 8329 4060 • 8352 4850 Fax: Ext. 106

<http://www.uanl.mx/facs/fic/>

San Nicolás de los Garza, N.L., Octubre 11 del 2001

**DR. RICARDO GONZÁLEZ ALCORTA**  
Secretario del Comité de Maestría  
Presente.-

En atención al oficio, en el que se me informa que he sido designado como EVALUADOR de la tesis "**CUANTIFICACIÓN Y EFECTOS DE LA PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, N.L.**", que presenta el **Ing. Elías Vázquez Godina**, como requisito parcial para obtener el Grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en **Ingeniería Ambiental**, comunico a usted que he revisado y evaluado la calidad de dicha tesis, considerándola como **APROBADA**.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

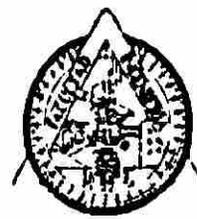
**ATENTAMENTE**



**M.C. VLADIMIR SÁNCHEZ HERNÁNDEZ**



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**Facultad de Ingeniería Civil**  
**Departamento de Ingeniería Ambiental**



San Nicolás de los Garza, N.L. a 5 de septiembre de 2001

**DR. RICARDO GONZALEZ ALCORTA**  
Secretario de Postgrado de la Facultad  
de Ingeniería Civil de la U.A.N.L.  
**Presente.-**

Por este conducto me permito comunicar a usted, que después de haber revisado la evaluación de la tesis "CUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, N.L.", que presenta el Ing. Elías Vázquez Godina como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental, me permito comunicarle que dicho documento cumple con los objetivos y la hipótesis planteada en el mismo, por lo que considero que el Ing. Vázquez Godina ha cumplido con este requisito, de acuerdo a la reglamentación en vigor.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Atentamente.-

**M.C. BENJAMIN LIMON RODRIGUEZ**  
Jefe del Depto. de Ingeniería Ambiental

C.c.p. Archivo  
erf\*



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**  
**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**COMPROBANTE DE CORRECCION**

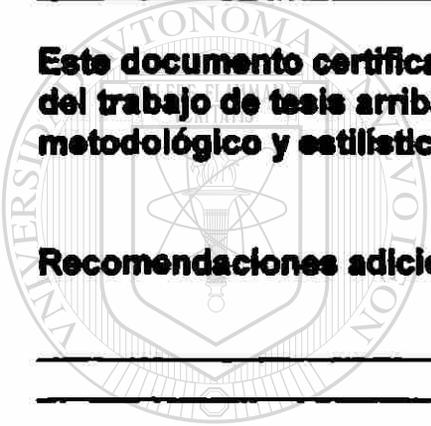
**Tesista:** ELÍAS VAZQUEZ GODINA

**Tema de la tesis:** CUANTIFICACIÓN Y EFECTOS DE LA PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, N.L.

**Este documento certifica la corrección** DEFINITIVA **del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.**

**Recomendaciones adicionales:**

(NINGUNA)



UANL

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Nombre y firma de quien corrigió:**

*Ramón Longoria*  
**Arq. Ramón Longoria Ramírez**

**SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

*Ricardo González*  
**Dr. Ricardo González Alcorta**

**Ciudad Universitaria, a** 10 **de** JULIO **de** 2001

San Nicolás de los Garza, N.L., Octubre del 2001

**DR. RICARDO GONZALEZ ALCORTA**  
**Secretario de Estudios de Posgrado**  
**Facultad de Ingeniería Civil**  
**Universidad Autónoma de Nuevo León**

**P r e s e n t e.-**

Estimado Dr. González:

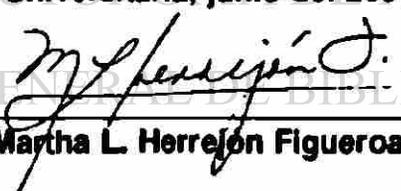
Por este conducto me permito comunicar a Usted que el Ing. Elías Vázquez Godina, pasante de la Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental, ha concluido con su tesis titulada "Cuantificación y Efectos de la Producción de Lixiviados en el Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L.", por lo que, de mi parte, no hay ningún inconveniente para atender a su solicitud de Examen de Grado, con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra institución. He de agradecerle se continúe con los trámites correspondientes para la programación del examen del Ing. Vázquez.

Sin más por el momento, y agradeciendo de antemano sus atenciones a la presente, quedo de Usted.

**Atentamente.-**

**"Aere Flammam Veritatis"**  
**Ciudad Universitaria, junio del 2001**

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

  
**M.I.A. Martha L. Herrejón Figueroa**

San Nicolás de los Garza, N.L., Octubre del 2001

**DR. RICARDO GONZALEZ ALCORTA**  
**Secretario de Estudios de Posgrado**  
**Facultad de Ingeniería Civil**  
**Universidad Autónoma de Nuevo León**

**P r e s e n t e.-**

Estimado Dr. González:

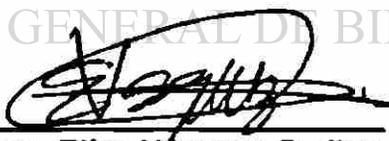
Habiendo concluido mi trabajo de tesis titulado "**Cuantificación y Efectos de la Producción de Lixiviados en el Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L.**", elaborado como requisito para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental, y habiendo sido aprobado en el aspecto técnico por mi asesor, la M.I.A. Martha L. Herrejón Figueroa y, en los aspectos ortográfico, metodológico y estilístico por el Arq. Ramón Longoria Ramírez; por medio de la presente, solicito de la manera más atenta, se sirva efectuar los trámites correspondientes para sustentar mi examen de grado.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano sus atenciones a la presente, quedo de Usted.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**Atentamente.-**

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**Ing. Elías Vázquez Godina**

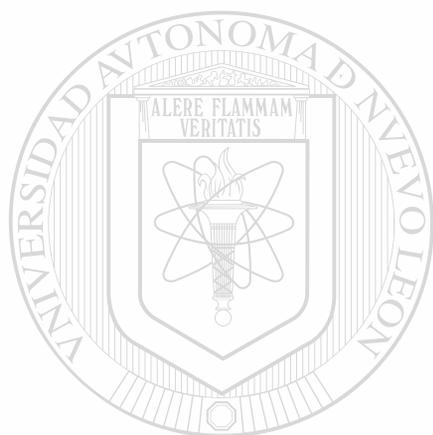
## DEDICATORIA

*A Dios:*

*Por todo lo que me ha dado.*

*A Dariela Amaranta:*

*El amor de mi vida*



*A toda mi familia.*

# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la M.I.A. Martha Leticia Herrejón Figueroa asesora de mi tesis. Al Arq. Ramón Longoria Ramírez, por sus acertadas opiniones. Al M.C. Ing. Benjamín Limón Rodríguez, por sus valiosas sugerencias e interés en la revisión del presente trabajo.

Al Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería Civil de la F.I.C. de la U.A.N.L., por las facilidades brindadas para el desarrollo de este estudio.

Al Sistema Metropolitano de Procesamiento de Desechos Sólidos (SIMEPRODESO) y al Departamento de Geotécnia del Instituto de Ingeniería Civil de la F.I.C. de la U.A.N.L., por el apoyo técnico para el desarrollo del presente trabajo.

A todo el personal del Departamento de Ingeniería Ambiental, por su apoyo incondicional.

A mis maestros, amigos y compañeros de generación.

A todos aquellos que contribuyeron de una forma u otra en la realización de este trabajo.

## RESUMEN

Julio del 2001

**Eliás Vázquez Godina**  
**Universidad Autónoma de Nuevo León**  
**Facultad de Ingeniería Civil**

Título:

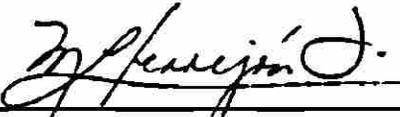
**CUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS EN EL  
RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, NUEVO LEON.**

No. de páginas: 219

**Candidato al grado de  
Maestría en Ciencias con Especialidad  
en Ingeniería Ambiental**

**Resumen:** Se mencionan datos sobre la construcción y operación de los rellenos sanitarios, se comentan los diferentes métodos para el manejo de residuos sólidos; se describe también la generación y composición de los lixiviados. Se describen las características físicas del área de estudio, se describen las características del Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L. Se realizan los cálculos para determinar la producción de lixiviados y el movimiento de los mismos en forma vertical. Se proponen alternativas de solución para el control y el manejo de los lixiviados en el Relleno Sanitario y las estrategias para neutralizar los impactos negativos debidos a la presencia de lixiviado.

**Contribuciones y Conclusiones:** En los cálculos para la producción de lixiviado se pudo apreciar que la generación de lixiviado se presenta en cualquier época del año incluyendo el verano cuando las temperaturas rebasan los 30°C; siendo indispensable tomar en cuenta las recomendaciones propuestas para evitar la contaminación del suelo y del agua subterránea y así, prevenir un problema de salud pública sobre todo en los asentamientos habitacionales alrededor del Relleno Sanitario.

  
M.I.A. Martha L. Herrejón Figueroa  
ASESOR

**CUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS**

**EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, N.L.**

**TABLA DE CONTENIDO**

	<b>Página</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>xli</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>TABLA DE SIGLAS Y NOMENCLATURA</b> .....	<b>xiv</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>INTRODUCCION</b>	
1.1 Introducción .....	2
1.2 Justificación .....	9
1.3 Hipótesis .....	11
1.4 Objetivo General .....	11
<hr/>	
<b>CAPITULO 2</b>	
<b>LOS RELLENOS SANITARIOS Y LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS</b>	
2.1 Generalidades sobre rellenos sanitarios .....	14
2.2 Generación y composición de lixiviados .....	20
2.3 Balance de agua y generación de lixiviados en los rellenos sanitarios .....	30
2.4 Tasas de filtración de agua a través de las capas de cobertura intermedia y	

final en rellenos sanitarios ..... 37

**CAPITULO 3**

**EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, NUEVO LEON**

3.1 Localización del sitio ..... 48

3.2 El área de estudio ..... 48

3.3 Características generales del Relleno Sanitario ..... 52

3.4 Composición de los residuos sólidos que se reciben en el Relleno Sanitario ..... 53

3.5 Rasgos físicos de la zona de estudio:

    3.5.1 Geología ..... 55

    3.5.2 Hidrología ..... 59

    3.5.3 Geohidrología ..... 61

    3.5.4 Climatología ..... 65

3.6 Cálculo de los parámetros para determinar la producción de lixiviados:

---

    3.6.1 Cálculo de la escurrentía ..... 70

    3.6.2 Cálculo de la evapotranspiración potencial ajustada ..... 75

    3.6.3 Cálculo de la evapotranspiración real ..... 81

    3.6.4 Cálculo de las tasas de infiltración potencial de agua a través de la  
             cubierta del relleno sanitario ..... 92

    3.6.5 Cálculo de la cantidad de agua que entra en el relleno sanitario ..... 93

    3.6.6 Cálculo de la relación residuo-suelo ..... 104

**INDICE DE CONTENIDO**

---

<b>3.7</b>	<b>Cálculo de la producción de lixiviados en el relleno sanitario</b> .....	<b>106</b>
<b>3.8</b>	<b>Producción total de lixiviados</b> .....	<b>138</b>
<b>3.9</b>	<b>Movimiento del lixiviado</b> .....	<b>142</b>

**CAPITULO 4**

**METODOS Y TECNICAS PARA EL CONTROL DE LIXIVIADOS**

<b>4.1</b>	<b>Control de lixiviados en un relleno sanitario</b> .....	<b>149</b>
<b>4.2</b>	<b>Sistemas para el control de agua superficial en el relleno sanitario</b> .....	<b>160</b>
<b>4.3</b>	<b>Consideraciones de diseño y selección de la cubierta final</b> .....	<b>183</b>
<b>4.4</b>	<b>Supervisión de la calidad ambiental en el relleno sanitario</b> .....	<b>188</b>
<b>4.5</b>	<b>Impactos negativos que pudieran presentar los lixiviados</b> .....	<b>193</b>
<b>4.6</b>	<b>Estrategias para neutralizar los impactos negativos debido a la presencia de lixiviado</b> .....	<b>197</b>

---

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>202</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>211</b>
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>214</b>

**LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página No.</b>
1.	Datos típicos de la composición de los lixiviados procedentes de rellenos sanitarios nuevos y antiguos .....	26
2.	Parámetros de muestreo de lixiviados .....	27
3.	Cálculo de la escorrentía .....	70
4.	Cálculo de la evapotranspiración potencial ajustada .....	76
5.	Cálculo de la evapotranspiración real, a partir de la evapotranspiración potencial ajustada .....	83
6.	Cantidad de agua que entra en el relleno sanitario .....	95
7.	Producción de lixiviado en cada nivel del relleno sanitario .....	139
8.	Producción total de lixiviados en el fondo del relleno sanitario .....	139
9.	Recomendaciones útiles para mejorar el control de lixiviados .....	150
10.	Procesos y operaciones biológicos, químicos y físicos representativos utilizados para el tratamiento de lixiviados .....	159
11.	Propiedades importantes de los suelos para la cobertura final de los residuos sólidos .....	171
12.	Resistividades tipo .....	196

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura No.</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página No.</b>
1.	Esquema de un balance de agua utilizado para valorar la formación de lixiviados en un relleno sanitario .....	31
2.	Localización del sitio .....	49
3.	Croquis de localización del área de estudio .....	50
4.	Representación esquemática de la construcción del relleno sanitario utilizando los métodos de Area y Trinchera .....	51
5.	Trinchera tipo .....	54
6.	Carta Geológica .....	58
7.	Carta de Hidrología Superficial .....	60
8.	Carta de Hidrología Subterránea .....	62
9.	Croquis de ubicación de pozos y norias .....	64
10.	Carta de Climas .....	66
11.	Climograma .....	67
12.	Representación de los niveles del relleno sanitario .....	110
13.	Producción de Lixiviados .....	141
14.	Localización de sondeos .....	143
15.	Recorrido del lixiviado desde el fondo del relleno hasta el nivel freático .....	147
16.	Curvas de compactación .....	176
17.	Pozo típico para el monitoreo de agua subterránea .....	192

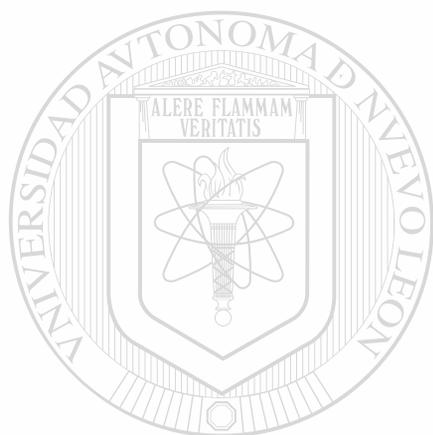
**TABLA DE SIGLAS Y NOMENCLATURA**

<b>Ag</b>	<b>Plata</b>
<b>As</b>	<b>Arsénico</b>
<b>Ba</b>	<b>Bario</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Bióxido de carbono</b>
<b>COT</b>	<b>Carbono Orgánico Total</b>
<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>Metano</b>
<b>Cr</b>	<b>Cromo</b>
<b>Cu</b>	<b>Cobre</b>
<b>DBO<sub>5</sub></b>	<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno</b>
<b>DQO</b>	<b>Demanda Química de Oxígeno</b>
<b>ETP</b>	<b>Evapotranspiración Potencial Ajustada</b>
<b>ETR</b>	<b>Evapotranspiración Real</b>
<b>Fe</b>	<b>Hierro</b>
<b>Hg</b>	<b>Mercurio</b>
<b>Mn</b>	<b>Manganeso</b>
<b>Ni</b>	<b>Níquel</b>
<b>Pb</b>	<b>Plomo</b>
<b>RAU</b>	<b>Reserva de Agua Utilizable</b>
<b>SDT</b>	<b>Sólidos Disueltos Totales</b>
<b>SDV</b>	<b>Sólidos Disueltos Volátiles</b>
<b>Se</b>	<b>Selenio</b>

**INDICE DE CONTENIDO**

---

<b>SEDESOL</b>	<b>Secretaría de Desarrollo Social</b>
<b>SIMEPRODE</b>	<b>Sistema Metropolitano de Procesamiento de Desechos</b>
<b>SIMEPRODESO</b>	<b>Sistema Metropolitano de Procesamiento de Desechos Sólidos</b>
<b>SS</b>	<b>Sólidos Suspendidos</b>
<b>SSV</b>	<b>Sólidos Suspendidos Volátiles</b>
<b>SUCS</b>	<b>Sistema Unificado de Clasificación de Suelos</b>
<b>Zn</b>	<b>Zinc</b>



**UANL**

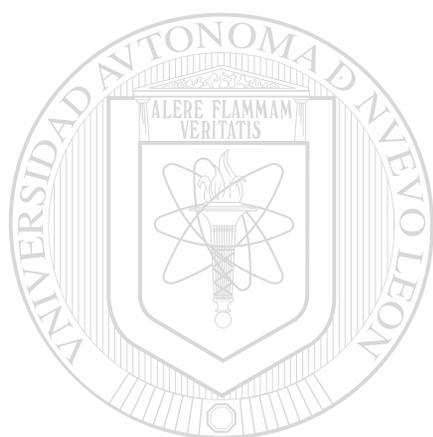
---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**CAPITULO 1**  
**INTRODUCCION**



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 1.1 INTRODUCCION

Uno de los problemas más importantes que conlleva la disposición final de los residuos sólidos municipales en rellenos sanitarios es la generación de lixiviados, que pueden convertirse en fuente de peligro potencial para el agua superficial y subterránea principalmente, por lo que sería oportuna su reducción hasta un mínimo posible, para lo cual es necesario conocer el balance de agua en el relleno sanitario.

Para la descripción del balance de agua y la estimación de la probable cantidad de lixiviados generados en el relleno sanitario, existen diferentes métodos y fórmulas. Sin embargo, por la complejidad del caso en particular y por el gran número de factores influyentes, los modelos siempre representan una simplificación, por lo que los resultados obtenidos serán una estimación o aproximación de la realidad hasta ciertos límites, cuyo éxito debe probarse después, con la aplicación, en el relleno sanitario en función.

### **Modelos para la descripción del balance de agua**

Existen diferentes modelos para la descripción del balance de agua, los cuales dependen básicamente del intervalo de tiempo y las condiciones físico-matemáticas que se consideren y se pueden clasificar en tres tipos principales:

- 1.- Modelos de capas
- 2.- Modelos estadísticos y
- 3.- Modelos de balance.

Los modelos de capas son los más viejos y se desarrollaron en los años sesentas y setentas usando pocos parámetros<sup>1</sup>. Los modelos de capas y modelos estadísticos prácticamente no consideran las características hidráulicas de los residuos, e ignoran el proceso del flujo del líquido a través del medio poroso; por lo tanto, los modelos de capas y modelos estadísticos ya no se usan, sin embargo, ciertas partes de ellos se pueden incorporar en otros modelos.

Hoy día, los métodos más conocidos y usados se basan en el balance geohidrológico, tendiendo cada vez más hacia la descripción más puntual de los procesos hidráulicos dentro del relleno.

El objetivo principal de la presente investigación es determinar cuantitativamente la producción de lixiviados en la primera etapa del Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L. misma que comprende de la celda uno a la dieciocho.

Con el conocimiento de la cantidad de lixiviado se podrá hacer una evaluación de la contaminación del agua subterránea principalmente en la zona del relleno sanitario.

Recomendar también algunas estrategias para el manejo adecuado de lixiviados.

EL funcionamiento del relleno sanitario, desde 1990 hasta el año 2000, se puede describir en tres etapas de la siguiente manera:

---

<sup>1</sup> Gábor Kiss. Ingeniería y Ciencias Ambientales, noviembre-diciembre. 1999

En la etapa uno, que comprende de la celda uno a la dieciocho, no se colocó la infraestructura adecuada para la captación tanto de lixiviados como de biogás, y todos los residuos se depositaban en el relleno sin hacer una clasificación previa.

En la segunda etapa se colocó la infraestructura adecuada para la captación y monitoreo de lixiviados y de biogás; además, cada trinchera se recubre en el fondo y taludes con una geomembrana de polietileno de alta densidad de un milímetro de espesor la cual es protegida con dos capas de arcilla, mezclada con bentonita sódica al 7.5% de 15 cm de espesor, para la protección de los mantos acuíferos, haciéndola inocua para el subsuelo.

La tercera etapa comprende la disposición de residuos municipales y los residuos industriales no peligrosos. Los desechos que se reciben cuyo origen es considerado como no peligroso se identifican desde su llegada para poder ubicarlos en un espacio adecuado, para ello, el relleno sanitario cuenta con una trinchera recubierta de una geomembrana de polietileno de alta densidad, de un milímetro de espesor, especial para los residuos no peligrosos, con lo cual se garantiza la impermeabilidad establecida por las normas oficiales mexicanas.

El relleno sanitario cuenta también con una planta clasificadora de residuos; se seleccionan al azar los camiones de un municipio y pasan a la planta clasificadora para seleccionar los residuos reciclables y el resto de los residuos pasa a la disposición final en el relleno sanitario; es así como estaba operando la planta clasificadora hasta el año 2000.

Además, el relleno sanitario cuenta con un laboratorio de verificación de residuos y compatibilidad que garantiza la seguridad. Las trincheras se subdividen en celdas diarias, que contienen los residuos recibidos durante el día, los cuales son distribuidos de acuerdo con sus características físico-químicas particulares.<sup>2</sup>

Hasta el año 2000, el relleno sanitario es el método que más se utiliza para la eliminación de residuos sólidos municipales. Hoy día, para su disposición final, los residuos se vierten en un lugar previamente elegido y construido de manera adecuada.

Hasta antes de 1994 no existían Normas Oficiales Mexicanas para el diseño y construcción de rellenos sanitarios, por lo que la mayor parte de los rellenos sanitarios construidos antes de 1994 se construyeron y operaron de forma incorrecta.

La disposición final de los residuos sólidos municipales genera un líquido con alto contenido de elementos contaminantes, lo que llamamos lixiviado. La generación de este líquido es una fuente de peligro potencial al medio ambiente y requiere de un manejo adecuado y seguro.

Con la intención de reducir al mínimo la contaminación del ambiente por la disposición de los desechos sólidos municipales, en la construcción y funcionamiento de un relleno sanitario es imprescindible el conocimiento de la cantidad y calidad que se esperan de lixiviado generado.

---

<sup>2</sup> SIMEPRODESO

El presente trabajo se enfoca a investigar la cantidad de lixiviado generado y a la posible contaminación del agua subterránea durante la primera etapa de construcción y operación del Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L. El presente estudio no presenta datos sobre las características químicas del lixiviado generado en el relleno sanitario; sin embargo, es de suponer que tiene un alto contenido de elementos tóxicos y peligrosos, ya que en la primera etapa se depositaron gran cantidad y diversidad de residuos, además, no sólo se recibieron los residuos generados en ese momento, sino que también se recibieron residuos que formaban parte de tiraderos a cielo abierto, por lo que se requiere conocer la cantidad de generación para darle un manejo adecuado y eficaz.

Para el cálculo de la producción de lixiviado en el relleno sanitario, se usó una combinación de los modelos de capas con los modelos de balance, ya que se analizaron cada una de las capas del relleno y se consideraron diferentes parámetros para el balance de agua. Los parámetros más importantes son:

- **La precipitación.**
- **El escurrimiento superficial.**
- **La evaporación (evapotranspiración real).**
- **La infiltración de humedad en los desechos.**
- **La cantidad de lixiviado generado.**

Los datos para calcular los parámetros antes mencionados fueron tomados de la Estación Meteorológica Monterrey, ubicada en la Av. Universidad, en San Nicolás de los Garza N.L. y es controlada por la Comisión Nacional del Agua. De esta estación se recopilaron los datos de precipitación y temperatura para el periodo de 1990 a 1998.

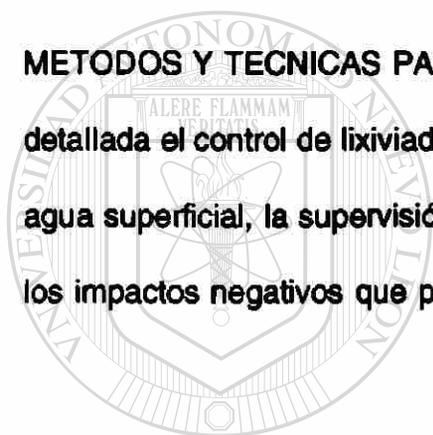
El cálculo de la generación de lixiviado, en el fondo del relleno, se realizó por medio de un procedimiento que comprende dos etapas: en la primera etapa se calculó la generación de lixiviado, una capa por año, desde el año 1 (1991) hasta el año 5 (1995), año en que se terminó de operar la primera parte del Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L. La segunda etapa comprende del año 6 (1996) hasta el año 8 (1998) y para cada año se calculó la generación de lixiviado en todas las capas; es decir, para el año seis se calculó la generación de lixiviado para las capas 5, 4, 3, 2 y 1 y así sucesivamente para los años siete (1997) y ocho (1998).

El trabajo está estructurado en cuatro capítulos:

- 1.- **INTRODUCCION.** Se describe en forma general la organización de la presente tesis, así como la justificación, los objetivos y las metas de la investigación
- 2.- **RELLENOS SANITARIOS Y LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS.** En este capítulo se describe en forma general la construcción y operación de los rellenos sanitarios, así como la generación y composición de los lixiviados.

Se da una descripción de los factores que intervienen en el balance de agua en un relleno sanitario, así como los elementos que intervienen para la formación de lixiviados.

- 3.- **EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, NUEVO LEON.** Se da una descripción del área de estudio, las características del relleno sanitario, descripción de los rasgos físicos de la zona de estudio y se presentan los cálculos para determinar la producción de lixiviados y el movimiento de los mismos en forma vertical.
- 4.- **METODOS Y TECNICAS PARA EL CONTROL DE LIXIVIADOS.** Se presenta en forma detallada el control de lixiviados para el relleno sanitario, los sistemas para el control del agua superficial, la supervisión ambiental en el relleno y las estrategias para neutralizar los impactos negativos que pueden presentar los lixiviados.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 1.2 JUSTIFICACION

El relleno sanitario es una de las técnicas que se utilizan en el país como destino final de la basura doméstica. Esta técnica tiene sus ventajas y desventajas: por un lado, se reducen los tiraderos a cielo abierto, disminuye la propagación de enfermedades, entre muchas otras ventajas y, por otro lado, si los rellenos sanitarios no se construyen y se operan de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas que existen para tal caso, los lixiviados generados se infiltrarán al subsuelo y traerán como consecuencia el deterioro de la calidad del suelo y del agua subterránea, principalmente.

El agua subterránea es una fuente importante de abastecimiento de agua para las comunidades, de ahí, su importancia para mantenerla en las condiciones óptimas para cada uso en particular; para mantener esas condiciones, se debe prevenir su contaminación, ya que su remediación o descontaminación tendría un costo muy elevado.

El Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-084-ECOL-1994, que establece los requisitos para el diseño de un relleno sanitario y la construcción de sus obras complementarias, fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de junio de 1994, y la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales; fue publicada en el mismo órgano de difusión el 25 de noviembre de 1996. Por lo tanto, algunos de los rellenos establecidos, antes de estas fechas, no se construyeron en forma correcta.

En muchas ciudades de la República Mexicana existen "Rellenos Sanitarios" que no cumplen con las condiciones mínimas para prevenir la contaminación del aire, el agua y el suelo, y su operación es tan deficiente que se convierten muy fácilmente en tiraderos a cielo abierto, con sus consecuentes problemas ambientales y sociales.

El Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L. ha estado funcionando desde 1990 y su operación se puede dividir en tres etapas; la primera, en la cual no se construyeron las obras necesarias para la captación de lixiviados; la segunda, que se encuentra en operación y en la cual se utilizaron las técnicas y los materiales adecuados para la construcción de obras para la captación y recolección de lixiviados y captación de biogás; y la tercera etapa, parte integral de la segunda, en la cual una parte de la basura que llega al relleno pasa por una planta clasificadora y recuperadora de material (cartón, vidrio, plástico, aluminio, etc), y el resto de la basura pasa al relleno sanitario.

La presente investigación se enfoca, específicamente, a la primera etapa de construcción del Relleno Sanitario. En la primera etapa, que a la fecha ya está terminada (2000) como se mencionó anteriormente, no se construyeron las obras necesarias para la captación de lixiviados; ésto es importante, ya que el relleno se encuentra en una zona en donde existen pozos de agua que, algunas comunidades, la utilizan para consumo humano, abrevadero o para riego. Este es solamente un caso de los muchos rellenos sanitarios que existen en la República Mexicana, en condiciones semejantes.

### 1.3 OBJETIVO GENERAL

- **Cuantificar los lixiviados generados en el Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L. en el área de estudio, la cual comprende de la celda 1 a la 18, y las cuales ocupan una superficie de 42 hectáreas.**
  
- **Detectar las posibilidades que pudiesen existir para la contaminación del suelo y agua subterránea en ese lugar.**
  
- **Conocer el comportamiento normal de los lixiviados según las variables:**
  - **Capacidad del relleno (área de estudio)**
  - **Cantidad de desechos recibidos**
  - **Características de los desechos**
  - **Condiciones climáticas**
  
- **La inclusión de agua de distintas procedencias.**
  
  
- **Explicitar algunos métodos para el control de lixiviados.**
  
  
- **Sugerir algunas estrategias para controlar y neutralizar los impactos negativos que pudiera presentar la generación de lixiviados.**

## 1.4 HIPOTESIS

Los líquidos lixiviados pueden ser un potencial contaminante que se puede desarrollar en los rellenos sanitarios e infiltrarse al subsuelo dependiendo de la movilidad y concentración del lixiviado; la calidad y concentración pueden variar dependiendo de los diferentes factores que intervienen para su formación, en tanto la movilidad dependerá de la transmisibilidad del suelo.

Si se controla la producción y se mejoran los sistemas para evitar la infiltración del lixiviado hacia el subsuelo en el relleno sanitario, se evitará la contaminación del suelo y del agua subterránea.



# UANL

---

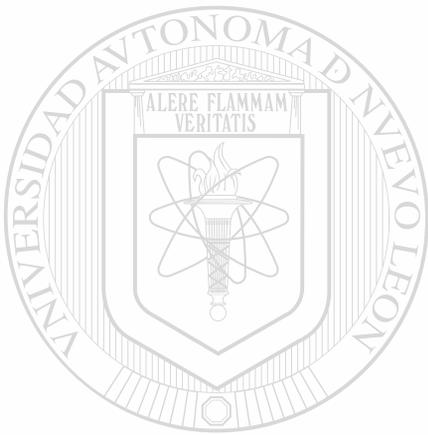
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**CAPITULO 2**

**LOS RELLENOS SANITARIOS Y LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS**



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 2.1 GENERALIDADES SOBRE RELLENOS SANITARIOS

La creciente cantidad de los desechos de la civilización y el cambio en su composición causan una preocupación cada vez más grande, al igual que el empeoramiento progresivo del estado del medio ambiente, tanto en México como en cualquier otra parte del mundo.

Durante mucho tiempo, el medio ambiente daba cabida a los residuos sin ninguna limitación, pero, actualmente, esta carga ha alcanzado un máximo soportable y la introducción adicional descontrolada de los materiales contaminantes en el ambiente ya puede causar efectos catastróficos. Para evitarlo, la protección del medio ambiente obliga a que el tratamiento, reutilización o disposición final de los residuos, forme parte integral del proceso de producción, elaboración y consumo. Es decir, se deben tratar los residuos y, a causa de la falta de condiciones técnicas o económicas, no hay otra posibilidad para su eliminación o reutilización; entonces se debe encontrar la solución más adecuada para su disposición final. Pero, ello exige una gestión profesional y segura, cuyo aspecto principal es la protección del medio ambiente, es decir, impedir la contaminación del suelo, de las aguas y del aire.

Respecto al manejo de los residuos sólidos, existen varios métodos para su disposición final entre los que se encuentran: la incineración, el compostaje aerobio, los basureros a cielo abierto, el relleno sanitario, la recuperación y la reducción.

El relleno sanitario es, en la actualidad, el método más usado en México para la eliminación de residuos sólidos municipales; en el mismo, los residuos recolectados se vierten en un lugar,

adecuadamente elegido y construido para la disposición final de los desechos, que son compactados con maquinaria especial y cubiertos con material inerte, bajo un continuo control y monitoreo ambiental, en la misma planta y sus alrededores.

Con lo anteriormente expuesto, se nota claramente cuál es la diferencia entre los rellenos sanitarios y los basureros descontrolados, que están contaminando continuamente el medio ambiente.

La disposición final de los residuos, en un relleno sanitario, tiene las siguientes ventajas respecto a los otros métodos de tratamiento:

- Una inversión comparativamente pequeña y un funcionamiento relativamente barato y sencillo.
- Una gran capacidad e independencia de las fluctuaciones cuantitativas.
- Aptitud para recibir cualquier tipo de residuos sólidos municipales no peligrosos.
- La no urgencia de métodos especiales en la recolección y el transporte de los residuos.
- La posible eliminación total y final de los residuos.

- La posibilidad de aprovechamiento del biogás generado en los procesos de consolidación y degradación de la basura.
- La viabilidad de la reutilización futura del lugar.

El relleno sanitario tiene, a la vez, algunas desventajas:

- La necesidad de un terreno adecuado, que acoja grandes cantidades de desechos y cumpla con todos los requisitos que marca la Legislación Mexicana.
- Se requieren lugares alejados de los lugares poblados, lo que representa más gastos de transporte.
- El riesgo de contaminación del suelo, de las aguas superficiales y subterráneas, y del aire.
- El gasto del tratamiento de los lixiviados generados por la basura.

Según el número de razones, en pro y en contra, pareciera que el relleno sanitario fuera una solución muy ventajosa, pero esto demuestra solamente lo indispensable del método.

Evidentemente, la elección de la forma de tratamiento de los desechos depende de muchos factores locales y de otras condiciones técnicas, económicas y políticas; sin embargo, hay que comprender que el relleno sanitario siempre será un método imprescindible para la eliminación de los residuos, sea como método general único o como método complementario.

Las consecuencias negativas que surgirían, en caso de no cumplir con los requisitos que marcan las Normas Oficiales para Rellenos Sanitarios, serían las siguientes:

- Como consecuencia directa de la disposición final inadecuada de los residuos de diferentes orígenes, se contamina el suelo, el agua, el aire y se produce un peligro directo para la salud pública, en forma de infecciones y epidemias.
- De la disposición de residuos en terrenos sin protección geológica existente o sin obras de ingeniería para el control de la salida de materiales contaminantes, resulta la contaminación del suelo y de las aguas freáticas, lo que también significa peligro para la salud pública, por vía indirecta y a largo plazo. Este peligro requiere una seria consideración porque, la contaminación que ocurra, afectará grandes territorios y su rehabilitación requerirá de un largo periodo de tiempo y de grandes presupuestos.
- En lugares donde se vierte la basura sin control, los incendios y sus productos (humo, ceniza, olores ofensivos, gases tóxicos, etc.), pueden causar seria contaminación del aire.

- La fermentación de materias orgánicas, cuya degradación genera gases y líquidos tóxicos, o por lo menos, desagradables, también constituyen una amenaza para la salud pública en la zona.
- El polvo también contamina el aire, y los desechos ligeros, como el papel y el plástico que pueden ser arrastrados por el viento, llegan a los terrenos de cultivo y a las carreteras cercanas lo que ocasiona, aparte del impacto estético negativo, un estorbo a la actividad agrícola y el tráfico vehicular; a veces, pueden contener también elementos tóxicos.
- La materia orgánica que se fermenta y los restos de alimentos en la basura favorecen la proliferación de roedores e insectos, que son propagadores de enfermedades y epidemias. Para eliminar estos animales, se requiere el tratamiento profesional de la basura, con el cubrimiento diario de la misma, usando material inerte.
- Tampoco se debe dejar de considerar el impacto estético negativo que representa un tiradero incontrolado, no sólo por la gente que vive en la zona, que requiere que existan condiciones óptimas ambientales, sino también por razones de turismo.

"Hay que señalar que los rellenos sanitarios quitan recursos valiosos a las generaciones actuales y futuras y, son métodos de salida que promueven la producción de basura, en vez de la

reducción de la misma"<sup>1</sup>. Pero es un método de disposición final económico y seguro, desde el punto de vista de la salud pública, y su uso se está generalizando en México.

### 2.1.1 CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

Otro problema muy importante de los rellenos sanitarios es la contaminación de las aguas freáticas y superficiales. Cuando la lluvia se infiltra por un relleno, lixivia tintas, compuestos metálicos hidrosolubles y otros materiales tóxicos. Esto produce un lixiviado contaminante, que se infiltra desde el fondo de los tiraderos no recubiertos o por grietas en el revestimiento de los sí recubiertos. La contaminación de aguas subterráneas y aguas superficiales próximas es un problema grave, en especial, con los muchos rellenos y antiguos tiraderos abandonados que no tenían recubrimiento. Por otra parte, los rellenos con recubrimiento también pueden presentar fugas por fallas en el revestimiento.

La contaminación del agua subterránea es mucho más difícil de detectar y controlar que la contaminación del agua superficial. Muchos pozos deben ser vigilados por medio del monitoreo del agua subterránea, aún y cuando este método es muy caro.

Debido a su localización bajo tierra, bombear el agua subterránea contaminada, sacándola a la superficie, limpiarla y regresarla al acuífero, generalmente es demasiado costoso. Bombear y tratar acuíferos contaminados con flujo lento, requiere décadas; incluso, cientos de años de bombeo antes de que toda la contaminación aflore a la superficie.

---

<sup>1</sup> G. Tyler Miller Jr. Ecología y Medio Ambiente. 1994

Por lo tanto, evitar la contaminación es la única manera efectiva de proteger los recursos del agua subterránea, y ésto requerirá monitorear los acuíferos cercanos a los rellenos sanitarios.

## 2.2 GENERACION Y COMPOSICION DE LIXIVIADOS

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente considera al lixiviado como el líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción, arrastre o percolación y que contiene, disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos.

En la mayoría de los rellenos sanitarios, el lixiviado está formado por el líquido que entra en el relleno desde fuentes externas (drenaje superficial, lluvia, aguas subterráneas, aguas de manantiales subterráneos) y, en su caso, el líquido producido por la descomposición de los residuos.

Los diversos materiales confinados en los rellenos sanitarios hacen que la composición de los lixiviados sea variable, de acuerdo con la naturaleza de los mismos desechos (pH, edad, temperatura, etc.); también influyen aspectos externos ambientales (meteorología), así como la edad del relleno, la tecnología usada en la planta y la fase de estabilización en que se encuentre el desecho.

La degradación de los desechos se presenta en dos fases: aeróbica y anaeróbica

**Fase aeróbica:** En el caso de que haya bastante oxígeno disponible, los microorganismos presentes en los residuos o provenientes del ambiente, contribuyen a la descomposición aerobia de la materia orgánica. El proceso es fomentado, parcialmente, por el aire atrapado en el relleno, mientras las capas superficiales, incluso, reciben cierta aireación desde la atmósfera. Un factor importante es, además, la humedad, que para estos microorganismos es óptima si está en el nivel de 60%, ya que, por lo general, el contenido de humedad de los residuos sólidos municipales es de 15 a 40%<sup>2</sup>, así el agua pluvial que cae al relleno tiene un papel importante en alcanzar la humedad necesaria para los bioprocesos.

Los productos de la descomposición aerobia generalmente son: dióxido de carbono, amoníaco (que después se transformará en nitrato) y agua, así como lo que resulta de la oxidación de los diversos componentes originales de los desechos. Ya que las reacciones de oxidación generalmente son exotérmicas, la temperatura interna del relleno, en corto tiempo, puede superar los 60°C. En tal temperatura, la mayor parte del contenido de humedad se evapora, por lo que, generalmente, directamente del proceso de la descomposición aerobia no se genera lixiviado.

**Fase anaeróbica:** La materia orgánica de los residuos también se descompone en ausencia de oxígeno, pero en forma más lenta que en condiciones aerobias. La descomposición anaerobia llega a prevalecer después del agotamiento del aire atrapado, y en las partes más profundas del relleno que están aisladas de la recarga de aire proveniente de la atmósfera. La

---

<sup>2</sup> George Tchobanoglus, "Gestión Integral de Residuos Sólidos", 1994

influencia del ambiente externo aquí ya no prevalece, por lo tanto, los procesos bioquímicos pueden mantener la temperatura elevada. Ya que en estos niveles ya no hay posibilidad de evaporación del ambiente y además la temperatura de 35° a 50°C es inferior a las condiciones de oxidación; así, con la descomposición anaerobia ya se produce cierta cantidad de lixiviado.

La transformación inicialmente genera ácidos orgánicos, después metano y dióxido de carbono, mientras se lleva a cabo la desnitrificación y la reducción de los diversos componentes, sobre todo de los sulfatos.

Durante todo esto, el relleno está expuesto a la precipitación, por lo que una cantidad considerable de agua pluvial llega a infiltrarse en la masa de los desechos. Esta agua percola la materia depositada y disuelve los diferentes componentes de los residuos; a la vez que se lleva los productos de las reacciones anteriormente mencionadas, se acumula en la base del relleno como lixiviado el cual, tomando en cuenta su considerable cantidad, es mucho más que los líquidos generados en los otros procesos.

## 2.2.1 FACTORES QUE AFECTAN LA GENERACION DE LIXIVIADOS

Para este efecto, se considerarán dos tipos de factores: aquéllos que dependen del tipo de desecho y que se consideran internos por ser inherentes al desecho; y los externos, es decir, aquéllos que no dependen de la naturaleza de los residuos.

**Factores internos.** Los factores internos que afectan la generación de los lixiviados son:

- a) **La composición de los residuos.** Esta varía de desecho a desecho y sólo es posible conocer las características en un confinamiento controlado, en donde se tiene una planeación de los desechos que se depositarán en el lugar.
- b) **La degradación de los residuos.** Esto influye mucho en la concentración del lixiviado, pues varía según la naturaleza de los desechos, si son orgánicos o inorgánicos, ya que los primeros se degradan fácilmente y hacen que la generación de lixiviados sea mayor en un poco tiempo y, por lo tanto, su concentración será mayor.
- c) **El tamaño y composición de los residuos.** Algunas veces, para facilitar la operación de los desechos, éstos se fragmentan, haciéndolos de un tamaño uniforme; a este proceso se le llama trituración y provoca que se acelere la generación de lixiviado.

**Factores externos.** Independientemente de la naturaleza de los desechos, de los líquidos retenidos en éstos y de las reacciones fisico-químicas que se presentan en el confinamiento, existen diversos factores externos que pueden afectar la formación de lixiviados, como:

- a) La capacidad de intercambio catiónico. Los suelos orgánicos y las arcillas tienen una gran capacidad de intercambio de cationes, lo que hace que se retengan los metales contenidos en el lixiviado, retardando su tránsito hacia el subsuelo y, consecuentemente, hacia los mantos acuíferos.
- b) La geohidrología local y regional. Esta comprende las zonas permeables e impermeables del subsuelo, la localización de los mantos acuíferos y la dirección del flujo subterráneo, si éste existe, así como la capacidad de infiltración y la capacidad de campo del suelo.
- c) El clima. Por clima debemos entender aquellos factores climatológicos que afectan a la región; estos factores son: el régimen de precipitación pluvial y el de evapotranspiración, los vientos dominantes y las temperaturas que se presentan en el transcurso del año.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

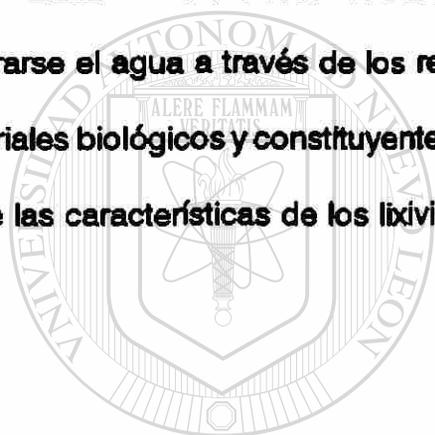
- d) El diseño y la operación de sitios de disposición. La tecnología usada en el depósito del relleno también influye en el desarrollo de los procesos de descomposición. La altura de las unidades, o bien, la altura o profundidad total del relleno, la tecnología de la compactación y la calidad del material de cubierta, influyen en el prevalecimiento de los factores ambientales. Por otra parte, es frecuente que en los confinamientos la operación sea incorrecta y no se atiendan las normas de operación que se tomaron en cuenta para el diseño, por lo que la

generación de lixiviados varía la forma cuantitativa prevista.

- e) El tipo de superficie de evaporación. Es un hecho que la evaporación depende de la superficie expuesta a la luz solar, por lo que las superficies planas ofrecerán un mayor espejo de agua, lo que redundará en una mayor evaporación y una menor infiltración.

## 2.2.2 COMPOSICION DE LIXIVIADO

Al filtrarse el agua a través de los residuos sólidos en descomposición, se lixivian en solución materiales biológicos y constituyentes químicos. En la tabla 1 se presentan datos representativos sobre las características de los lixiviados en rellenos nuevos y antiguos.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**TABLA 1**  
**Datos típicos sobre la composición de los lixiviados**  
**procedentes de rellenos sanitarios nuevos y antiguos.**

Constituyente	Relleno sanitario nuevo (menos de 2 años)		Relleno sanitario antiguo (mayor de 10 años)
	Rango	Típico	
DBO5 (demanda bioquímica de oxígeno)	2,000-30,000	10,000	100-200
COT (carbono orgánico total)	1,500-20,000	6,000	80-160
DQO (demanda química de oxígeno)	3,000-60,000	18,000	100-500
SST(sólidos suspendidos totales)	200-2,000	500	100-400
Nitrógeno orgánico	10-800	200	60-120
Nitrógeno amoniacal	10-800	200	20-40
Nitrato	5-40	25	5-10
Fósforo total	5-100	30	5-10
Ortofosfato	4-80	20	4-8
Alcalinidad como CaCO <sub>3</sub>	1,000-10,000	3,000	200-1,000
pH	4.5-5.7	6	6.6-7.5
Dureza total como CaCO <sub>3</sub>	300-10,000	3,500	-
Calcio	200-3,000	1,000	100-400
Magnesio	50-1,500	250	50-200
Potasio	200-1000	300	50-400
Sodio	200-2,500	500	100-200
Cloruros	200-3,000	500	100-400
Sulfatos	50-1,000	300	20-50
Hierro total	50-1,200	60	20-200

Todos los valores están en mg/L, excepto el pH que no tiene unidades.

Tomada de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Tchobanoglous G. 1994

**TABLA 2**  
**Parámetros de muestreo de los lixiviados**

Físicos	Orgánicos	Inorgánicos	Biológicos
Aspecto	Químicos orgánicos	Sólidos en suspensión (SS), sólidos totales disueltos (STD)	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
pH	Fenoles	Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV), Sólidos Disueltos Volátiles (SDV)	Bacterias coliformes (totales, fecales y estreptococo)
Potencial de reducción oxidación	Demanda química de oxígeno (DQO)	Cloruros	Recuento sobre placas estándar
Conductividad	Carbono orgánico total (COT)	Sulfatos	—
Color	Acidos volátiles	Fosfatos	—
Turbiedad	Teninos, ligninas	Alcalinidad y acidez	—
Temperatura	N-orgánico	N-Nitrato	—
Olor	Aceites y grasas (solubles en éter)	N-Nitrato	—
—	Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	N-Amónico	—
—	Grupos funcionales orgánicos según sean requeridos	Sodio	—
—	Hidrocarburos clorados	Potasio	—
—	—	Calcio	—
—	—	Magnesio	—
—	—	Dureza	—
—	—	Metales pesados (Pb, Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, Fe, Mn, Hg, Ba, Ag, As, Se)	—
—	—	Cianuro	—
—	—	Flúor	—

Tomada de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Tchobanoglous G. 1994

### 2.2.3 VARIACIONES EN LA COMPOSICION DE LOS LIXIVIADOS.

La composición química de los lixiviados variará mucho, según la antigüedad del relleno sanitario y la historia previa al momento de muestreo. Por ejemplo, si se recoge una muestra de lixiviados durante la fase ácida de la descomposición, el pH será bajo y las concentraciones de  $\text{DBO}_5$ , COT, DQO, nutrientes y metales pesados serán altas. Por otro lado, si se recoge una muestra de lixiviados durante la fase de fermentación del metano, el pH estará dentro del intervalo de 6.5 a 7.5 y los valores de concentración de  $\text{DBO}_5$ , COT, DQO y de los nutrientes serán, significativamente, más bajos. Similarmente, serán más bajas las concentraciones de metales pesados, porque la mayoría de los metales son menos solubles para valores de pH neutros. El pH del lixiviado dependerá no solamente de la concentración de los ácidos que están presentes, sino también de la presión parcial del  $\text{CO}_2$  en el gas del relleno sanitario que está en contacto con el lixiviado<sup>3</sup>.

La biodegradabilidad del lixiviado variará con el tiempo. Se pueden supervisar los cambios en la biodegradabilidad del lixiviado mediante el control de la relación  $\text{DBO}_5/\text{DQO}$ . Inicialmente, las relaciones estarán en el nivel de 0.5, o más. Las relaciones en el intervalo de 0.4 a 0.6 se toman como un indicador de que la materia orgánica en los lixiviados es fácilmente biodegradable. En los rellenos sanitarios antiguos, la relación  $\text{DBO}_5/\text{DQO}$  está, a menudo, en el intervalo de 0.05 a 0.2. La relación cae porque los lixiviados procedentes de rellenos antiguos normalmente contienen ácidos húmicos y fúlvicos, que no son fácilmente biodegradables.

---

<sup>3</sup> George Tchobanoglus "Gestión Integral de Residuos Sólidos". 1994

Como resultado de la diversidad de las características del lixiviado, el diseño de los sistemas de tratamiento del mismo es complicado. Por ejemplo, una planta de tratamiento diseñada para tratar lixiviado, con las características presentadas por un relleno nuevo, sería bastante diferente de una diseñada para el lixiviado procedente de un relleno antiguo. El problema de interpretación de los resultados analíticos es todavía más complicado, por el hecho de que el lixiviado que está generándose, en un momento dado, es una mezcla de lixiviado derivado de residuos sólidos de distintas edades.

#### 2.2.4 OLIGOCOMPUESTOS.

Los oligoconstituyentes en los gases del relleno sanitario tienen dos orígenes. Pueden llegar al relleno con los residuos entrantes o pueden producirse mediante reacciones bióticas o abióticas, que tienen lugar dentro del relleno. De los oligocompuestos encontrados en los gases del relleno, muchos están mezclados con los residuos entrantes en forma líquida, pero tienden a volatilizarse. La tendencia a la volatilización es directamente proporcional a la presión de vapor líquido, e inversamente proporcional al área de una esfera del líquido volátil dentro del relleno. En rellenos donde se prohíba el confinamiento de residuos peligrosos, como en el caso del Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L., las concentraciones de COV (compuestos orgánicos volátiles) en el gas del relleno no serán significativas.

## **2.3 BALANCE DE AGUA Y GENERACION DE LIXIVIADO EN LOS RELLENOS SANITARIOS.**

El potencial de formación del lixiviado puede valorarse mediante la preparación de un balance hidrológico del relleno. El balance hidrológico implica la suma de todas las cantidades de agua que entran en el relleno y la sustracción de las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua. La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de agua en exceso sobre la capacidad de retención de humedad del material en el relleno.

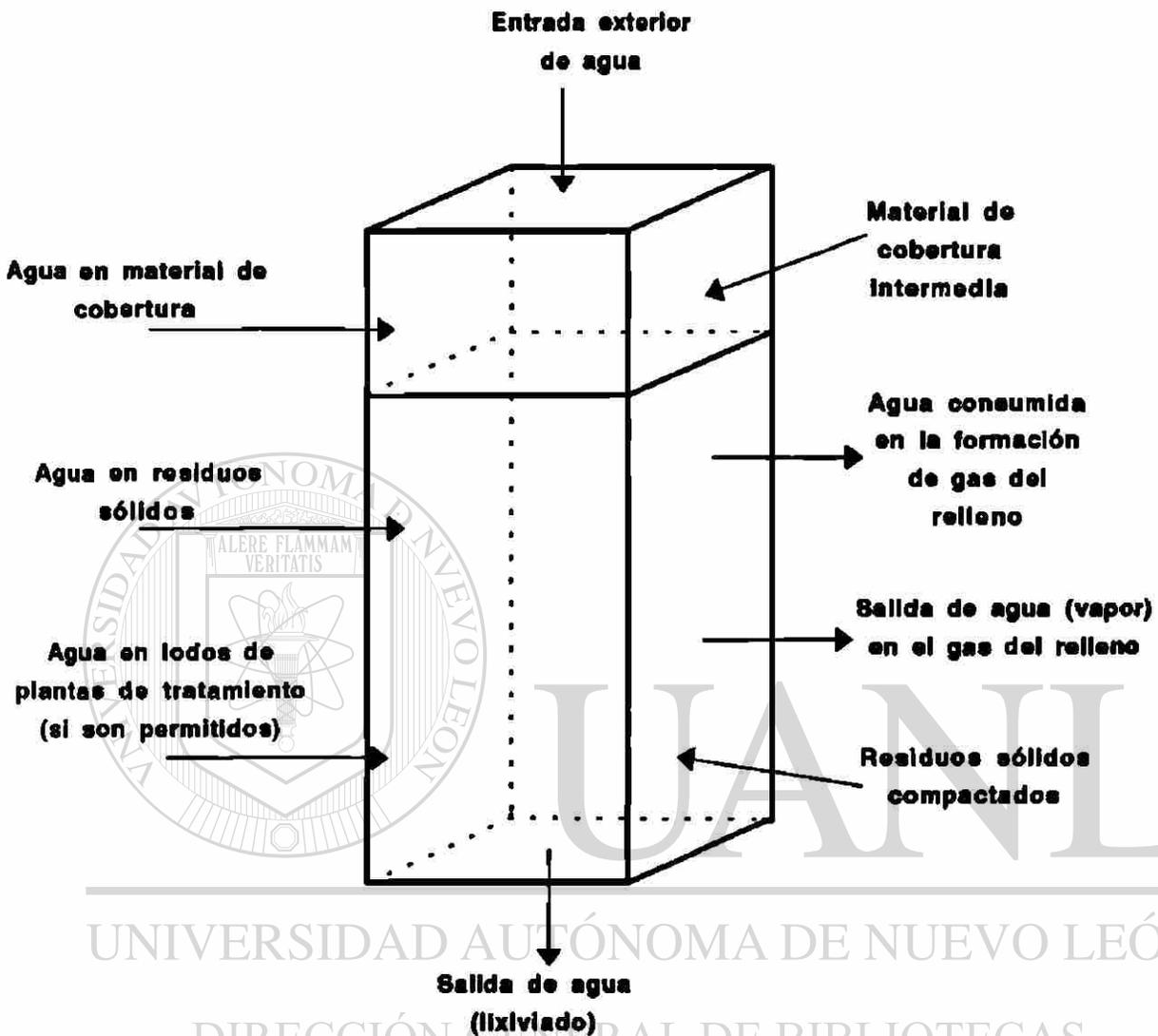
### **2.3.1 DESCRIPCION DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE DE AGUA PARA UNA CELDA DE UN RELLENO SANITARIO.**

Los componentes que forman el balance de agua para una celda, en un relleno, se identifican en la figura 1. Las fuentes principales incluyen: el agua que entra en la celda desde arriba, la humedad de los residuos sólidos, la humedad del material de cobertura y la humedad de lodos, si se permite el confinamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento. Las principales salidas son: el agua que abandona el relleno, formando parte del gas del relleno (es decir, el agua utilizada para formar el gas), el vapor de agua saturado en el gas del relleno y el lixiviado.

#### **a) Entradas de agua.**

**El agua que entra en el relleno desde arriba.**

En la capa superior del relleno, el agua que entra desde arriba procede de la precipitación atmosférica que se ha filtrado a través del material de cobertura. En las capas, por debajo de



**FIGURA 1** Esquema de un balance de agua utilizado para valorar la formación de lixiviados en un relleno sanitario

Tchobanoglus G. 1994

la capa superior, el agua que entra desde arriba procede del agua que se ha filtrado a través de los residuos sólidos situados sobre la capa en cuestión. Uno de los aspectos más críticos de la preparación de un balance hidrológico, para un relleno, es determinar la cantidad de lluvia que realmente se filtra a través de la capa de cobertura del relleno.

#### **Humedad de los residuos sólidos.**

El agua que entra al relleno con los desechos sólidos es corresponde, tanto al agua intrínseca de los residuos, como a la humedad que se ha absorbido de la atmósfera o de la lluvia (sobre todo cuando los contenedores de almacenamiento no están correctamente cerrados). En climas secos, se puede perder algo de humedad intrínseca contenida en los residuos por las condiciones de almacenamiento. El contenido de humedad de los residuos sólidos domésticos y comerciales depende principalmente del clima de la región.

#### **Humedad del material de cobertura.**

La cantidad de agua que entra con el material de cobertura dependerá del tipo y del origen del material y también de la estación del año. La cantidad máxima de humedad que el material de cobertura puede contener se define como capacidad de campo (CC) del material, o sea, el líquido que queda en el espacio de los poros, sometido a la gravedad.

**b) Salidas de agua.****Agua consumida en la formación del gas del relleno.**

A esta también se le conoce como humedad metabólica de los residuos sólidos y es la cantidad de agua requerida en las actividades biológicas que se presentan en el transcurso de la degradación natural de los residuos sólidos de un relleno sanitario.

Esta degradación natural consta de dos etapas, la primera es una fermentación aeróbica y, la segunda, una fermentación anaeróbica.

La fermentación aeróbica abarca el conjunto de los procesos biológicos que se desarrollan en presencia de oxígeno. Se caracteriza por la formación de una mezcla gaseosa, compuesta por dióxido de carbono, amoníaco y agua. Esta fase dura solamente algunas semanas.

La fermentación anaeróbica se desarrolla en ausencia de oxígeno. Se caracteriza por la oxidación y reducción de materia orgánica, generando dióxido de carbono y metano. Esta fase toma más tiempo en desarrollarse y es el proceso predominante en un relleno sanitario. ®

Los principales factores que intervienen en la descomposición de los residuos sólidos son: La heterogeneidad de los residuos sólidos, sus propiedades físicas, químicas y biológicas, el oxígeno confinado entre los mismos, así como la temperatura, la humedad en el relleno y los microorganismos que presentan los residuos sólidos durante su degradación.

### Agua perdida como vapor de agua.

El gas del relleno sanitario normalmente está saturado en vapor de agua. La cantidad de vapor de agua que escapa del relleno sanitario se determina, suponiendo que el gas del relleno está saturado en vapor de agua y aplicando la ley de los gases ideales, de la forma siguiente:

$$p_v V = nRT$$

donde:

$p_v$  = presión de vapor del agua a una temperatura  $T$ , en atm.

$V$  = Volumen.

$n$  = Número de moles.

$R$  = Constante universal de los gases.

$T$  = Temperatura K.

### Lixiviado

El agua que sale desde el fondo de la primera celda del relleno se llama lixiviado. El agua que sale del fondo de la segunda y de las subsiguientes celdas, procede del agua que entra desde la celda superior a la celda en cuestión. En los rellenos donde se utilizan sistemas intermedios para la recolección de lixiviados, el agua que sale desde el fondo de la celda colocada directamente por encima del sistema para la recolección de lixiviado intermedio, también se llama lixiviado.

**c) Otras pérdidas y ganancias de agua.**

Habrá una pérdida de humedad por evaporación durante el vertido de los residuos. Las cantidades no son grandes y, por lo general, no se toman en cuenta.

**d) Capacidad de campo del relleno sanitario.**

El agua que entra en el relleno, que no se consume y que no sale como vapor de agua, puede mantenerse en el relleno o puede aparecer como lixiviado. Los desechos sólidos y el material de cobertura, ambos, son capaces de retener agua. La cantidad de agua que se puede retener, en contra de la gravedad, se denomina "capacidad de campo".

La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de humedad dentro del relleno, por encima de la capacidad de campo del mismo. La capacidad de campo, que varía con el peso de sobrecarga, puede estimarse utilizando la siguiente ecuación:

$$CC = 0.6 - 0.55(W/10,000 + W)$$

donde: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

CC= Capacidad de campo (o sea, la fracción de agua en los residuos sólidos basándose en el peso seco de los mismos).

W= Peso de sobrecarga, calculado en la mitad de la altura de los residuos dentro del nivel en cuestión.

**e) Preparación del balance de agua en el relleno.**

Los términos que componen el balance de agua pueden colocarse en forma de ecuación de la forma siguiente:

$$S_{RS} = W_{RS} + W_{FT} + W_{MC} + W_{A(U)} - W_{GV} - W_E + W_{F(L)}$$

donde:

$S_{RS}$  = Variación en la cantidad de agua almacenada en los residuos sólidos en el relleno  $\text{kg/m}^3$ .

$W_{RS}$  = Agua (humedad) en los residuos sólidos entrantes,  $\text{kg/m}^3$ .

$W_{FT}$  = Agua (humedad) en los lodos de las plantas de tratamiento entrantes,  $\text{kg/m}^3$

$W_{MC}$  = Agua (humedad) en el material de cobertura,  $\text{kg/m}^3$ .

$W_{A(U)}$  = Agua filtrada superiormente,  $\text{kg/m}^3$

$W_{GV}$  = Agua perdida en la formación del gas del relleno,  $\text{kg/m}^3$

$W_{VA}$  = Agua perdida como vapor de agua saturado con el gas del relleno,  $\text{kg/m}^3$

$W_E$  = Agua perdida debido a la evaporación superficial,  $\text{kg/m}^3$

$W_{F(L)}$  = Agua que sale inferiormente (en la celda localizada directamente por encima de un sistema para la recolección del lixiviado, el agua del fondo es el lixiviado),  $\text{kg/m}^3$

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Se prepara el balance hidrológico del relleno añadiendo la masa del agua entrante por unidad de área de una capa concreta del relleno, para un incremento de tiempo dado, al contenido de humedad de esa capa final del incremento del tiempo anterior y sustrayendo la masa de agua perdida de la capa durante el período de tiempo actual. El resultado se conoce como "agua disponible", en el incremento de tiempo actual, para una capa particular del relleno.

Para determinar si se formará lixiviado, se compara la capacidad de campo del relleno con la cantidad de agua presente. Si la capacidad de campo es menor que la cantidad de agua presente, se formará lixiviado.

Por lo general, la cantidad de lixiviado está en función directa de la cantidad de agua externa que entra en el relleno. De hecho, si se construye correctamente un relleno, se puede eliminar la producción de cantidades medibles de lixiviado. Cuando se añaden lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales a los residuos sólidos para incrementar la cantidad de metano producido, deben acondicionarse instalaciones para el control de lixiviado y, en algunos casos, pueden necesitarse instalaciones para el tratamiento del lixiviado.

#### 2.4 TASAS DE FILTRACION DE AGUA A TRAVES DE LAS CAPAS DE COBERTURA INTERMEDIA Y FINAL EN RELLENOS SANITARIOS.

Normalmente se estima la filtración del agua de lluvia o de deshielo a través de la capa de suelo por encima de la capa de drenaje, o a través de una capa de cobertura compuesta solamente de suelo, utilizando un balance hidrológico con la siguiente expresión:

$$S_{LC} = P - R - ET - PER_{sw}$$

donde:

$S_{LC}$  = Cambio en la cantidad de agua almacenada en una unidad de volumen de cobertura de relleno,

$P$  = Cantidad de precipitación atmosférica por unidad de área

$R$  = Cantidad de escorrentía por unidad de área

**ET= Cantidad de agua perdida mediante evapotranspiración por unidad de área**

**PER<sub>sw</sub>= Cantidad de agua que se filtra a través de la unidad de área de la cobertura del relleno y que entra en los residuos sólidos**

La cantidad total de agua que se puede almacenar en un volumen unitario de suelo dependerá de la capacidad de campo (CC) y del porcentaje de marchitez permanente (PMP). Los demás factores que intervienen en la infiltración se enuncian a continuación.

**a) Factores de Infiltración:**

- Precipitación
- Esguerrimiento superficial
- Temperatura
- Capacidad de campo
- Punto de marchitez permanente
- Humedad
- Evapotranspiración

**Precipitación.**

Uno de los componentes primarios del ciclo hidrológico es la precipitación. Puede calificarse como el factor esencial, pues constituye la materia prima del referido ciclo.

Cuando el agua, en estado líquido o sólido, llega a la superficie de la tierra, se dice que ha precipitado.

El vapor de agua contenido en la masa de aire, a consecuencia de los cambios de presión y temperatura y del movimiento de estas masas y ayudado, en ocasiones, por minúsculos núcleos de condensación y material sólido en suspensión, se reúne en gotas de agua o cristales de hielo y cae venciendo las resistencias que se le oponen, hasta llegar a la superficie terrestre.

### **Escurrimiento superficial.**

Es la cantidad de agua de lluvia que se pierde antes de que tenga oportunidad de infiltrarse en el suelo.

Los elementos que intervienen en el escurrimiento superficial son de naturaleza meteorológica, geológica y topográfica.

Para determinar la cantidad de agua que corresponde a la fracción del escurrimiento, es razonable el uso de coeficientes de escurrimiento. Estos coeficientes proporcionan un medio para evaluar las cantidades de afluencia de la superficie debido a la precipitación, por las condiciones dadas del lugar.

Entonces el escurrimiento superficial se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

$$E_s = K_e \times P$$

Donde:

$E_s$  = Escurrimiento superficial mensual en milímetros

$K_e$  = Coeficiente de escurrimiento

**P= Precipitación pluvial mensual en milímetros.**

### **Temperatura.**

Mediante la temperatura se expresa, numéricamente, el efecto que en los cuerpos produce el calor originado por el balance entre la radiación recibida y la emitida.

Interesa, especialmente, la temperatura del aire en las inmediaciones de la superficie terrestre. El aire se calienta o se enfría a partir del suelo, por distintos medios de transmisión y por los cambios de estado físico del agua atmosférica.

La variación de temperatura sigue dos ciclos principales: el ciclo diario que presenta una forma sinusoidal, con un máximo y un mínimo muy acusados, y el ciclo anual referido a temperaturas medias diarias que presenta también forma sinusoidal, dependiendo de sus máximas y mínimas de la latitud, fundamentalmente.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

### **Capacidad de campo.**

Es el grado de humedad de una muestra que ha perdido su agua gravífica. Este concepto es de gran importancia en la agricultura pues, en la zona de acción de las plantas, representa el agua que, transcurrido un tiempo (generalmente unos tres días), después de un riego o de una lluvia, queda en el terreno, y de la cual una parte podrá ser aprovechada por la vegetación para sus funciones biológicas.

**Punto de marchitez permanente.**

Es el grado de humedad de un suelo que rodea la zona radicular de la vegetación, tal que la fuerza de succión de las raíces es menor que la de retención del agua por el terreno y, en consecuencia, las plantas no pueden extraerla. Al igual que la capacidad de campo, es un concepto eminentemente agronómico, pero que juega un importante papel en fenómenos como la evapotranspiración, de indiscutible influencia sobre el ciclo hidrológico. Su determinación en el laboratorio se hace sometiendo una muestra a presión centrífuga del orden de 15 atmósferas y hallando después su grado de humedad. Su valor real dependerá del tipo de vegetación que exista sobre el suelo y, sólo a partir de experiencias de marchitamiento de plantas (de ahí su nombre), podrá obtenerse en cada caso.

**Humedad.**

Uno de los gases que compone la mezcla llamada aire, es el vapor de agua. Su presencia se denomina humedad.

La humedad atmosférica es el elemento esencial en el ciclo hidrológico, pues es fuente de las precipitaciones e influye notablemente en la evapotranspiración.

**Evapotranspiración.**

Evapotranspiración es el resultado del proceso por el cual, el agua cambia de estado líquido a gaseoso y directamente, o a través de las plantas, vuelve a la atmósfera en forma de vapor, es decir, la evapotranspiración es la suma de la evaporación y transpiración, y el término sólo

es aplicable correctamente a una determinada área de terreno cubierta por vegetación. Cuando ésta no existe, únicamente podrá hablarse de evaporación. Por el contrario, en condiciones naturales y aunque el fenómeno tiene sus características propias, no es posible la ocurrencia exclusiva de transpiración.

Todos los fenómenos que influyen en la evaporación y en la transpiración influirán, por consiguiente, en la evapotranspiración.

La evapotranspiración es, de esta forma, la suma de todas las pérdidas por transformación del agua en vapor, sea cual sea el factor que ha actuado.

Es evidente que este fenómeno es función, esencialmente, de la alimentación en agua y, por consiguiente, del grado de humedad del suelo el cual limita, con frecuencia, su acción. Así, pues, la evapotranspiración real (ER), que aparece en las condiciones naturales de humedad del suelo, está estrechamente vinculada a éste. Por este motivo, ha sido introducida la noción de evapotranspiración potencial (EP), la cual representa la cantidad de agua que resultaría evaporada y transpirada si las reservas en agua fuesen suficientes para compensar las pérdidas máximas. A. Coutagne le ha dado el nombre de "evapotranspiración máxima hidrológica". Cuando el contenido en agua del terreno es suficiente, la evapotranspiración real es igual a la evapotranspiración potencial. En caso de déficit, es inferior.

**b) Factores de la evapotranspiración:**

- Factores físicos
- Factores fisiológicos

La tasa de evapotranspiración está determinada por el conjunto de factores que regulan la evaporación y transpiración. Por lo tanto, podemos distinguir factores físicos y factores fisiológicos.

**Factores físicos.**

Los factores físicos se reparten en dos grupos: atmosféricos e hidrológicos. Los factores atmosféricos determinan el poder evaporante en la atmósfera. El poder evaporante de la atmósfera condiciona casi, por sí solo, la evapotranspiración. Es resultado de la acción del déficit higrométrico, de la temperatura, de la velocidad, de la turbulencia del viento y de la presión barométrica. Es preciso añadir a esta lista de factores atmosféricos la influencia indirecta de las variaciones de intensidad de la luz.

Los factores hidrogeológicos condicionan el estado de la superficie evaporante del suelo. La superficie evaporante del suelo interviene a través de sus características físicas, tales como la granulometría, la porosidad, la naturaleza litológica, el manto vegetal y la riqueza en agua. Esta última está determinada por la tasa de humedad en la superficie, fruto de la alimentación a través de las aguas meteóricas o de los mantos subterráneos.

Debemos mencionar también la influencia de los factores geográficos, en particular la altitud y las zonas climáticas, que actúan sobre todo por intermedio de las variaciones de los factores meteorológicos: temperatura, presión barométrica, etc.

### **Factores fisiológicos.**

Los factores fisiológicos que condicionan la evapotranspiración, son aquellos que condicionan directamente la transpiración: especie vegetal, edad, desarrollo del follaje y profundidad de las raíces.

Desde el punto de vista práctico, dado que la evaporación depende, entre otros, de dos factores muy variables y difíciles de medir: el contenido de humedad del suelo y el desarrollo vegetal de la planta, Thornthwaite (1948) introduce un nuevo concepto optimizando ambos. Es la llamada evapotranspiración potencial o pérdida por evapotranspiración, en el doble supuesto de un desarrollo vegetal óptimo y una capacidad de campo permanentemente completa. Será, por tanto, un límite superior de la cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración y que se conoce con el nombre de evapotranspiración real. ®

#### **c) Fórmula de Thornthwaite.**

Thornthwaite utiliza, como variable primaria para el cálculo de evapotranspiración potencial, la media mensual de las temperaturas medias diarias del aire. Con ella calcula un índice de calor mensual, según la fórmula:

$$i = (t/5)^{1.514}$$

y halla el índice de calor anual

$$I = \sum i$$

siendo la  $\sum i$  la suma de los doce índices mensuales del año considerado.

$$E = 1.6 (10t/i)^a$$

E= Evapotranspiración potencial media en mm/día

t= Temperatura media diaria del aire en °C

i= índice de calor anual

$$a = 675 \times 10^{-9} i^3 - 771 \times 10^{-7} i^2 + 1972 \times 10^{-5} i + 0.49239$$

Los valores de E, calculados para cada mes, son corregidos por medio de un coeficiente K que toma en cuenta el número de días y el número real de horas, entre la salida y la puesta del sol, según la latitud del lugar.

$$ETP = K \times E$$

ETP= Evapotranspiración potencial ajustada en mm/mes

E= Evapotranspiración potencial media

K= Factor que depende de la latitud del lugar.

### 2.4.1 ESTIMACION DE LA EVAPOTRANSPIRACION REAL, A PARTIR DE VALORES DE EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL AJUSTADA

La evapotranspiración potencial ajustada es un límite superior de la cantidad de agua que vuelve a la atmósfera. Para determinar la evapotranspiración real debe tenerse en cuenta no sólo ese límite, sino también el agua que, efectivamente, existe en la zona.

El esquema de un balance hídrico, para un determinado intervalo, puede plantearse así:

$$P = ETR + Ex + VR$$

P= Precipitación en mm.

ETR= Evapotranspiración real.

Ex= Excedentes de agua (escorrentía + infiltración) en mm.

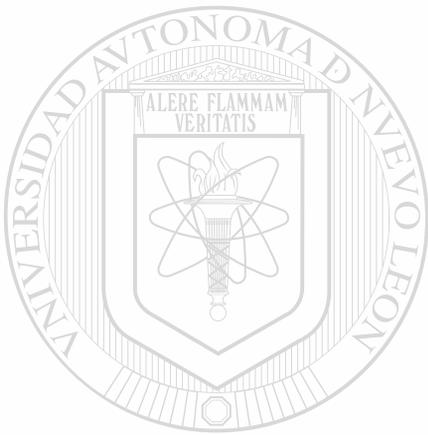
VR= Variación en la reserva de agua utilizable.

y con la condición  $ETR \leq ETP$

es decir: evapotranspiración real menor o igual que evapotranspiración potencial ajustada.

**CAPITULO 3**

**EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, NUEVO LEON**



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 3.1 LOCALIZACION DEL SITIO

El Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L. se encuentra ubicado en el km 10.5 de la carretera Monterrey - Colombia, en los límites de Salinas Victoria y Escobedo, N.L. y entre las siguientes coordenadas, según la carta topográfica escala 1:50,000 de Apodaca, Nuevo León, editada por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) (Figura 2):

Latitud Norte: 25° 48' 30"

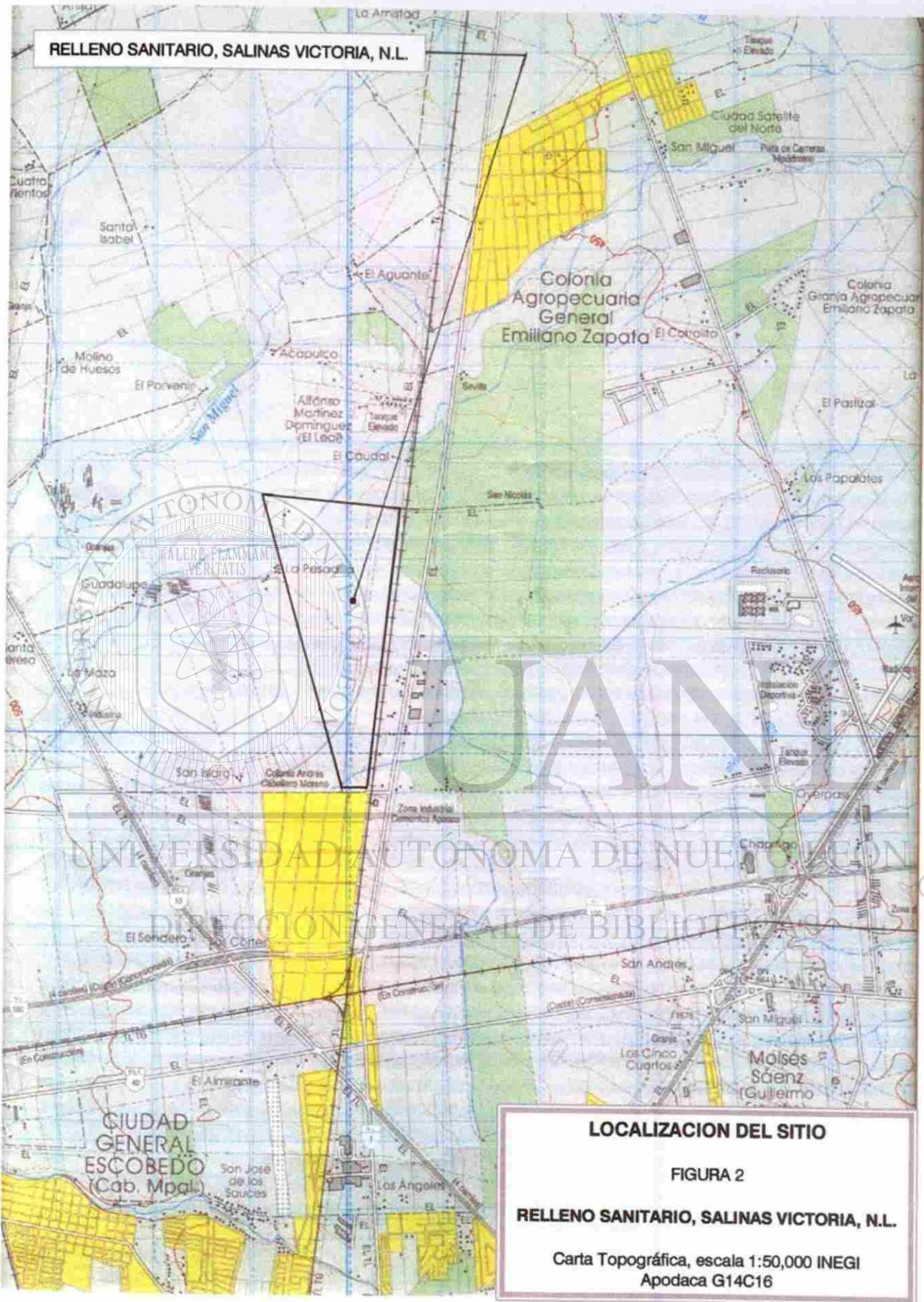
Longitud Este: 101° 18' 10"

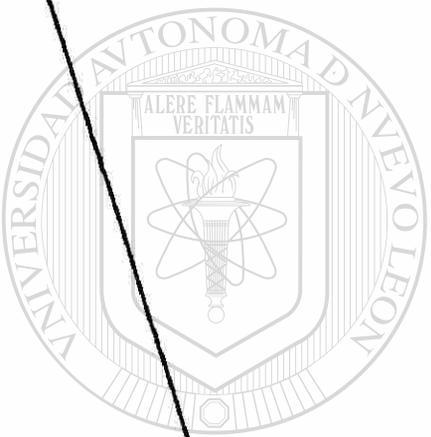
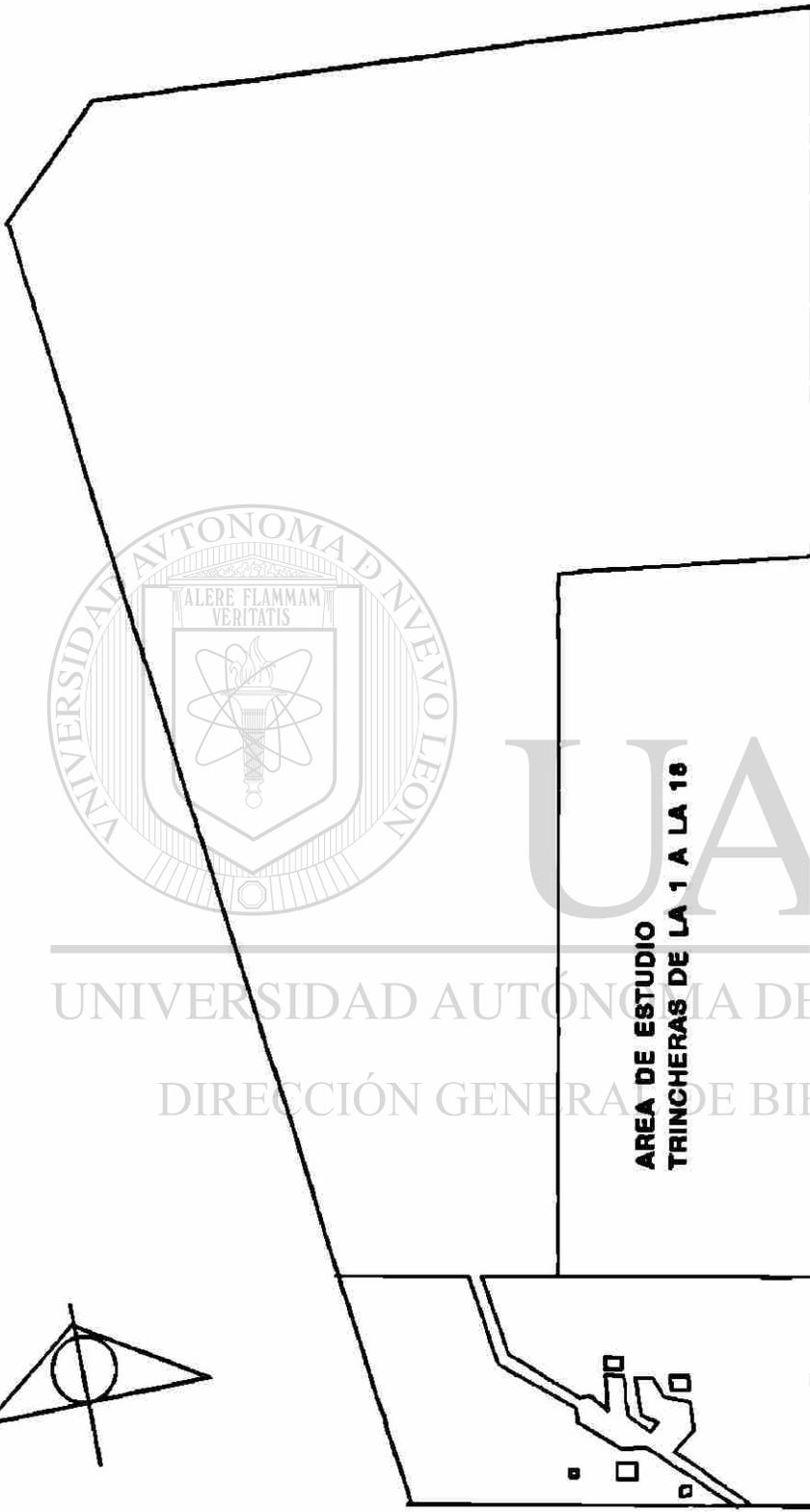
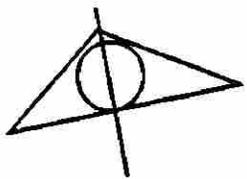
### 3.2 EL AREA DE ESTUDIO

El relleno sanitario cuenta con una superficie de 230 hectáreas, para una vida útil de 17 a 18 años, aproximadamente. El área de estudio abarca solamente la primera etapa del proyecto, la cual comprende de la celda 1 a la 18, las cuales ocupan una superficie de 42 hectáreas (Figura

3). Las operaciones de esta primera etapa empezaron en 1990 y terminaron en 1995.

Se seleccionó esta parte del relleno porque en ella no se instalaron las obras necesarias para la captación y extracción de lixiviados, sistemas de impermeabilización, ni sistemas de captación de biogás.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UANL

AREA DE ESTUDIO  
TRINCHERAS DE LA 1 A LA 18

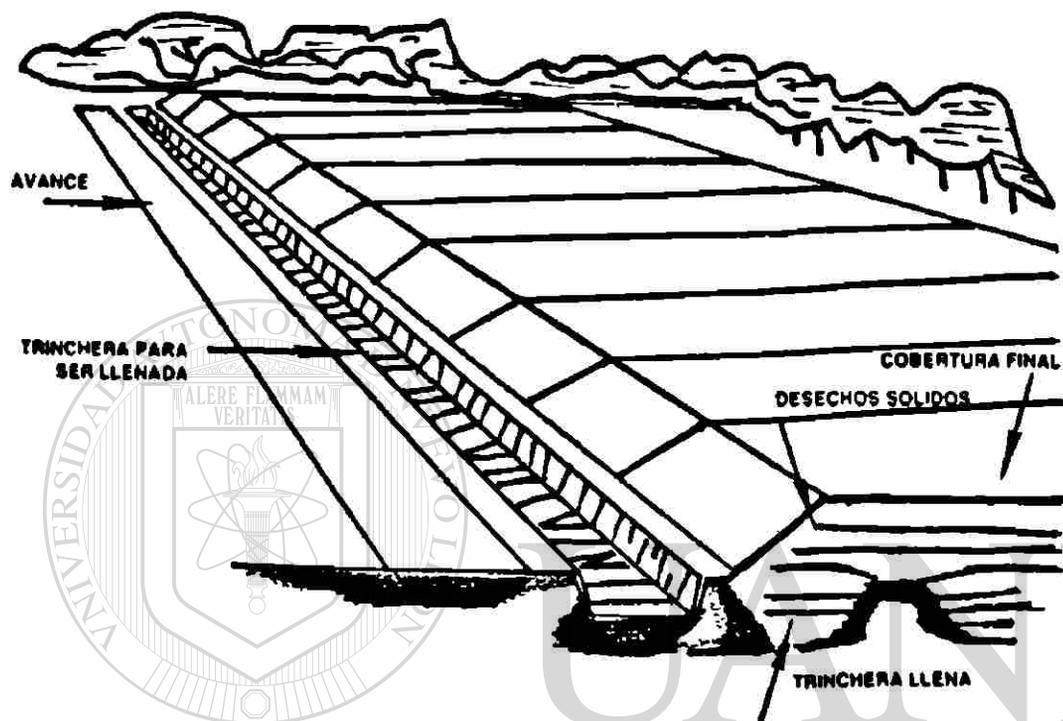
F.F.C.C. A LAREDO

**RELLENO SANITARIO  
Salinas Victoria, N.L.**

**CROQUIS DE LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO**

**FIGURA 3**

Ing. Elías Vázquez Godina



**FIGURA 4** Representación esquemática de la construcción del Relleno Sanitario utilizando los métodos de Área y Trinchera.

Residuos Sólidos Municipales. 1991 Programa de Salud Ambiental. OPS, OMS

### 3.3 CARACTERISTICAS GENERALES DEL RELLENO SANITARIO.

El relleno sanitario fue diseñado para recibir los desechos sólidos generados en el Area Metropolitana de Monterrey e inició sus operaciones en 1990, recibándose aproximadamente 1300 ton. de residuos sólidos por día, incrementando esta cantidad con el transcurso de los años. En total, en el área de estudio, se recibieron 6.5 millones de toneladas de residuos sólidos en 5 años, lo que da un total de 3,562 Ton. de residuos por día.

Cabe aclarar que, en esta primera etapa, no sólo se recibió la basura generada en ese momento en el Area Metropolitana de Monterrey, sino que se recibieron desechos sólidos que se encontraban en los diferentes tiraderos, a cielo abierto, principalmente el que estaba ubicado en la antigua planta de residuos sólidos, en el municipio de Monterrey.

El Método de construcción utilizado para el relleno sanitario es una combinación de área y trinchera. Mediante esta combinación, se utiliza primero el de trinchera y posteriormente el de área en la parte superior. Con la utilización de este método aumenta la vida útil del relleno sanitario. (Figura 4).

Las medidas de una trinchera "tipo" son de 50 metros de ancho por 300 metros de largo, 7 metros de profundidad y 18 metros de altura, a partir del nivel natural del terreno. Cada trinchera con un total de 25 metros, aproximadamente.

Los residuos fueron cubiertos diariamente con una capa de arcilla de 15 cm de espesor colocándose, además, una cubierta intermedia de 30 cm. y una cubierta final de 60 cm de espesor.

### 3.4 COMPOSICION DE LOS RESIDUOS SOLIDOS QUE SE RECIBEN EN EL RELLENO SANITARIO<sup>1</sup>.

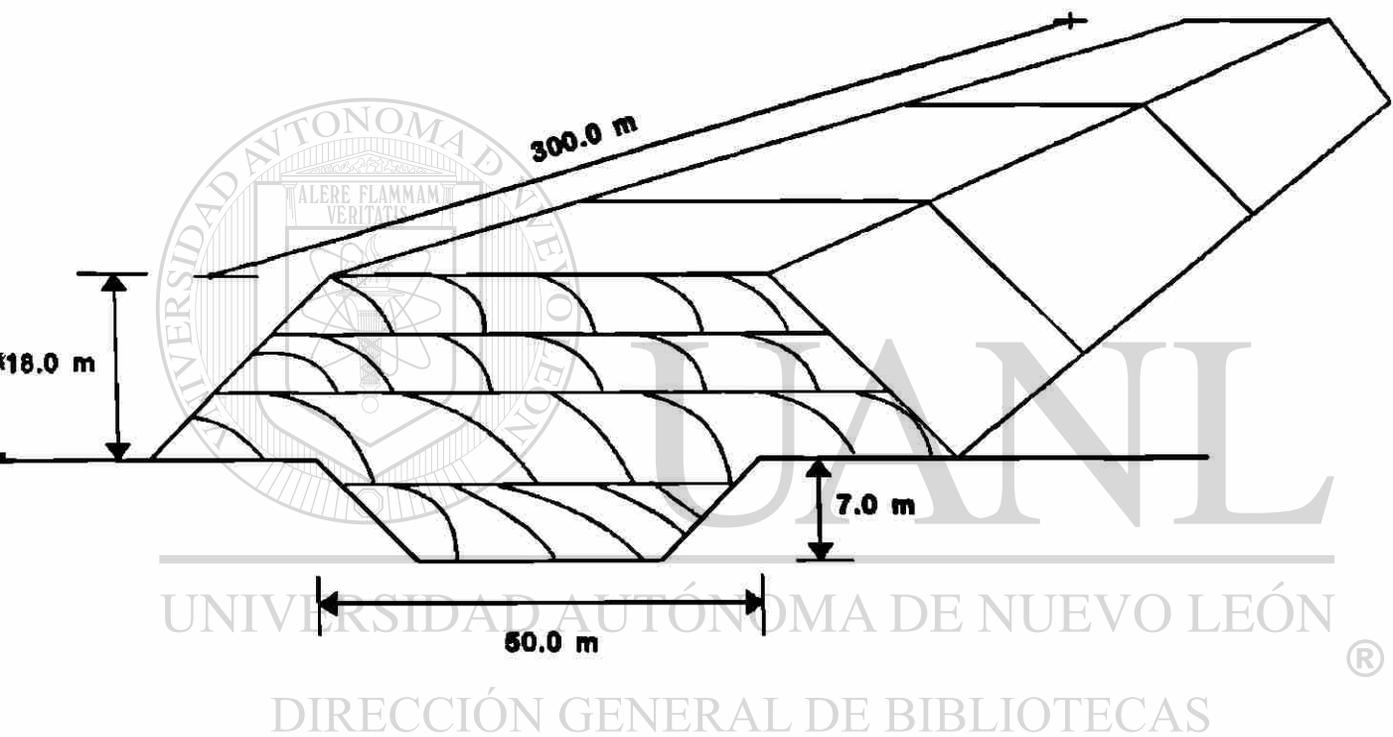
De acuerdo con las cifras de SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social), el 53% de la basura generada en México es orgánica y el restante 47%, es inorgánica.

Por su origen, el 60% de los residuos provienen de las casas, el 17% de la industria, el 18% del comercio, el 3% de los servicios y el 2% de otras fuentes (escombros, materiales de construcción, etc.).

La caracterización de los residuos que llegan al relleno sanitario de Salinas Victoria, N.L., provenientes de los diferentes municipios del área Metropolitana de Monterrey, es la siguiente: residuos alimenticios, 38.4%; plásticos de película, 6.57%; otros plásticos, 5.0%; vidrio, 4.28%; residuos de jardinería, 4.0%; papel de archivo, 3.11%; periódico, 3.06%; cartón, 2.42%; aluminio, 0.85%; entre otros materiales como fierro, pañales desechables, madera, artículos de piel, trapos viejos, etc.

---

<sup>1</sup> Comité de Reciclaje del Estado de Nuevo León. Programa "Nuevo León Recicla".



**FIGURA 5** Trinchera Tipo

Ing. Elías Vázquez Godina

## 3.5 RASGOS FISICOS DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 3.5.1 GEOLOGIA<sup>1</sup>

El terreno está ubicado en una planicie que se extiende al norte de la ciudad de Monterrey, N.L., a un costado de la carretera a Colombia. Fisiográficamente, esta planicie forma parte de la Provincia llamada Llanura Costera del Golfo Norte, que penetra en forma digitada entre las estribaciones postreras de la Provincia de la Sierra Madre Oriental.

Localmente, se constituye en un valle muy abierto de pendientes suaves, cubierto, mayoritariamente, por materiales finos, producto de la erosión de las montañas aledañas; en donde las corrientes superficiales fueron labrando sus cauces y propiciando la acumulación de sus aportes limosos y arcillosos.

Así, las modalidades de disección fluvial pasaron por diferentes fases de incisión, en donde los procesos de arroyamiento, en sus modalidades lineal, laminar y difusa, comenzaron con el entallado de cauces lineales en la superficie del sustrato o base rocosa lutítica campano-mastrichense (Ks) de la Formación Méndez, que pasó de ser allanada a irregular. Más tarde empezaron las fases de aluvionamiento o acumulación y, con ello, la construcción de las llanuras aluviales, entre incisiones de lechos de arroyos intermitentes sinuosos y entrelazados llamados RAMBLAS.

---

<sup>1</sup> Estudio Geológico realizado por el Departamento de Geotecnia del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL para SIMEPRODE.(1997)

Actualmente, la llanura o planicie donde se encuentra el terreno en estudio está delimitada por dos grandes arroyos del tipo rambla. Al norte se encuentra el Río Salinas y al sur el Río Pesquería; por lo general, los ríos o arroyos suelen seguir las grandes líneas de dislocación disyuntiva (fallas geológicas); sin embargo, éstos se encuentran a una distancia tal del terreno que no afectan su seguridad geocológica.

### **Evolución y configuración geológica regional.**

A medida que ocurría el levantamiento de la Sierra Madre Oriental por procesos endógenos, se empezaron a activar, también, las acciones de los procesos exógenos, tales como la erosión en el campo de las exposiciones rocosas abiertas, de las series mesozoicas; las cuales fueron transportadas corriente abajo y depositadas en terrenos deprimidos, que actuaron como cuencas o de sedimentación continental, que se han denominado "Planicies de Rellenamiento".

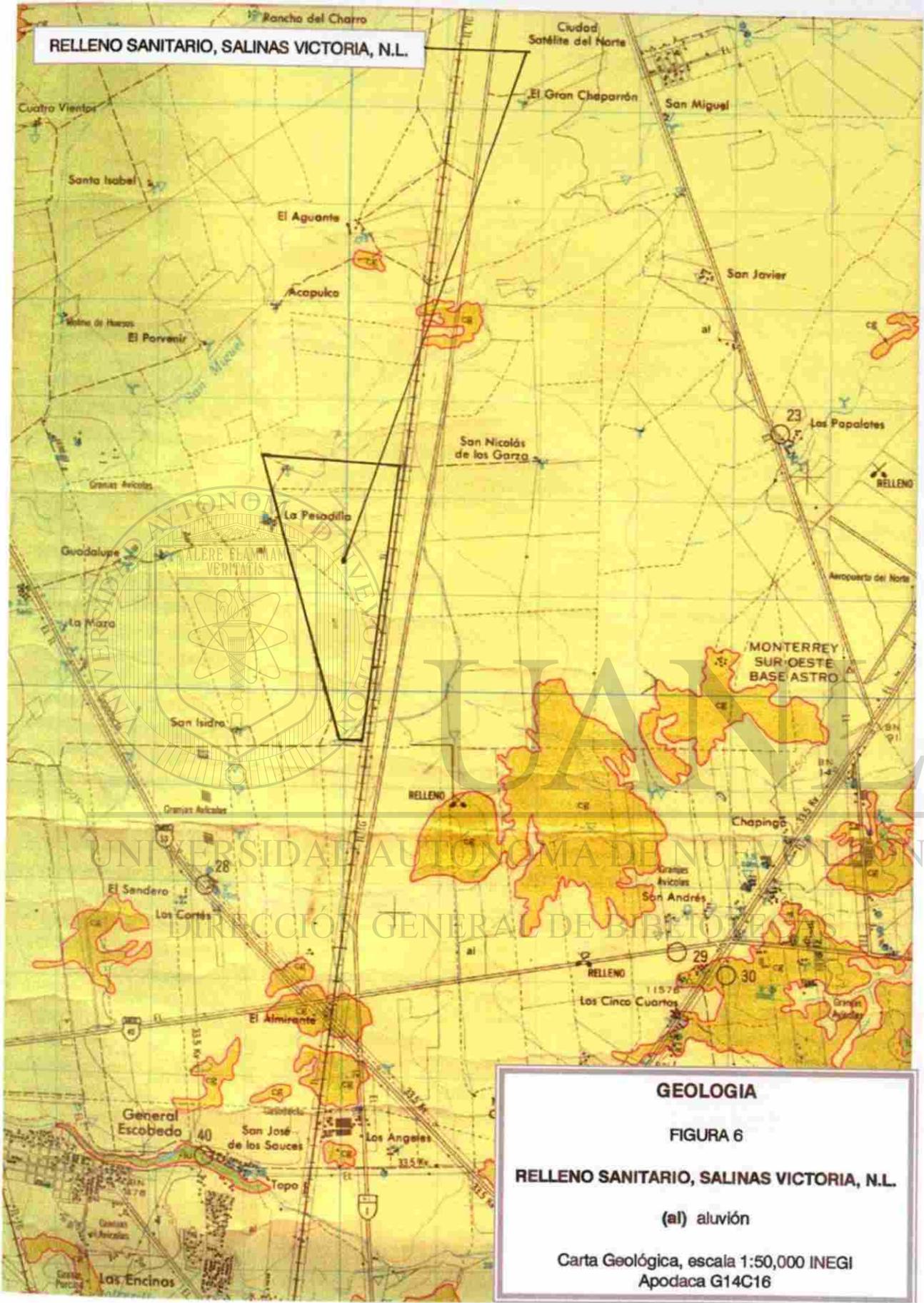
La planicie, como forma de acumulación, se compone de depósitos aluviales, coluviales, deluviales e iluviales y en menor proporción los eólicos. (Figura 6). Estos depósitos los hay muy recientes, casi contemporáneos, pero también pueden ser antiguos y encontrarse fosilizados. En fin, que es el territorio en donde, en tiempos pretéritos, los procesos de acumulación de sedimentación dominaron sobre los de salida y transporte de los agentes erosivos, de manera que la estructura general constituía un modelo o paisaje de aplanamiento llano y con mínima pendiente. Esto difiere de los procesos exógeno-denudatorios actuales, que son de naturaleza erosiva y, por lo tanto, están remodelando las formas después de su acumulación.

### **Definición y carácter de la estructura geológica local.**

Localmente, el terreno estudiado consiste de un manto de sedimentos aluviales, con un espesor que oscila entre los 20 y 14 metros de profundidad, que descansa sobre un estrato o base rocosa de lutitas campano-mastrichtenses (Ks) pertenecientes a la Formación Méndez. En la cabeza de roca, hacia el contacto con el manto aluvial, la roca se muestra con distintos grados de intemperismo que van, desde una condición de suelo arcilloso, en la parte superior, hasta la de lutita decolorada y fracturada, hacia el interior del macizo rocoso.

En el manto de aluvionamiento del terreno estudiado existen dos niveles o etapas de acumulación de sedimentos aluviales. Al primer nivel de aluvionamiento se le llamará nivel basal, y es el que se encuentra adosado al sustrato rocoso lutítico y consiste de rocas detrítico-clásticas que corresponden a las clases granulométricas de las ruditas (>2 mm), las arenitas (entre 1/16 y 2 mm) y la fracción gruesa de las lutitas (<1/16 de mm).

Hacia la base de este primer nivel de aluvionamiento existe un lecho de gravas con diferentes grados de consolidación, destacándose algunos lentes y lentejones de conglomerado tipo pudinga. Hay que señalar el hecho de que este lecho de gravas se encuentra empacado por una matriz arcillo-limosa cuya permeabilidad, debida a la porosidad efectiva primaria, ha decaído hasta llegar a ser prácticamente impermeable, con respecto a su calidad de gravas; sin embargo, podría presentarse algo de permeabilidad, por fisuras o grietas en la masa rocosa.



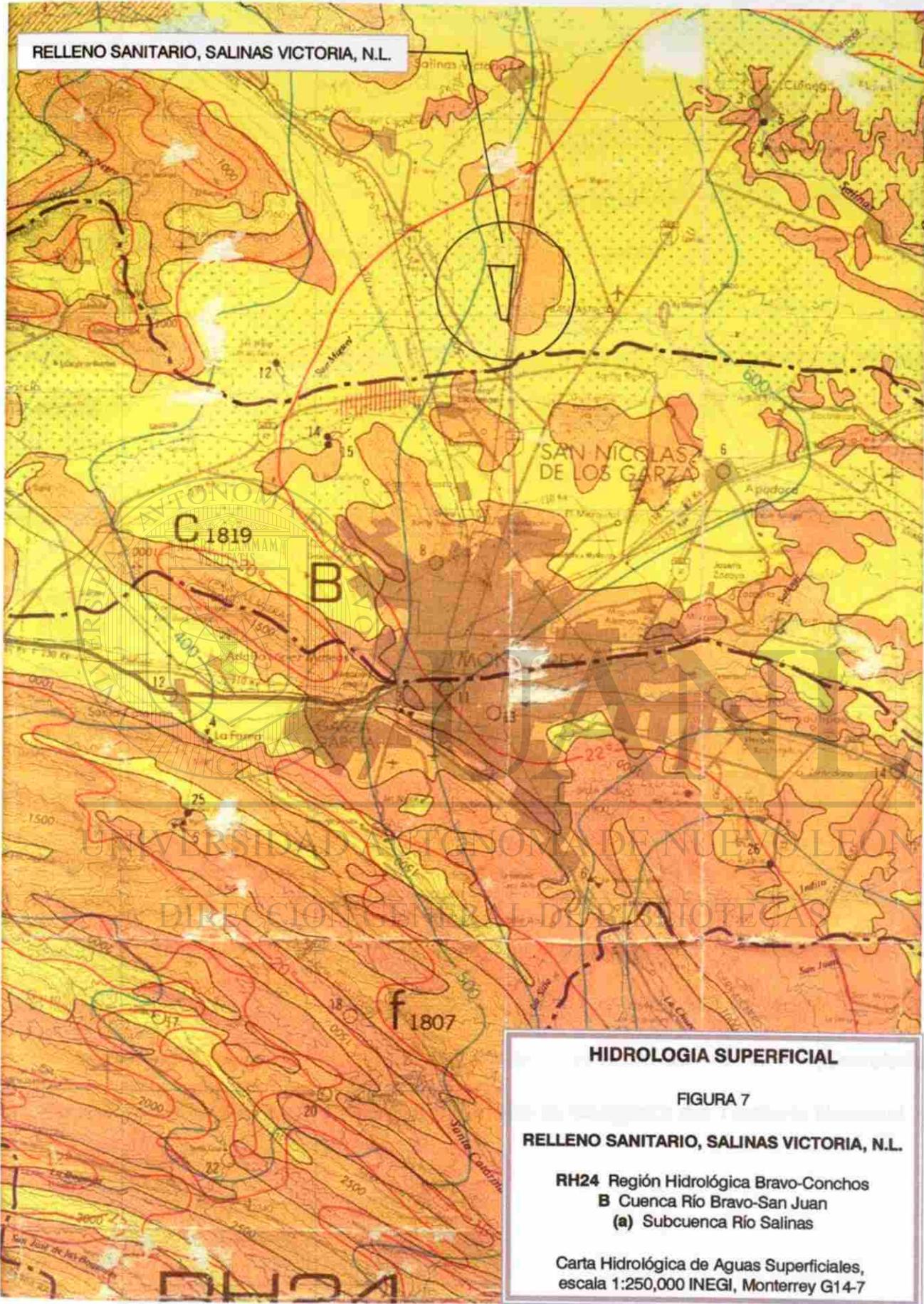
Descansando sobre el lecho de gravas, se tiene un lecho de limo arcilloso café claro consolidado, y también con valores bajos de permeabilidad.

El segundo nivel de aluvionamiento es el más joven y superficial, ya que descansa sobre el primero, y está integrado por un lecho de arcilla con intercalaciones de limo, ambos calichosos en la base de este segundo nivel. Coronando a estas arcillas, y en el nivel de superficie, se presenta un lecho delgado de arcilla limosa con algo de materia orgánica. El segundo nivel presenta la existencia de un paleocanal o arroyo fósil, es decir, que durante la fase de rellenamiento del segundo nivel existió un arroyo que se encajó en los sedimentos del primer nivel de aluvionamiento, disectando sobre este proceso todo el lecho limoso y llegando a tajar algo del lecho de gravas del nivel de aluvionamiento base.

Este cauce fósil se localiza hacia el oeste-noreste del terreno estudiado y el que, además, en el nivel de superficie coincide con el trazo de un arroyo que actualmente discurre sobre este terreno y es afluente del arroyo San Miguel, que cruza la llanura más hacia el norte.

### **3.5.2 HIDROLOGIA.**

La zona de estudio se ubica dentro de la región Bravo-Conchos, Región Hidrológica 24 (RH24), perteneciente a la vertiente del Golfo, y en la cuenca del Río Bravo-San Juan (B) la cual tiene un área aproximada de 19,804.91 km, siendo una de sus corrientes principales el río San Juan, segundo efluente de importancia del río Bravo.



Específicamente, el sitio en estudio se localiza en la subcuenca hidrológica (a) del río Salinas con un área aproximada de 1700 km., según la carta Hidrológica de Aguas Superficiales escala 1:250,000 Monterrey G14-7, editada por la SPP (Secretaría de Programación y Presupuesto) y la Dirección General de Geografía del Territorio Nacional. (Figura 7)

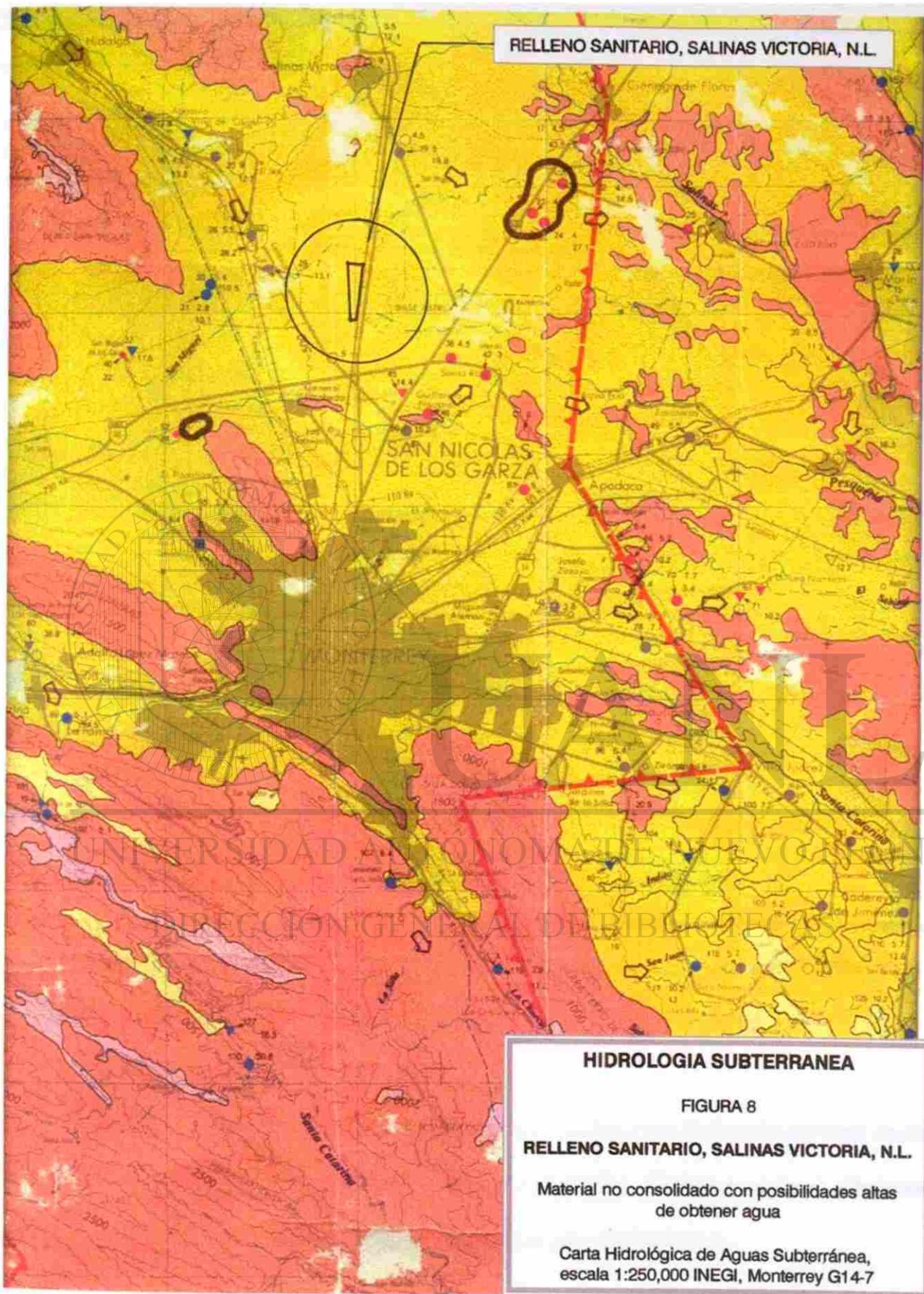
El agua de la región tiene la tendencia natural de fluir hacia el Golfo de México; el drenaje en las sierras es de tipo rectangular, mientras que en los valles es paralelo y subparalelo.

Los escurrimientos se presentan con valores de coeficiente que varían de 0 a 5%.

En el predio se definen tres escurrimientos intermitentes: al norte se encuentra el río Salinas y el arroyo San Miguel; el primero, a una distancia aproximada de 15 km y el segundo a 7.5 km del predio; y al sur se encuentra el río Pesquería, a una distancia aproximada de 5 km.

### 3.5.3 GEOHIDROLOGIA.

El sitio está localizado en una zona de materiales no consolidados, con posibilidades altas de obtener agua, compuesta principalmente por depósitos aluviales de composición areno-arcillosa que rellenan, por lo general, estructuras sinclinales, ello según la carta de Hidrología de Aguas Subterráneas, escala 1:250,000 Monterrey G14-7, editada por la SPP (Secretaría de Programación y Presupuesto) y la Dirección General de Geografía del Territorio Nacional. (Figura 8).



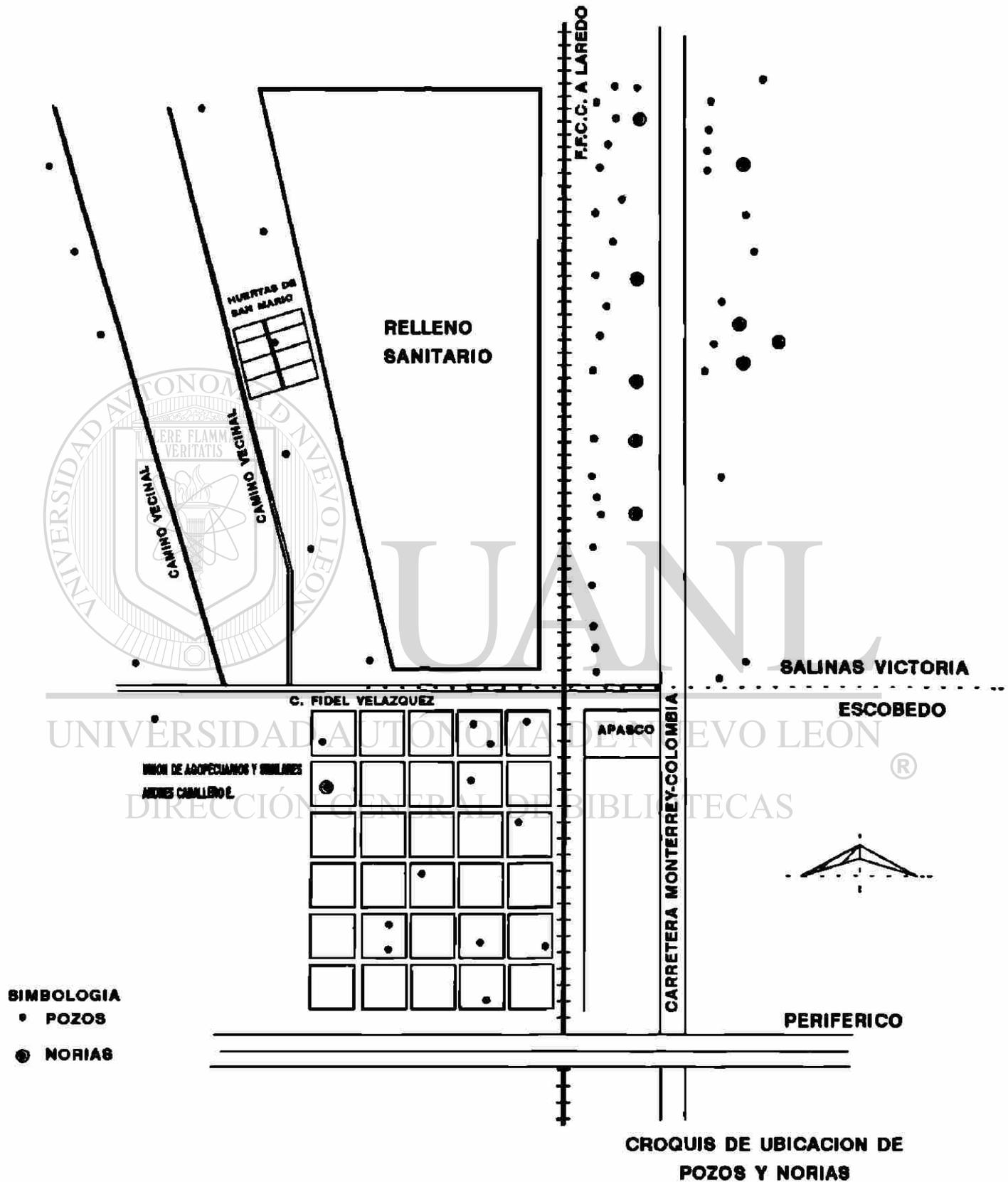
La dirección del flujo subterráneo es similar al que presentan los escurrimientos superficiales.

De acuerdo con los estudios realizados por el Departamento de Geotecnia del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL (1997), se pudieron establecer dos sistemas someros de agua subterránea que se indican a continuación:

Sistema	Tipo de acuífero	Fronteras en el subsuelo	Calidad química Schöeller-berksov
1	Acuífero libre de manto en conglomerados y gravas	De 11.8 a 16.1 m	Bicarbonatada-cálcica Agua alcalina
2	Acuífero libre en fracturas de roca lutíticas	De 30.0 a 32.0 m	Sulfatada-Cálcica Agua no alcalina

En la zona existe una gran cantidad de norias y pozos que son utilizados principalmente para abrevadero; los gastos son muy pobres y varían de 0.1 a 0.5 L/s. (Figura 9).

Es de importancia mencionar que el sitio se encuentra localizado en una zona de veda decretada el 17 de julio de 1951 y controlada por la Comisión Nacional del Agua, órgano administrativo desconcentrado de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.



Ing. Elías Vázquez Godina

FIGURA 9

### 3.5.4 CLIMATOLOGIA.

Las sierras localizadas al sur del AMM funcionan como una barrera que detiene la humedad proveniente del Golfo de México; esto trae como consecuencia una escasez de humedad que propicia, en toda el Area Metropolitana de Monterrey, un clima de árido a semiárido.

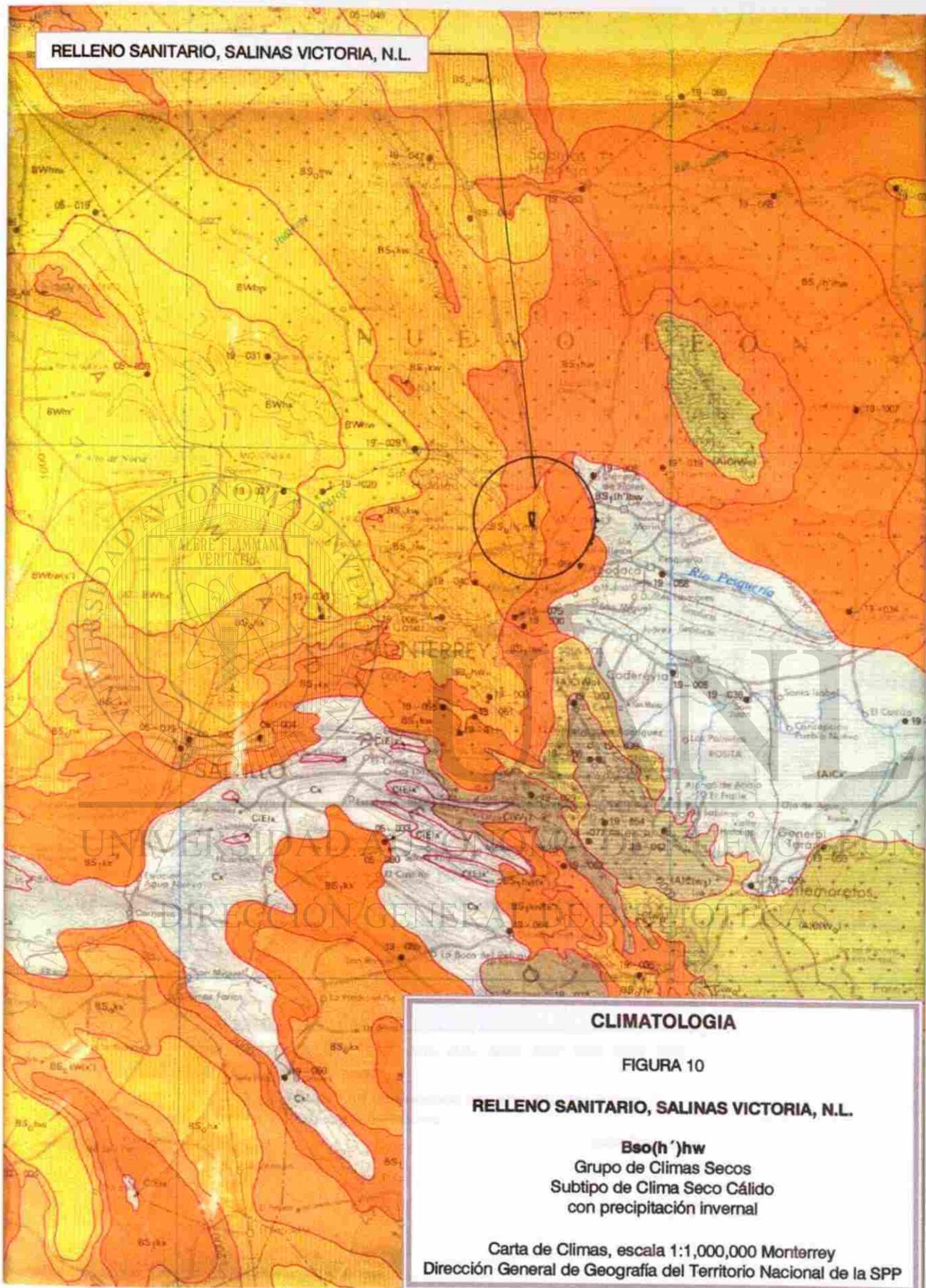
Según la carta de climas escala 1:1,000,000, editada por la Secretaría de Programación y Presupuesto, en la zona de estudio prevalece el tipo de clima que, de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García para la República Mexicana, corresponde al  $BS_0(h')hw$ . (Figura 10).

Climas secos.

Los climas dominantes de la llanura costera del Golfo Norte son los semicálidos subhúmedos, aunque en un área reducida del noreste se presenta el clima seco.

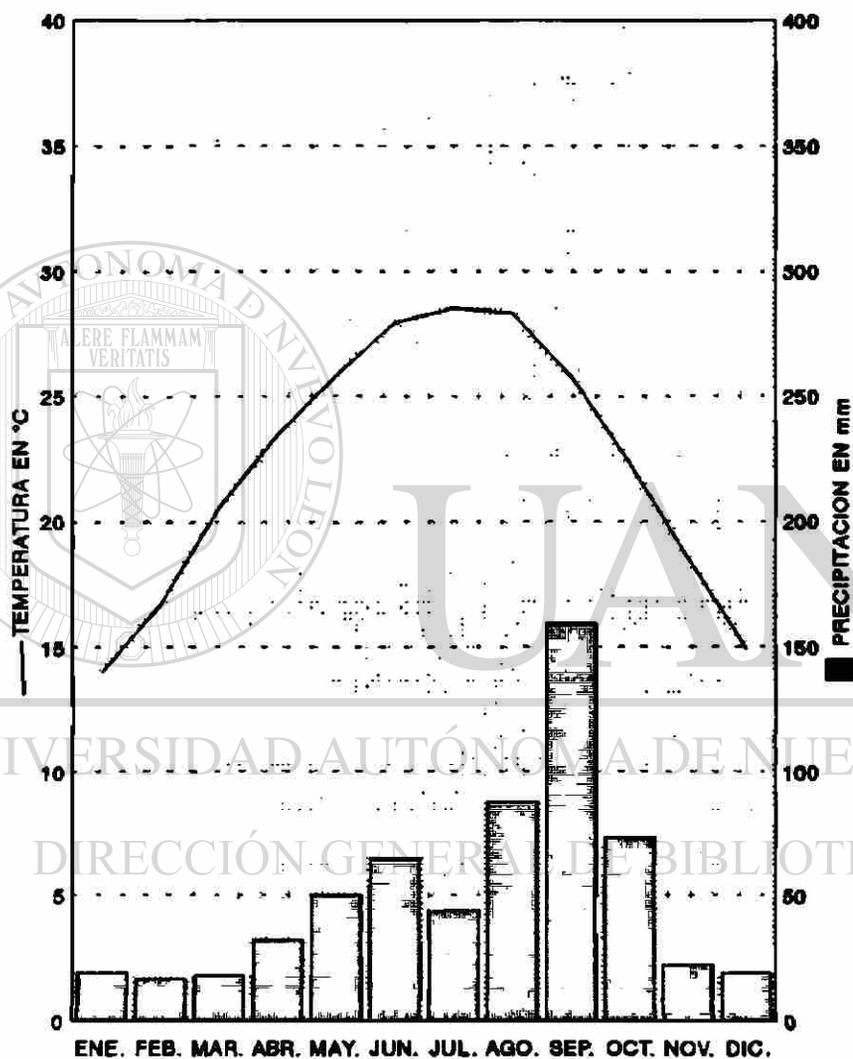
Los climas secos se distribuyen en el extremo norte del estado y se reconocen principalmente debido a que la evaporación excede a la precipitación.

Estos tipos de climas se caracterizan por la baja humedad y la escasa precipitación ocasionada, entre otros factores, por la influencia de vientos en la zona. Se exceptúa de esta situación la porción sur en donde, debido a la influencia de las masas de aire húmedo, el clima es semicálido



CLIMOGRAMA<sup>a</sup>

ESTACION: OBSERVATORIO METEOROLOGICO MONTERREY



<sup>a</sup> ELABORADO CON INFORMACION DEL PERIODO 1968 A 1988  
 Ing. Elías Vázquez Godínez

FIGURA 11

subhúmedo. Las lluvias se presentan en verano y son escasas el resto del año. Hay climas secos muy cálidos, hasta secos con temperaturas muy frías.

### $BS_o(h')hw$

Grupo de climas secos B. Tipo de climas seco ( $S_o$ ). Subtipo de clima seco cálido [(h')], precipitación invernal (w). A este clima se le conoce también como el clima de estepa; presenta una temperatura media anual de 22°C y una temperatura inferior a los 18°C en el mes más frío; su régimen de lluvias es de verano y el porcentaje de lluvias invernal respecto al total anual está entre 5 y 10.2% (w).

La precipitación total anual es de 300 a 600 mm y una temperatura media anual de 18 a 22°C. Asimismo, la precipitación mensual máxima ocurre en septiembre, con 150 y 160 mm, y en los meses de febrero y marzo presentan menos lluvia con 16 y 17 mm. De igual manera, en el mes de julio se da la temperatura media más alta, en un intervalo entre 28 y 29°C, y la mínima en enero o diciembre, con 14 y 15°C. (Figura 11).

### Comportamiento de los vientos<sup>2</sup>

En el valle intermontano, donde se asienta el área metropolitana de Monterrey, la influencia orográfica de la Sierra Madre Oriental, así como las estructuras geológicas de los cerros de Las Mitras, La Silla, el Topo Chico, al igual que la Sierra del Fraile y San Miguel, ejercen características especiales sobre el comportamiento de los vientos, de tal manera que, al año, se

<sup>2</sup> Síntesis geográfica del Estado de Nuevo León. INEGI

tienen bien definidos dos cambios en la dirección de los vientos dominantes. Regularmente, durante los meses de primavera y verano, se presenta una dirección del viento predominante este-oeste, que es originado por lo que se denominan los vientos Huastecos, mientras que durante los meses de otoño e invierno, la dirección del viento predominante es del norte hacia el sureste, intensificándose en los meses de febrero y marzo.

### **Intemperismos severos<sup>3</sup>**

En cuanto a los intemperismos severos, éstos se encuentran constituidos por:

- **Heladas:** Las cuales se presentan en un rango de 0 a 20 días durante el año.
- **Granizadas** De distribución irregular ya que no guardan un patrón de comportamiento definido; se presentan, en general, con una ocurrencia de 0 a 2 días durante el año. Su incidencia está asociada a los primeros meses del período de lluvias: abril, mayo y junio.
- **Huracanes:** Con frecuencia de uno cada tres años, en los últimos 100 años.

---

<sup>3</sup> Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León. Secretaría de Programación y Presupuesto. México. 1986

### 3.6 CALCULO DE LOS PARAMETROS PARA DETERMINAR LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS.

#### 3.6.1 CALCULO DE LA ESCORRENTIA (Por: Ing. Elías Vázquez Godina).

Para calcular la escorrentía en la zona del relleno, se tomó un coeficiente de escurrimiento del 30%<sup>1</sup> considerando que la cubierta final es de arcilla compactada y con una pendiente del 2%<sup>2</sup>.

Los datos de precipitación fueron tomados de la estación "Observatorio Meteorológico Monterrey" controlada por la Comisión Nacional del Agua, ubicada en el municipio de San Nicolás de los Garza, N.L. A continuación se presentan los cálculos de 1990 a 1998.

**Tabla 3. Cálculo de la escorrentía**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

Año: 1990

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	4.9	1.47
Febrero	-	0
Marzo	43.7	13.11
Abril	29.1	8.79
Mayo	19.1	5.73
Junio	30.2	9.06
Julio	27.5	8.25
Agosto	60.0	18
Septiembre	157.5	47.25
Octubre	95.6	28.68
Noviembre	0.9	0.27
Diciembre	-	0

Todas las unidades están en mm

<sup>1</sup> Apuntes de estudio para la clase de Alcantarillado Sanitario. Preparado por: Ing. Horacio González Santos

<sup>2</sup> Fuente: SIMEPRODESO

**Tabla 3. Cálculo de la escorrentía (Continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1991**

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	10.9	3.27
Febrero	6.7	2.01
Marzo	8.0	2.4
Abril	26.6	7.98
Mayo	55.6	16.68
Junio	88.3	26.49
Julio	19.7	5.91
Agosto	6.2	1.86
Septiembre	118.0	35.40
Octubre	5.7	1.71
Noviembre	34.1	10.23
Diciembre	61.5	18.45

**Año: 1992**

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	74.9	22.47
Febrero	15.7	4.71
Marzo	18.7	5.61
Abril	25.4	7.62
Mayo	124.8	37.44
Junio	2.6	0.78
Julio	6.2	1.86
Agosto	57.5	17.25
Septiembre	44.9	13.47
Octubre	33.6	10.08
Noviembre	22.0	6.6
Diciembre	11.4	3.24

Todas las unidades están en mm

**Tabla 3. Cálculo de la escorrentía (Continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1993**

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	38.5	11.55
Febrero	21.5	6.45
Marzo	20.6	6.18
Abril	10.0	3.0
Mayo	95.0	28.5
Junio	267.0	80.10
Julio	0.1	0.30
Agosto	10.9	3.27
Septiembre	222.1	66.63
Octubre	21.0	6.30
Noviembre	13.0	3.90
Diciembre	2.5	0.75

**Año: 1994**

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	45.3	13.59
Febrero	8.1	2.43
Marzo	45.0	13.5
Abril	8.6	2.58
Mayo	61.5	18.45
Junio	33.2	9.96
Julio	7.5	2.25
Agosto	27.7	8.31
Septiembre	238.3	71.49
Octubre	27.6	8.28
Noviembre	28.9	8.67
Diciembre	33.4	10.02

Todas las unidades están en mm

**Tabla 3. Cálculo de la escorrentía (Continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1995**

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	9.3	2.79
Febrero	8.6	2.58
Marzo	17.6	5.28
Abril	4.4	1.32
Mayo	59.7	17.91
Junio	18.6	5.58
Julio	3.6	1.08
Agosto	184.7	55.41
Septiembre	20.8	2.64
Octubre	7.1	2.13
Noviembre	26.7	8.01
Diciembre	12.2	3.66

**Año: 1996**

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	13.8	4.14
Febrero	0.2	0.06
Marzo	0.0	0.0
Abril	13.1	6.55
Mayo	2.5	0.75
Junio	52.8	15.84
Julio	5.6	1.68
Agosto	304.6	91.38
Septiembre	6.4	1.92
Octubre	84.5	25.35
Noviembre	9.6	2.88
Diciembre	1.9	0.57

Todas las unidades están en mm

**Tabla 3. Cálculo de la escorrentía (Continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1997**

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	11.9	3.57
Febrero	25.8	7.74
Marzo	85.2	25.56
Abril	96.8	29.04
Mayo	86.6	25.98
Junio	58.1	17.43
Julio	5.1	1.53
Agosto	0.8	0.24
Septiembre	70.6	21.18
Octubre	141.2	42.36
Noviembre	25.2	7.56
Diciembre	4.6	1.38

**Año: 1998**

MES	PRECIPITACION	ESCORRENTIA
Enero	0.1	0.03
Febrero	16.6	4.98
Marzo	27.1	8.13
Abril	15.2	4.56
Mayo	-	0
Junio	32.3	9.69
Julio	5.3	1.59
Agosto	66.5	19.95
Septiembre	144.5	43.35
Octubre	70.5	21.15
Noviembre	55.0	16.50
Diciembre	-	0

Todas las unidades están en mm

### 3.6.2 CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL AJUSTADA

(Por: Ing. Elías Vázquez Godina)

Para el cálculo de la Evapotranspiración Potencial Ajustada se utilizó la fórmula de Thornhwaite y las temperaturas fueron tomadas de la Estación "Observatorio Meteorológico Monterrey", ubicada en el municipio de San Nicolás de los Garza, N.L., controlada por la Comisión Nacional del Agua. El coeficiente K es un valor que toma en cuenta el número de días y el número real de horas entre la salida y la puesta del sol, según la latitud del lugar. El sitio tiene una latitud de 25°48'30". A continuación se presentan las tablas del resumen de los cálculos de 1990 a 1998.

En donde:

T= Temperatura media del aire en °C

i= Índice de calor anual=  $(T/5)^{1.514}$

a=  $675 \times 10^{-9} i^3 - 771 \times 10^{-7} i^2 + 1972 \times 10^{-5} i + 0.49239$

ET= Evapotranspiración potencial media=  $1.6(10T/i)^a$

ETP= Evapotranspiración potencial ajustada= ET(K)

K= Factor que depende de la latitud del lugar y del mes del año

**Tabla 4. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial Ajustada**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1990**

MES	T°C	I	a	ET	K	ETP
Enero	13.5	4.52	0.58	11.47	0.925	10.6
Febrero	16.0	5.85	0.61	11.85	0.885	10.5
Marzo	20.6	8.59	0.66	12.88	1.030	13.3
Abril	23.4	10.43	0.69	13.71	1.065	14.6
Mayo	25.3	11.74	0.71	14.34	1.155	16.6
Junio	27.5	13.32	0.74	15.17	1.140	17.3
Julio	28.1	13.77	0.75	15.41	1.170	18.0
Agosto	28.2	13.84	0.75	15.45	1.125	17.4
Septiembre	25.7	12.02	0.72	14.49	1.025	14.9
Octubre	22.0	9.49	0.67	13.28	0.990	13.1
Noviembre	18.6	7.36	0.63	12.39	0.950	11.8
Diciembre	14.5	5.04	0.59	11.61	0.885	10.4

**Año: 1991**

MES	T°C	I	a	ET	K	ETP
Enero	13.8	4.67	0.58	11.51	0.925	10.6
Febrero	17.4	6.65	0.62	12.12	0.885	10.7
Marzo	24.4	11.11	0.70	14.03	1.030	14.5
Abril	26.2	12.38	0.73	14.67	1.065	15.6
Mayo	26.9	12.88	0.74	14.94	1.155	17.3
Junio	28.7	14.22	0.76	15.66	1.140	17.9
Julio	26.8	12.81	0.73	14.90	1.170	17.4
Agosto	29.4	14.75	0.77	15.96	1.125	18.0
Septiembre	24.0	10.83	0.70	13.90	1.025	14.2
Octubre	20.5	8.53	0.66	12.86	0.990	12.7
Noviembre	16.2	9.96	0.61	11.89	0.950	11.3
Diciembre	15.0	5.31	0.59	11.68	0.885	10.5

**Tabla 4. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial Ajustada (continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1992**

MES	T°C	I	a	ET	K	ETP
Enero	12.3	3.92	0.57	11.35	0.925	10.5
Febrero	20.0	8.21	0.65	12.73	0.885	11.3
Marzo	20.8	8.72	0.66	12.94	1.030	13.3
Abril	22.1	9.56	0.67	13.31	1.065	14.2
Mayo	23.8	10.56	0.69	13.77	1.155	15.9
Junio	29.6	14.90	0.77	16.05	1.140	18.3
Julio	29.1	14.52	0.76	15.83	1.170	18.5
Agosto	28.1	13.77	0.75	15.41	1.125	17.3
Septiembre	26.5	12.59	0.73	14.78	1.025	15.2
Octubre	23.5	10.49	0.69	13.74	0.990	13.6
Noviembre	16.8	6.30	0.61	12.00	0.950	11.4
Diciembre	15.5	5.58	0.60	11.77	0.885	10.58

**Año: 1993**

MES	T°C	I	a	ET	K	ETP
Enero	14.9	5.25	0.59	11.67	0.925	10.8
Febrero	17.2	6.53	0.62	12.08	0.885	10.7
Marzo	20.2	8.34	0.65	12.78	1.030	13.2
Abril	23.8	10.70	0.70	13.83	1.065	14.7
Mayo	25.2	11.67	0.71	14.31	1.155	16.5
Junio	26.4	12.52	0.73	14.75	1.140	16.8
Julio	28.1	13.77	0.75	15.41	1.170	18.0
Agosto	28.8	14.29	0.76	15.70	1.125	17.7
Septiembre	25.2	11.67	0.71	14.31	1.025	14.7
Octubre	21.9	9.43	0.67	13.25	0.990	13.1
Noviembre	16.9	6.36	0.61	12.02	0.950	11.4
Diciembre	16.1	5.91	0.61	11.87	0.885	10.6

**Tabla 4. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial Ajustada (continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1994**

MES	T°C	I	a	ET	K	ETP
Enero	15.4	5.52	0.60	11.75	0.925	10.9
Febrero	16.2	5.59	0.61	11.89	0.885	10.5
Marzo	20.6	8.59	0.66	12.88	1.030	13.3
Abril	23.4	10.43	0.69	13.71	1.065	14.6
Mayo	25.8	12.09	0.72	14.52	1.155	16.8
Junio	28.3	13.92	0.75	15.49	1.140	17.7
Julio	29.4	14.75	0.77	15.96	1.170	18.7
Agosto	27.9	13.62	0.75	15.33	1.125	17.2
Septiembre	25.2	11.67	0.71	14.31	1.025	14.7
Octubre	23.4	10.43	0.69	13.71	0.990	13.6
Noviembre	20.8	8.72	0.66	12.94	0.950	12.3
Diciembre	16.4	6.08	0.61	11.93	0.885	10.7

**Año: 1995**

MES	T°C	I	a	ET	K	ETP
Enero	15.1	5.36	0.60	11.70	0.925	10.8
Febrero	18.6	7.36	0.63	12.39	0.885	11.0
Marzo	19.7	8.03	0.65	12.65	1.030	13.0
Abril	24.4	11.11	0.70	14.03	1.065	14.9
Mayo	27.8	13.54	0.75	15.29	1.155	17.7
Junio	27.7	13.47	0.75	15.25	1.140	17.4
Julio	29.3	14.67	0.77	15.92	1.170	18.6
Agosto	27.3	13.18	0.74	15.09	1.125	17.0
Septiembre	26.3	12.45	0.73	14.71	1.025	15.1
Octubre	23.9	10.77	0.70	13.87	0.990	13.7
Noviembre	19.4	7.84	0.64	12.58	0.950	11.9
Diciembre	15.4	5.52	0.60	11.75	0.885	10.5

**Tabla 4. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial Ajustada (continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1996**

MES	T°C	i	a	ET	K	ETP
Enero	15.6	5.63	0.60	11.78	0.925	10.9
Febrero	18.1	7.06	0.63	12.27	0.885	10.9
Marzo	19.3	7.78	0.64	12.55	1.030	12.9
Abril	24.3	11.04	0.70	14.00	1.065	14.9
Mayo	28.5	14.07	0.76	15.58	1.155	18.0
Junio	29.4	14.75	0.77	15.96	1.140	18.2
Julio	30.1	15.28	0.78	16.27	1.170	19.0
Agosto	27.7	13.47	0.75	15.25	1.125	17.2
Septiembre	27.1	13.03	0.74	15.01	1.025	15.4
Octubre	23.9	10.77	0.70	13.87	0.990	13.7
Noviembre	19.3	7.78	0.64	12.55	0.950	11.9
Diciembre	16.1	5.91	0.61	11.87	0.885	10.6

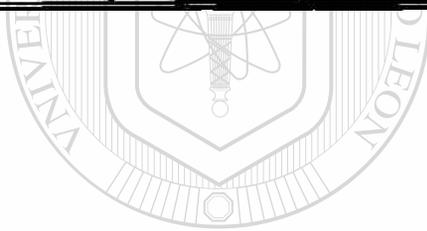
**Año: 1997**

MES	T°C	i	a	ET	K	ETP
Enero	13.5	4.52	0.58	11.47	0.925	10.6
Febrero	15.9	5.80	0.60	11.83	0.885	10.5
Marzo	20.6	8.59	0.66	12.88	1.030	13.3
Abril	20.4	8.46	0.65	12.83	1.065	13.7
Mayo	24.8	11.39	0.71	14.17	1.155	16.4
Junio	27.4	13.25	0.74	15.13	1.140	17.2
Julio	29.4	14.75	0.77	15.96	1.170	18.7
Agosto	30.0	15.21	0.78	16.22	1.125	18.3
Septiembre	27.7	13.47	0.75	15.25	1.025	15.6
Octubre	22.4	9.76	0.68	13.40	0.990	13.3
Noviembre	17.4	6.65	0.62	12.12	0.950	11.5
Diciembre	14.5	5.04	0.59	11.61	0.885	10.4

**Tabla 4. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial Ajustada (continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1998**

MES	T°C	i	a	ET	K	ETP
Enero	18.3	7.18	0.63	11.61	0.925	11.4
Febrero	19.0	7.60	0.64	12.32	0.885	11.0
Marzo	19.9	8.15	0.65	12.48	1.030	13.1
Abril	24.2	10.97	0.70	12.70	1.065	14.9
Mayo	30.0	15.21	0.78	13.97	1.155	18.7
Junio	30.7	15.75	0.79	16.22	1.140	18.9
Julio	30.5	15.59	0.78	16.45	1.170	19.2
Agosto	28.8	14.29	0.76	15.70	1.125	17.7
Septiembre	26.9	12.88	0.74	14.94	1.025	15.3
Octubre	22.5	9.82	0.68	13.43	0.990	13.3
Noviembre	19.5	7.9	0.64	12.60	0.950	12.0
Diciembre	-	-	-	-	0.885	-



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 3.6.3 CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION REAL

(Por: Ing. Elías Vázquez Godina)

La evapotranspiración real se puede calcular a partir de la evapotranspiración potencial ajustada, haciendo un balance hídrico. Este tipo de balance se utiliza sobre todo en zonas agrícolas, para determinar principalmente la cantidad de agua a utilizar en las diferentes zonas de riego, según el tipo de cultivo.

En las siguientes páginas se presentan los cálculos del balance hidráulico, siguiendo el método recomendado por: Emilio Custodio, Hidrología Subterránea. 1976

#### Notas al cálculo de las tablas

Ejemplo; año 1990

Enero: Al comenzar enero se supone completa la reserva de agua utilizable (RAU). Durante este mes la  $P < ETP$ . La diferencia  $P - ETP = -5.7$  mm se cubre con la reserva de agua utilizable (RAU) que está completa. Cabe aclarar que el valor máximo que permite la RAU es de 108.0 mm. Como  $ETR = ETP$ , no hay excedentes ni déficit.

Febrero: Durante el mes de febrero  $P < ETP$ ; la diferencia  $P - ETP = 0.0 - 10.50 = -10.50$  mm, valor que corresponde a la variación de la reserva (VR), la cual puede cubrirse totalmente con la RAU que existe (102.3 mm). Como se alcanza a cubrir la variación de la reserva con la reserva de agua utilizable, entonces no hay

excedentes ni déficit.

**Marzo:** En este mes  $P > ETP$ , la diferencia  $P - ETP = 43.7 - 13.3 = 30.40$  se añadirá a la reserva de agua utilizable, pero como la reserva de agua utilizable sólo puede alcanzar un valor máximo de 108.0, se le agregará solamente lo que le falte para completar su valor máximo que sería igual a 16.2 mm. La  $ETP = ETR$ , por lo tanto habrá un excedente de 14.2 mm.

**Abril:** En el mes de abril  $P > ETP$ . El exceso  $P - ETP = 29.1 - 14.60 = 14.5$  mm, los que se añadirán a la RAU, misma que está completa y por lo tanto no se le añadirá nada. Como la  $ETR = ETP$ , habrá un excedente de 14.5. Y así sucesivamente para los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre.

**Noviembre:** En noviembre,  $P < ETP$ . La diferencia  $P - ETP = 0.9 - 11.80 = -10.9$  mm que se cubrirá con la reserva de agua utilizable del mes anterior,  $108 - 10.9 = 97.1$  que es la reserva de agua del mes de noviembre. La  $ETP = ETR$ , por lo tanto no habrá excedentes ni déficit. Lo mismo ocurrirá en el mes de diciembre. Se sigue el mismo método para todos los demás años.

A continuación se presentan los cálculos en las tablas, para los años 1990 a 1998.

Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada

Tabla 5. Cálculo de la evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**1990**

Mes	Precipitación	Evapotranspiración potencial ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	4.9	10.6	-5.7	102.3	10.6	-	-
Febrero	-	10.5	-10.5	91.8	10.5	-	-
Marzo	43.7	13.3	16.2	108.0	13.3	14.2	-
Abril	29.1	14.6	0.0	108.0	14.6	14.5	-
Mayo	19.1	16.6	0.0	108.0	16.6	2.5	-
Junio	30.2	17.3	0.0	108.0	17.3	12.9	-
Julio	27.5	18.0	0.0	108.0	18.0	9.5	-
Agosto	60.0	17.4	0.0	108.0	17.4	42.6	-
Septiembre	157.5	14.9	0.0	108.0	14.9	152.8	-
Octubre	95.6	13.1	0.0	108.0	13.1	82.5	-
Noviembre	0.9	11.8	-10.9	97.1	11.8	-	-
Diciembre	-	10.4	-10.4	86.7	10.4	-	-

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1991

Mes	Precipitación	Evapotranspiración real ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	10.9	10.6	0.3	87.0	10.6	-	-
Febrero	6.7	10.7	-4.0	83.0	10.7	-	-
Marzo	8.0	14.5	-6.5	76.5	14.5	-	-
Abril	26.6	15.6	11.0	87.5	15.6	-	-
Mayo	55.6	17.3	20.5	108.0	17.3	17.8	-
Junio	88.3	17.9	0.0	108.0	17.9	70.4	-
Julio	19.7	17.4	0.0	108.0	17.4	2.3	-
Agosto	6.2	18.0	-11.8	96.2	18.0	-	-
Septiembre	118.0	14.2	11.8	108.0	14.2	92.0	-
Octubre	5.7	12.7	-7.0	101.0	12.7	-	-
Noviembre	34.1	11.3	7.0	108.0	11.3	15.8	-
Diciembre	61.5	10.5	0.0	108.0	10.5	51.0	-

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1992

Mes	Precipitación	Evapotranspiración real ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	74.9	10.5	0.0	108.0	10.5	64.4	-
Febrero	15.7	11.3	0.0	108.0	11.3	4.4	-
Marzo	18.7	13.3	0.0	108.0	13.3	5.4	-
Abril	25.4	14.2	0.0	108.0	14.2	11.2	-
Mayo	124.8	15.9	0.0	108.0	15.9	108.9	-
Junio	2.6	18.3	-15.7	92.3	18.3	-	-
Julio	6.2	18.5	-12.3	80.0	18.5	-	-
Agosto	57.5	17.3	28	108.0	17.3	12.1	-
Septiembre	44.9	15.2	0.0	108.0	15.2	29.7	-
Octubre	33.6	13.6	0.0	108.0	13.6	20.0	-
Noviembre	22.0	11.4	0.0	108.0	11.4	10.6	-
Diciembre	11.4	10.5	0.0	108.0	10.5	0.9	-

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1993

Mes	Precipitación	Evapotranspiración potencial ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	38.5	10.8	0.0	108.0	10.8	27.7	-
Febrero	21.5	10.7	0.0	108.0	10.7	10.8	-
Marzo	20.6	13.2	0.0	108.0	13.2	7.4	-
Abril	10.0	14.7	-4.7	103.3	14.7	0.0	-
Mayo	95.0	16.5	4.7	108.0	16.5	73.7	-
Junio	267.0	16.8	0.0	108.0	16.8	250.2	-
Julio	0.1	18.0	-17.9	90.1	18.0	0.0	-
Agosto	10.9	17.7	-6.8	83.3	17.7	0.0	-
Septiembre	222.1	14.7	24.7	108.0	14.7	182.7	-
Octubre	21.0	13.1	0.0	108.0	13.1	7.9	-
Noviembre	13.0	11.4	0.0	108.0	11.4	1.6	-
Diciembre	2.5	10.6	-8.1	99.9	10.6	0.0	- <sup>®</sup>

**Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1994

Mes	Precipitación	Evapotranspiración potencial ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	45.3	10.9	8.1	108.0	10.9	26.3	-
Febrero	8.1	10.5	-2.4	105.6	10.5	0.0	-
Marzo	45.0	13.3	2.4	108.0	13.3	29.3	-
Abril	8.6	14.6	-6.0	102.0	14.6	0.0	-
Mayo	61.5	16.8	6.0	108.0	16.8	38.7	-
Junio	33.2	17.7	0.0	108.0	17.7	15.5	-
Julio	7.5	18.7	-11.2	96.8	18.7	0.0	-
Agosto	27.7	17.2	10.5	107.3	17.2	0.0	-
Septiembre	238.3	14.7	0.7	108.0	14.7	222.9	-
Octubre	27.6	13.6	0.0	108.0	13.6	14.0	-
Noviembre	28.9	12.3	0.0	108.0	12.3	16.6	-
Diciembre	33.4	10.7	0.0	108.0	10.7	22.7	-

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1995

Mes	Precipitación	Evapotranspiración potencial ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	9.3	10.8	-1.5	106.5	10.8	0.0	-
Febrero	8.6	11.0	-2.4	104.1	11.0	0.0	-
Marzo	17.6	13.0	3.9	108.0	13.0	0.7	-
Abril	4.4	14.9	-10.5	97.5	14.9	0.0	-
Mayo	59.7	17.7	10.5	108.0	17.7	31.5	-
Junio	18.6	17.4	0	108.0	17.4	1.2	-
Julio	3.6	18.6	-15	93.0	18.6	0.0	-
Agosto	184.7	17.0	15	108.0	17	155.4	-
Septiembre	20.8	15.1	0	108.0	15.1	5.7	-
Octubre	7.1	13.7	-6.6	101.4	13.7	0.0	-
Noviembre	26.7	11.9	6.6	108.0	11.9	8.1	-
Diciembre	12.2	10.5	0.0	108.0	10.5	1.7	-

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1996

Mes	Precipitación	Evapotranspiración real ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	13.8	10.9	0.0	108.0	10.9	2.9	-
Febrero	0.2	10.9	-10.7	97.3	10.9	0.0	-
Marzo	0.0	12.9	-12.9	84.4	12.9	0.0	-
Abril	13.1	14.9	-1.8	82.6	14.9	0.0	-
Mayo	2.5	18.0	-15.5	67.1	18.0	0.0	-
Junio	52.8	18.2	34.6	101.7	18.2	0.0	-
Julio	5.6	19.0	-13.4	88.3	19.0	0.0	-
Agosto	304.6	17.2	19.7	108.0	17.2	267.7	-
Septiembre	6.4	15.4	-9.0	99.0	15.4	0.0	-
Octubre	84.5	13.7	9.0	108.0	13.7	61.8	-
Noviembre	9.6	11.9	-2.3	105.7	11.9	0.0	-
Diciembre	1.9	10.6	-8.7	97.0	10.6	0.0	-

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1997

Mes	Precipitación	Evapotranspiración potencial ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	11.9	10.6	1.3	98.2	10.6	0.0	-
Febrero	25.8	10.5	9.8	108.0	10.5	5.6	-
Marzo	85.2	13.3	0.0	108.0	13.3	71.9	-
Abril	96.8	13.7	0.0	108.0	13.7	83.1	-
Mayo	86.6	16.4	0.0	108.0	16.4	70.2	-
Junio	58.1	17.2	0.0	108.0	17.2	40.9	-
Julio	5.1	18.7	-13.6	94.4	18.7	0.0	-
Agosto	0.8	18.3	-17.5	77.0	18.3	0.0	-
Septiembre	70.6	15.6	31.1	108.0	15.6	23.9	-
Octubre	141.2	13.3	0	108.0	13.3	127.9	-
Noviembre	25.2	11.5	0	108.0	11.5	13.7	-
Diciembre	4.6	10.4	-5.8	102.2	10.4	0.0	-

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Tabla 5. Cálculo de la Evapotranspiración Real a partir de la Evapotranspiración Potencial Ajustada. (continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

1998

Mes	Precipitación	Evapotranspiración potencial ajustada	Variación de la reserva	Reserva de agua utilizable	Evapotranspiración real	Excedentes	Déficit
Enero	0.1	11.4	-11.3	90.9	11.4	0.0	-
Febrero	16.6	11.0	5.6	96.5	11.0	0.0	-
Marzo	27.7	13.1	11.5	108.0	13.1	2.5	-
Abril	15.2	14.9	0.0	108.0	14.9	0.3	-
Mayo	-	18.7	-18.7	89.3	18.7	0.0	-
Junio	32.3	18.9	13.4	102.7	18.9	0.0	-
Julio	5.3	19.2	-13.9	88.8	19.2	0.0	-
Agosto	66.5	17.7	19.2	108.0	17.7	29.6	-
Septiembre	144.5	15.3	0.0	108.0	15.3	129.2	-
Octubre	70.5	13.3	0.0	108.0	13.3	57.2	-
Noviembre	55.0	12.0	0.0	108.0	12.0	43.0	-
Diciembre	-	10.5	-10.5	97.5	10.5	0.0	-

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### 3.6.4 CALCULO DE LAS TASAS DE INFILTRACION POTENCIAL DE AGUA A TRAVES DE LA CUBIERTA DEL RELLENO SANITARIO

(Por Ing. Elías Vázquez Godina).

Para calcular la infiltración potencial de agua a través de la cubierta del relleno, primero hay que calcular la capacidad de almacenamiento de agua en el material de cobertura y el déficit de humedad inicial en el mismo material. Estos dos factores dependen directamente de la capacidad de campo y del punto de marchitez permanente, que a la vez dependen del tipo de suelo.

Para una arcilla, que es el material de cobertura en el relleno sanitario, le corresponde una capacidad de campo de 35, el punto de marchitez permanente de 17 y el contenido de humedad del material de cobertura es el 50% de su capacidad de campo<sup>1</sup>

1.- La capacidad de almacenamiento de agua en el material de cobertura es:

a) La capacidad de campo del material de cobertura, en cm, es:

$$FC = 0.35 \times 100 \text{ cm/m} = 35 \text{ cm/m}$$

b) El porcentaje de marchitez permanente es:

$$PMP = 0.17 \times 100 \text{ cm/m} = 17 \text{ cm/m}$$

c) Entonces la capacidad de almacenamiento de humedad disponible en el material de cobertura de un espesor de 0.60 m es:

---

<sup>1</sup> George Tchobanoglous. Gestión Integral de Residuos Sólidos. 1994

$$\text{CHD} = (35 - 17) \text{ cm/m} \times 0.60 \text{ m} = 10.80 \text{ cm}$$

d) El déficit de humedad inicial en el material de cobertura es:

$$\text{Hld} = (35 \text{ cm.m} \times 0.5 - 17 \text{ cm/m}) \times 0.60 \text{ m} = 0.30 \text{ cm}$$

### 3.6.5 CALCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA QUE ENTRA EN EL RELLENO

**SANITARIO (Por: Ing. Elías Vázquez Godina)**

1. Notas para el llenado de las tablas (Cantidad de agua que entra en el Relleno Sanitario de Salinas Victoria, N.L.):

En las tablas se presentan datos mensuales de:

- precipitación (2)
- evapotranspiración real (3)
- escorrentía (4)
- aporte (+) o pérdida (-) potencial de humedad del suelo de un volumen unitario del material de cobertura (5)
- el déficit en humedad del material de cobertura (6) y,
- la cantidad de agua que puede infiltrarse potencialmente a través de la cubierta del relleno (7).

En donde:

a).- El aporte (+) o pérdida (-) de humedad, es igual a la precipitación menos la

evapotranspiración real menos la escorrentía: (5) = (2) - (3) - (4)

- b).- El déficit de humedad en el material de cobertura no debe ser menor de -108.0 ya que es la capacidad máxima de almacenamiento de humedad disponible en el material de cobertura. Calculado en el inciso (c) de la página 92.
- c).- La infiltración potencial es igual al exceso (subida) de humedad menos el déficit de humedad inicial del material de cobertura. (7) = (+5) - 3.0 (déficit de humedad inicial del material de cobertura).
- d).- La infiltración potencial es cero cuando existe un déficit de humedad en el material de cobertura, o cuando la humedad es menor al déficit de humedad inicial del material de cobertura.
- 
- 3.- A continuación se presentan las tablas de cálculo para determinar la cantidad de agua que entró en el relleno a través de la capa de arcilla de 60 cm de espesor, para los años de 1990 a 1998

**Tabla 6. Cantidad de agua que entra en el Relleno Sanitario**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1990**

<b>MES</b>	<b>PRECIPI- TACION</b>	<b>EVAPOTRANS- PIRACION REAL</b>	<b>ESCORRENTIA</b>	<b>APORTE (+) O PERDIDA (-) DE HUMEDAD</b>	<b>DEFICIT DE HUMEDAD EN EL MATERIAL DE COBERTURA</b>	<b>INFIL- TRACION POTEN- CIAL</b>
<b>(1)</b>	<b>(2)</b>	<b>(3)</b>	<b>(4)</b>	<b>(5)</b>	<b>(6)</b>	<b>(7)</b>
Enero	4.9	10.6	1.5	-7.2	-7.2	0.0
Febrero	-	10.5	0.0	-10.50	-17.7	0.0
Marzo	43.7	13.3	13.1	17.3	-0.4	0.0
Abril	29.1	14.6	8.7	5.8	0.0	2.8
Mayo	19.1	16.6	5.7	-3.2	-3.2	0.0
Junio	30.2	17.3	9.1	3.8	0.0	0.8
Julio	27.5	18.0	8.3	1.3	0.0	0.0
Agosto	60.0	17.4	18.0	24.6	0.0	21.6
Septiembre	167.7	14.9	50.3	102.5	0.0	99.5
Octubre	95.6	13.1	28.7	53.8	0.0	50.8
Noviembre	0.9	11.8	0.30	-11.2	-11.35	0.0
Diciembre	-	10.4	0.0	-10.40	-21.75	0.0

Todas las unidades están en mm

Infiltración total= 175.50 mm/año

**Tabla 6. Cantidad de agua que entra en el Relleno Sanitario (Continuación)**  
**(Ing. Elías Vázquez Godina)**

**Año: 1991**

MES	PRECIPITACION	EVAPOTRANSPIRACION REAL	ESCORRENTIA	APORTE (+) O PERDIDA (-) DE HUMEDAD	DEFICIT DE HUMEDAD EN EL MATERIAL DE COBERTURA	INFILTRACION POTENCIAL
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Enero	10.9	10.6	3.3	-3.0	-3.0	0.0
Febrero	6.7	10.7	2.0	-6.0	-9.0	0.0
Marzo	8.0	14.5	2.4	-8.9	-17.9	0.0
Abril	26.6	15.6	8.0	3	-14.7	0.0
Mayo	55.6	17.3	16.7	21.6	0.0	18.6
Junio	88.3	17.9	26.5	43.9	0.0	40.9
Julio	19.7	17.4	5.9	-3.6	-3.6	0.0
Agosto	6.2	18.0	1.9	-13.7	-17.3	0.0
Septiembre	118.0	14.2	35.4	68.4	0.0	65.4
Octubre	5.7	12.7	1.7	-8.7	-8.7	0.0
Noviembre	34.1	11.3	10.2	12.6	0.0	9.6
Diciembre	61.5	10.5	18.5	32.6	0.0	29.6

Todas las unidades están en mm.

Infiltración total = 164.10 mm/año

**Tabla 6. Cantidad de agua que entra en el Relleno Sanitario (Continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1992**

MES	PRECIPITACION	EVAPOTRANSPIRACION REAL	ESCORRENTIA	SUBIDA (+) O PERDIDA (-) DE HUMEDAD	DEFICIT DE HUMEDAD EN EL MATERIAL DE COBERTURA	INFILTRACION POTENCIAL
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Enero	74.9	10.5	22.5	41.9	0.0	38.9
Febrero	15.7	11.3	4.7	-0.3	-0.3	0.0
Marzo	18.7	13.3	5.6	-0.2	-0.5	0.0
Abril	25.4	14.2	7.6	3.6	0.0	0.6
Mayo	124.8	15.9	37.4	71.5	0.0	68.5
Junio	2.6	18.3	0.8	-16.5	-16.5	0.0
Julio	6.2	18.5	1.9	-14.2	-30.8	0.0
Agosto	57.5	17.3	17.3	23.0	-7.7	0.0
Septiembre	44.9	15.2	13.5	16.2	0.0	13.2
Octubre	33.6	13.6	10.1	9.9	0.0	6.9
Noviembre	22.0	11.4	6.6	4.0	0.0	1.0
Diciembre	11.4	10.5	3.4	-2.5	-2.5	0.0

Todas las unidades están en mm

Infiltración total = 129.10 mm/año

**Tabla 6. Cantidad de agua que entra en el Relleno Sanitario (Continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1993**

MES	PRECIPITACION	EVAPOTRANSPIRACION REAL	ESCORRENTIA	SUBIDA (+) O PERDIDA (-) DE HUMEDAD	DEFICIT DE HUMEDAD EN EL MATERIAL DE COBERTURA	INFILTRACION POTENCIAL
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Enero	38.5	10.8	11.6	16.2	0.0	13.2
Febrero	21.5	10.7	6.5	4.4	0.0	1.4
Marzo	20.6	13.2	6.2	1.2	0.0	0.0
Abril	10.0	14.7	3.0	-7.7	-7.7	0.0
Mayo	95.0	16.5	28.5	50.0	0.0	47.0
Junio	267.0	16.8	80.1	170.1	0.0	167.1
Julio	0.1	18.0	0.0	-17.9	-17.9	0.0
Agosto	10.9	17.7	3.3	-10.1	-28.0	0.0
Septiembre	222.1	14.7	66.6	140.8	0.0	137.8
Octubre	21.0	13.1	6.3	1.6	0.0	0.0
Noviembre	13.0	11.4	3.9	-2.3	-2.3	0.0
Diciembre	2.5	10.6	0.8	-8.9	-11.2	0.0

Todas las unidades están en mm

Infiltración total = 366.50 mm/año

**Tabla 6. Cantidad de agua que entra en el Relleno Sanitario (Continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1994**

MES	PRECIPI- TACION	EVAPOTRANS- PIRACION REAL	ESCORRENTIA	SUBIDA (+) O PERDIDA (-) DE HUMEDAD	DEFICIT DE HUMEDAD EN EL MATERIAL DE COBERTURA	INFIL- TRACION POTEN- CIAL
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Enero	45.3	10.9	13.6	20.8	0.0	17.8
Febrero	8.1	10.5	2.4	-4.8	-4.8	0.0
Marzo	45.0	13.3	13.5	18.2	0.0	15.2
Abril	8.6	14.6	2.6	-8.6	-8.6	0.0
Mayo	61.5	16.8	18.5	26.3	0.0	23.3
Junio	33.2	17.7	10.0	5.5	0.0	2.5
Julio	7.5	18.7	2.3	-13.5	-13.5	0.0
Agosto	27.7	17.2	8.3	2.2	-11.3	0.0
Septiembre	238.3	14.7	71.5	152.1	0.0	149.1
Octubre	27.6	13.6	8.3	5.7	0.0	2.7
Noviembre	28.9	12.3	8.7	7.9	0.0	4.9
Diciembre	33.4	10.7	10.0	12.7	0.0	9.7

Todas las unidades están en mm.

Infiltración total= 225.20 mm/año

**Tabla 6. Cantidad de agua que entra en el Relleno Sanitario (Continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1995**

MES	PRECIPITACION	EVAPOTRANSPIRACION REAL	ESCORRENTIA	SUBIDA (+) O PERDIDA (-) DE HUMEDAD	DEFICIT DE HUMEDAD EN EL MATERIAL DE COBERTURA	INFILTRACION POTENCIAL
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Enero	9.3	10.8	2.8	-4.3	-4.3	0.0
Febrero	8.6	11.0	2.6	-5.0	-9.3	0.0
Marzo	17.6	13.0	5.3	-0.7	-10.0	0.0
Abril	4.4	14.9	1.3	-11.8	-21.8	0.0
Mayo	59.7	17.7	17.9	24.1	0.0	21.1
Junio	18.6	17.4	5.6	-4.4	-4.4	0.0
Julio	3.6	18.6	1.1	-16.1	-20.5	0.0
Agosto	187.4	17.0	56.2	114.2	0.0	111.2
Septiembre	20.8	15.1	6.2	-0.5	-0.5	0.0
Octubre	7.1	13.7	2.1	-6.7	-9.3	0.0
Noviembre	26.7	11.9	8.0	6.8	-2.5	0.0
Diciembre	12.2	10.5	3.7	-2.0	-4.5	0.0

Todas las unidades están en mm

Infiltración total = 132.3 mm/año

**Tabla 6. Cantidad de agua que entra en el Relleno Sanitario (Continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1996**

MES	PRECIPITACION	EVAPOTRANSPIRACION REAL	ESCORRENTIA	SUBIDA (+) O PERDIDA (-) DE HUMEDAD	DEFICIT DE HUMEDAD EN EL MATERIAL DE COBERTURA	INFILTRACION POTENCIAL
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Enero	13.8	10.9	4.1	-1.2	-1.2	0.0
Febrero	0.2	10.9	0.1	-10.8	-12.0	0.0
Marzo	0.0	12.9	0.0	-12.9	-24.9	0.0
Abril	13.1	14.9	3.9	-5.7	-30.6	0.0
Mayo	2.5	18.0	0.8	-16.3	-46.9	0.0
Junio	52.8	18.2	15.8	18.0	-28.1	0.0
Julio	5.6	19.0	1.7	-15.1	-43.2	0.0
Agosto	304.6	17.2	91.4	196.0	0.0	193.0
Septiembre	6.4	15.4	1.9	-10.9	-10.9	0.0
Octubre	84.5	13.7	25.4	45.5	0.0	42.5
Noviembre	9.6	11.9	2.9	-5.2	-5.2	0.0
Diciembre	1.9	10.6	0.6	-9.3	-14.5	0.0

Todas las unidades están en mm

Infiltración total= 235.50 mm/año

**Tabla 6. Cantidad de agua que entra en el Relleno Sanitario (Continuación)**  
(Ing. Elías Vázquez Godina)

**Año: 1997**

MES	PRECIPI- TACION	EVAPOTRANS- PIRACION REAL	ESCORRENTIA	SUBIDA (+) O PERDIDA (-) DE HUMEDAD	DEFICIT DE HUMEDAD EN EL MATERIAL DE COBERTURA	INFIL- TRACION POTEN- CIAL
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Enero	11.9	10.6	3.6	-2.3	-2.3	0.0
Febrero	25.8	10.5	7.7	7.6	0.0	4.6
Marzo	85.2	13.3	25.6	46.3	0.0	43.3
Abril	96.8	13.7	29.0	54.1	0.0	51.1
Mayo	86.6	16.4	26.0	44.2	0.0	41.2
Junio	58.1	17.2	17.4	23.5	0.0	20.5
Julio	5.1	18.7	1.5	-15.1	-15.1	0.0
Agosto	0.8	18.3	0.2	-17.7	-32.9	0.0
Septiembre	70.60	15.6	21.2	33.8	0.0	30.8
Octubre	141.2	13.3	42.4	85.5	0.0	82.5
Noviembre	25.2	11.5	7.6	6.1	0.0	3.1
Diciembre	4.6	10.4	1.4	-7.2	-7.2	0.0

Todas las unidades están en mm

Infiltración total = 277.10 mm/año

**Tabla 6. Cantidad de agua que entra en el Relleno Sanitario (Continuación)**  
**(Ing. Elías Vázquez Godina)**

**Año: 1998**

MES	PRECIPITACION	EVAPOTRANSPIRACION REAL	ESCORRENTIA	SUBIDA (+) O PERDIDA (-) DE HUMEDAD	DEFICIT DE HUMEDAD EN EL MATERIAL DE COBERTURA	INFILTRACION POTENCIAL
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Enero	0.1	11.4	0.0	-11.3	-11.3	0.0
Febrero	16.6	11.0	5.0	0.6	-10.7	0.0
Marzo	27.1	13.1	8.1	5.9	-4.8	0.0
Abril	15.2	14.9	4.6	-4.3	-9.1	0.0
Mayo	-	18.7	0.0	-18.7	-27.8	0.0
Junio	32.3	18.9	9.7	-3.7	-24.1	0.0
Julio	5.3	19.2	1.6	-15.5	-39.6	0.0
Agosto	66.5	17.7	20.0	28.9	-10.7	0.0
Septiembre	144.5	15.3	43.4	85.9	0.0	82.9
Octubre	70.5	13.3	21.2	36.1	0.0	33.1
Noviembre	55.0	12.0	16.5	26.5	0.0	23.5
Diciembre	-	-	0.0	-10.5	-10.5	0.0

Todas las unidades están en mm

Infiltración total= 139.50 mm/año

### 3.6.6 CALCULO DE LA RELACION RESIDUO/SUELO (Por: Ing. Elías Vázquez Godina)

Se determinó la relación residuo/material de cobertura, en función del peso específico compactado inicial, para un flujo de residuos sólidos de 3,562 toneladas diarias, que fueron colocados en niveles de 5 m con una anchura de celda de 50.0 m. La pendiente del frente de trabajo fue de 3:1. El peso específico de los residuos compactados fue de 750 kg/m<sup>3</sup>. El espesor de la cubierta diaria fue de 15 cm. Todos los datos anteriores fueron proporcionados por SIMEPRODESO.

A continuación se indica como fue calculada la relación residuo/suelo.

1.- Volumen diario de los residuos sólidos depositados

$$V = 3,562 \text{ T/d} \times 1000 \text{ kg/T} \times 1 \text{ m}^3/750 \text{ kg}$$

$$V = 4,749.33 \text{ m}^3$$

2.- Longitud de cada celda diaria

$$L = 4,749.33 / (5 \text{ m} \times 50 \text{ m}) = 19.0 \text{ m}$$

3.- Area superficial de las celdas

a) Para la parte superior de la celda

$$A_s = 19.0 \text{ m} \times 50 \text{ m} = 950.0 \text{ m}^2$$

b) Para el frente de la celda

$$A_f = 50 \times [(5 \text{ m})^2 + (25 \text{ m})^2]^{1/2}$$

$$A_f = 1,274.75 \text{ m}^2$$

c) Para el lado de la celda

$$A_l = 19.0 \times [(5 \text{ m})^2 + (25 \text{ m})^2]^{1/2}$$

$$A_l = 484.41 \text{ m}^2$$

4.- El volumen de suelo para la cubierta diaria es:

$$V_c = 0.15 \text{ m} \times (950.0 + 1,274.25 + 484.41)$$

$$V_c = 406.37 \text{ m}^3$$

5.- La relación residuo/suelo de cobertura es:

$$R_{rs} = 4,749.33 \text{ m}^3 / 406.37 \text{ m}^3$$

$$R_{rs} = 12:1$$

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### **3.7 CALCULO DE LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, N.L. (Por: Ing. Elías Vázquez Godina de acuerdo al método recomendado por Tchobanoglus G. 1994).**

#### **3.7.1 Datos generales<sup>1</sup> para el cálculo de la producción de lixiviado.**

##### **3.7.1.1 Cantidad de residuos recibidos en el Relleno Sanitario**

- a) Residuos colocados por día= 3,562 Ton.
- b) Número de días de explotación= 365 días
- c) Residuos colocados por año=  $1.3 \times 10^9$  kg

##### **3.7.1.2 Características de los residuos**

- a) Peso específico compactado de los residuos=  $750 \text{ kg/m}^3$
- b) Contenido de humedad inicial en los residuos= 20%

##### **3.7.1.3 Características del relleno**

###### **3.7.1.3.1 Generales**

- a) altura del nivel= 5.0 m
- b) relación residuo/suelo= 12:1 (Calculado)
- c) número de niveles= 5 (uno por año)

###### **3.7.1.3.2 Material de cobertura**

- a) peso específico del suelo=  $1770 \text{ kg/m}^3$

---

<sup>1</sup> Todos los datos relacionados con el Relleno Sanitario fueron proporcionados por SIMEPRODESO. Excepto donde se indique.

## 3.7.1.3.3 Producción de gas

a) Se utilizarán los siguientes datos de producción de gas para estimar la cantidad total de gas producido por kg de residuos totales colocados en cada nivel,<sup>2</sup> así como el agua consumida en la formación del gas, el vapor de agua en el gas del relleno y el peso específico del gas.

Producción de gas, kg/m <sup>3</sup>			
Final del año	Rápidamente degradables	Lentamente degradables	Total
1	0.000	0.000	0.000
2	0.059	0.000	0.059
3	0.103	0.001	0.104
4	0.073	0.002	0.076
5	0.044	0.003	0.047
6	0.015	0.004	0.019
7	0.000	0.005	0.005
8	0.000	0.004	0.004

Tomada de Tchobanoglous, G. 1994

a) agua consumida en la formación de gas del relleno= 0.160 kg/m<sup>3</sup>

b) agua presente como vapor de agua en el gas del relleno= 0.016 kg/m<sup>3</sup>

c) peso específico del gas del relleno= 1339 kg/m<sup>3</sup>

2

El organismo operador no proporcionó datos sobre la producción de gas, por lo tanto los datos de producción de gas y sus características fueron tomados de George Tchobanoglous, 1994. Hay que destacar que los valores que se presentan son los valores máximos que se pueden presentar para residuos orgánicos mezclados. Las cantidades reales de gas generado, generalmente son menores ya que todos los desechos orgánicos biodegradables no están completamente disponibles para su descomposición.

Peso de residuos sólidos =  $[720 \text{ kg/m}^3 \times (5\text{m} \times 1/12) \times 1\text{m}^2]$

3.7.1.3.4 Capacidad de campo. kg

La capacidad de campo, en función del peso de sobrecarga, se expresa como:

$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$

donde:

FC = la fracción de agua en los residuos basándose en el peso seco

W = Peso de sobrecarga calculado a una altura media de los residuos en el nivel en cuestión, kg.

3.7.1.4 Cantidad de agua de lluvia que entra en la cubierta diaria del relleno. (Calculado en el punto 3.6.5. tabla 6).

a) Según los cálculos, la cantidad de agua de lluvia que entra en la cubierta diaria durante los primeros cinco años de operación del relleno es de:

año	cantidad de lluvia (cm/año)
1 (1991)	16.41
2 (1992)	12.91
3 (1993)	36.65
4 (1994)	22.52
5 (1995)	13.23

b) La cantidad de agua de lluvia que entra en la cubierta final después de cinco años de operación del relleno es de:

año	cantidad de lluvia (cm/año)
6 (1996)	23.55
7 (1997)	27.71
8 (1998)	13.95

3.7.1.5 Los elementos del balance de aguas para el primer nivel se definen de la siguiente manera:

a) Peso del material de cobertura y de los residuos sólidos en cada nivel

Peso del material de cobertura =  $[1770 \text{ kg/m}^3 \times (5\text{m} \times 1/12) \times 1\text{m}^2]$   
 = 737.5 kg

$$\begin{aligned}\text{Peso de residuos sólidos} &= [720 \text{ kg/m}^3 \times (5\text{m} \times 11/12) \times 1\text{m}^2] \\ &= 3,437.5 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\text{Peso total del nivel} = (737.5 + 3,437.5)\text{kg} = 4,175 \text{ kg}$$

b)  $\text{Peso seco de los residuos sólidos} = 3,437.5 \text{ kg} \times 0.80 = 2750 \text{ kg}$

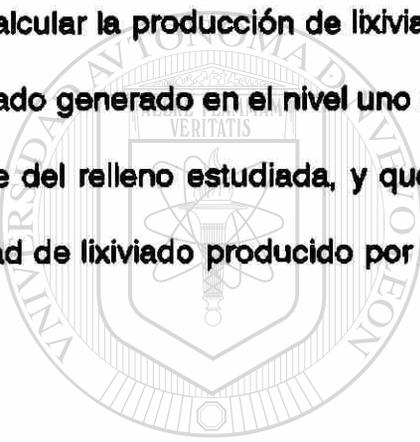
c)  $\text{Contenido de humedad de los residuos} = 3,437.5 \text{ kg} \times 0.20 = 687.5 \text{ kg}$

d)  $\text{Peso de la lluvia que entra en el relleno}$

$$\text{Peso de la lluvia} = 16.41 \text{ cm} \times 1\text{m}/100\text{cm} \times 1\text{m}^2 \times 1000\text{kg/m}^3 = 164.1 \text{ kg}$$

e)  $\text{Peso total del nivel} = (737.5 + 3,737.5 + 164.1) = 4,339.1 \text{ kg}$

Para calcular la producción de lixiviado se hará en dos partes; en la primera parte se calculará el lixiviado generado en el nivel uno de cada uno de los años en que estuvo en funcionamiento la parte del relleno estudiada, y que fueron cinco años. En la segunda parte, se calculará la cantidad de lixiviado producido por año en cada nivel del relleno terminado.



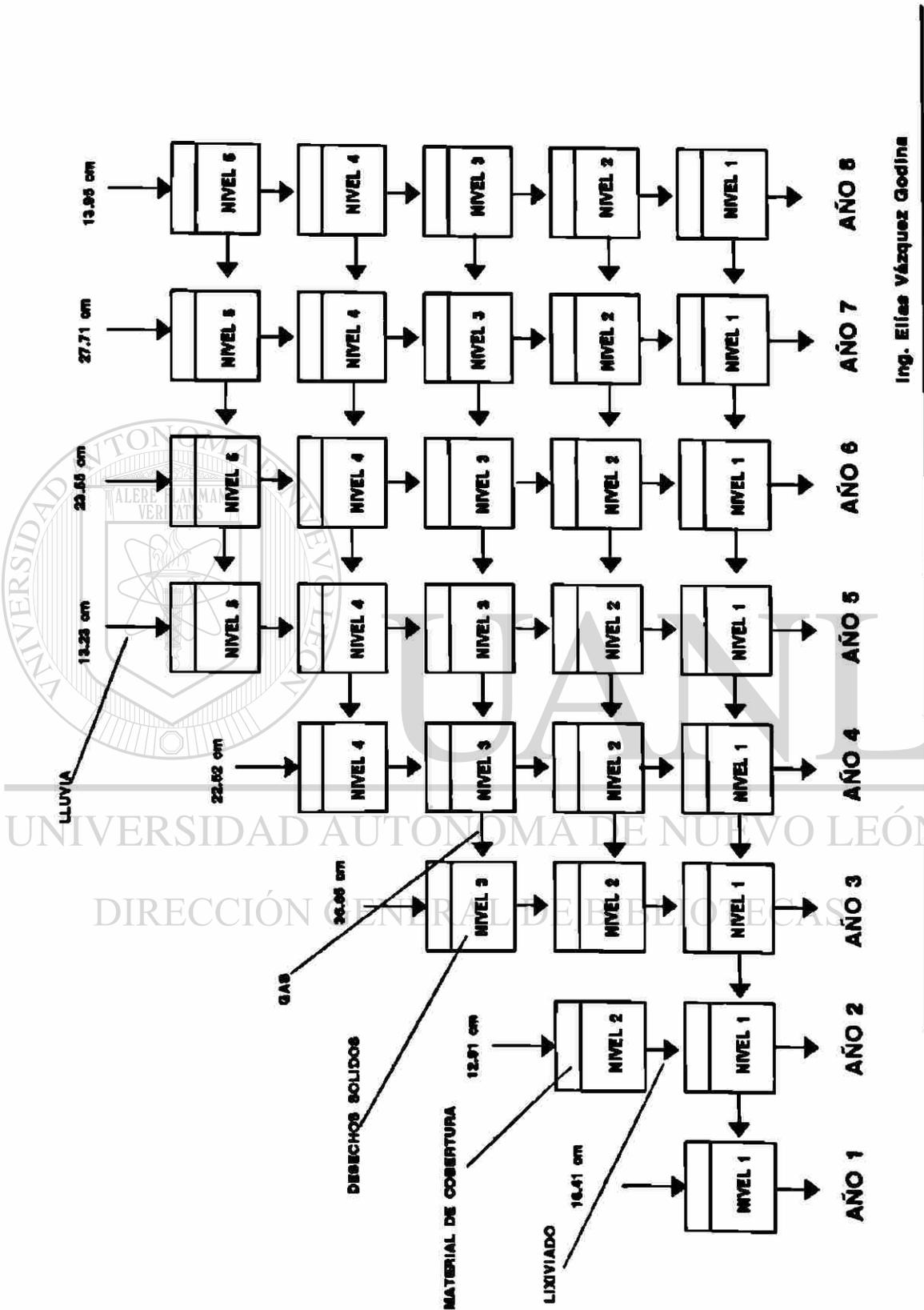
# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**FIGURA 12. Representación de los niveles del Relleno Sanitario**



Ing. Eifas Vázquez Godina

CUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS  
EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, N.L.

### 3.7.2 Parte 1

#### 3.7.2.1 Se prepara un balance de aguas para el nivel 1 al final del primer año y se determina la cantidad de lixiviados que se puede esperar del nivel 1.

- a) Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 1 durante el primer año. Hay que resaltar que la producción de gas no comienza hasta el final del primer año, es decir, se supone que no se produce gas durante el primer año.

$$\text{Gas producido} = 3,437.5 \text{ kg} \times 0.0 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 1} \\ = 0.0 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso del gas producido} = 0.0 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 0.0 \text{ kg}$$

- b) Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno

$$\text{Peso del agua consumida} = 0.0 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 0.0 \text{ kg}$$

- c) Peso del vapor de agua presente en el gas

$$\text{Peso del vapor de agua} = 0.0 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 0.0 \text{ kg}$$

- d) Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1

$$\text{Peso del agua} = 687.5 \text{ kg} + 164.1 \text{ kg} = 851.55 \text{ kg}$$

- e) Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del año 1

$$\text{Peso seco de los residuos sólidos} = 2,750 \text{ kg} - [0.0 \text{ kg (gas del relleno)} - 0.0 \text{ kg (agua consumida en la reacción de conversión)}] = 2,750 \text{ kg}$$

- f) Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1. (El peso medio en el nivel 1 se producirá en el punto medio de los residuos en el nivel 1).

$$\text{Peso medio} = 0.50 (2,750 + 851.6) + 737.5 = 2,538.275 \text{ kg}$$

- g) Factor de capacidad de campo:

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[2538.275/(4536 + 2538.275)] = 0.40$$

- h) Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1} = 0.40 \times 2,750 \text{ kg} = 1,107.31 \text{ kg}$$

f) Lixiviado producido:

1 Lixiviado producido= agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos

$$\text{Lixiviados producidos} = (851.55 - 1,107.31) \text{ kg} = -255.76 \text{ kg}$$

Como la capacidad de campo de los residuos es mayor que la cantidad real de agua presente en los residuos, no se producirá lixiviado.

j) Cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del primer año

$$\text{Agua restante} = 851.55 \text{ kg} - 0.00 \text{ kg} = 851.55 \text{ kg}$$

k) Peso total del nivel 1 al final de primer año

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{material de cobertura} \\ &= 2,750 \text{ kg} + 851.55 \text{ kg} + 737.5 \text{ kg} = 4,339.10 \text{ kg} \end{aligned}$$

**3.7.2.2 Se prepara un balance de aguas para los niveles 1 y 2 al final del año 2 y se determina la cantidad de lixiviados que se puede esperar del primer nivel.**

Hay que resaltar que los cálculos para definir los elementos del balance de agua para el primer nivel son iguales para todos los niveles, excluyendo los incisos 5d) y 5e) ya que la cantidad de lluvia es diferente para cada año.

- Peso de la lluvia que entra al relleno en el año 2 = 129.10 kg
- Peso total del nivel 2 en el año 2 = 3,437.5 + 129.10 + 737.50 = 4,304.10 kg

a) Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 1 durante año 2. ®

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 3,437.5 \text{ kg} \times 0.059 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 1} \\ &= 202.80 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso del gas producido} = 202.80 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 271.6 \text{ kg}$$

b) Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno

$$\text{Peso del agua consumida} = 202.80 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 32.5 \text{ kg}$$

c) Peso del vapor de agua presente en el gas

$$\text{Peso del vapor de agua} = 202.80 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 3.2 \text{ kg}$$

d) Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1 al final del año 2

$$\text{Peso del agua} = 851.55 \text{ kg} - 32.5 \text{ kg} - 3.2 \text{ kg} = 815.90 \text{ kg}$$

- e) **Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del año 2**

**Peso seco de los residuos sólidos = 2,750 kg - [271.6 kg (gas del relleno) - 32.5 kg (agua consumida en la reacción de conversión)] = 2,510.90 kg**

- f) **Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1. (El peso medio en el nivel 1 se producirá en el punto medio de los residuos en el nivel 1).**

**Peso medio = 4,304.10 kg (nivel 2) + 0.50 (2,510.90 + 815.90) + 737.5 = 6,704.97 kg**

- g) **Factor de capacidad de campo:**

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[6,704.97/(4536 + 6,704.97)] = 0.27$$

- h) **Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos**

**Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1 = 0.27 x 2,510.9 kg = 682.81 kg**

- i) **Cantidad de lixiviados producidos.**

**Lixiviados producidos = agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos**

**Lixiviados producidos = (815.90 - 682.81) kg = 133.05 kg**

- j) **Cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del año 2**

**Agua restante = 815.90 kg - 133.05 Kg = 682.81 kg**

- k) **Peso total del nivel 1 al final del año 2**

**Peso total del nivel = residuos secos + agua restante + material de cobertura  
= 2,510.90 kg + 682.81 kg + 737.50 kg = 3,931.20 kg**

**3.7.2.3 Se prepara un balance de aguas para los niveles 1, 2 y 3 al final del año 3 y se determina la cantidad de lixiviados que se puede esperar del primer nivel.**

- **Peso de la lluvia que entra al relleno en el año 3 = 366.50 kg**
- **Peso total del nivel 3 al final del año 3 = 3,437.50 + 366.50 + 737.50 = 4,541.50 kg**

- a) Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 1 durante año 3.

$$\text{Gas producido} = 3,437.50 \text{ kg} \times 0.104 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 1} \\ = 357.50 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso del gas producido} = 357.60 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 \\ = 478.7 \text{ kg}$$

- b) Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno  
Peso del agua consumida =  $357.60 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 57.20 \text{ kg}$

- c) Peso del vapor de agua presente en el gas  
Peso del vapor de agua =  $357.60 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 5.72 \text{ kg}$

- d) Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1 al final del año 3  
Peso del agua =  $682.81 \text{ kg} - 57.20 \text{ kg} - 5.72 \text{ kg} = 425.80 \text{ kg}$

- e) Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del año 3

$$\text{Peso seco de los residuos sólidos} = 2,510.90 \text{ kg} - [478.70 \text{ kg (gas del relleno)} - 57.20 \text{ kg} \\ \text{(agua consumida en la reacción de conversión)}] = 2,089.40 \text{ kg}$$

- f) Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1.

$$\text{Peso medio} = 4,541.50 \text{ (nivel 3)} + 3,931.20 \text{ (nivel 2)} + 0.50 (2,089.40 + 752.90) + 737.50 \\ = 10,631.35 \text{ kg}$$

- g) Factor de capacidad de campo utilizando la siguiente ecuación:

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[10,631.35/(4536 + 10,631.35)] = 0.21$$

- h) Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1} = 0.21 \times 2,089.40 \text{ kg} = 448.14 \text{ kg}$$

- i) Lixiviados producidos.

$$\text{Lixiviados producidos} = \text{agua real en residuos sólidos} - \text{capacidad de campo de los} \\ \text{residuos sólidos}$$

$$\text{Lixiviados producidos} = (752.90 - 448.14) \text{ kg} = 304.79 \text{ kg}$$

- j) Cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del año 3

$$\text{Agua restante} = 752.90 - 304.79 \text{ kg} = 448.14 \text{ kg}$$

k) **Peso total del nivel 1 al final del año 3.**

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{material de cobertura} \\ &= 2,089.40 \text{ kg} + 448.14 \text{ kg} + 737.50 \text{ kg} = 3,275.0 \text{ kg} \end{aligned}$$

**3.7.2.4 Se prepara un balance de aguas para los niveles 1, 2, 3 y 4 al final del año 4 y se determina la cantidad de lixiviados que se puede esperar del primer nivel.**

Hay que resaltar que la cantidad desechada del nivel 2 al nivel 1 es igual a 304.79 kg

● **Peso de la lluvia que entra al relleno en el año 4 = 225.20 kg**

● **Peso total del nivel 4 en el año 4 = 3,437.50 + 225.20 + 737.50 = 4,400.20 kg**

a) **Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 1 al final del año 4.**

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 3,437.50 \text{ kg} \times 0.076 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 1} \\ &= 261.30 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Peso del gas producido} &= 261.30 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 \\ &= 349.80 \text{ kg} \end{aligned}$$

b) **Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno**

$$\text{Peso del agua consumida} = 261.30 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 41.80 \text{ kg}$$

c) **Peso del vapor de agua presente en el gas**

$$\text{Peso del vapor de agua} = 261.30 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 4.20 \text{ kg}$$

d) **Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1 al final del año 4.**

$$\begin{aligned} \text{Peso del agua} &= 448.10 \text{ kg} - 41.80 \text{ kg} - 4.20 + 304.79 \text{ (lixiviados del nivel 2) kg} \\ &= 707.00 \text{ kg} \end{aligned}$$

e) **Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del año 4**

$$\begin{aligned} \text{Peso seco de los residuos sólidos} &= 2089.40 \text{ kg} - [349.80 \text{ kg (gas del relleno)} - 41.80 \text{ kg} \\ &\text{(agua consumida en la reacción de conversión)}] = 1,781.40 \text{ kg} \end{aligned}$$

f) **Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1.**

$$\text{Peso medio} = 4,400.20 \text{ (nivel 4)} + 3,275.00 \text{ (nivel 3)} + 3,931.20 \text{ (nivel 2)} + 0.50 \text{ (1,781.40)}$$

$$+ 707.00) + 737.50 = 13,588.09 \text{ kg}$$

g) Factor de capacidad de campo:

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[13,588.09/(4536 + 13,588.09)] = 0.19$$

h) Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1} = 0.19 \times 1,781.40 \text{ kg} = 334.28 \text{ kg}$$

i) Lixiviados producidos.

Lixiviados producidos = agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos

$$\text{Lixiviados producidos} = (707.00 - 334.28) \text{ kg} = 372.68 \text{ kg}$$

j) Cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del año 4

$$\text{Agua restante} = 707.00 \text{ kg} - 372.68 \text{ kg} = 334.28 \text{ kg}$$

k) Peso total del nivel 1 al final del año 4

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{material de cobertura} \\ &= 1,781.40 \text{ kg} + 334.28 \text{ kg} + 737.50 \text{ kg} = 2853.2 \text{ kg} \end{aligned}$$

**3.7.2.5 Se prepara un balance de aguas para los niveles 1, 2, 3, 4 y 5 al final del año 5 y se determina la cantidad de lixiviados que se puede esperar del primer nivel.**

Hay que resaltar que la cantidad desechada del nivel 3 al nivel 2 es igual a 304.79 kg y del nivel 2 al nivel 1 es de 372.68 kg

- **Peso de la lluvia que entra al relleno en el año 5 = 132.30 kg**
  - **Peso total del nivel 5 en el año 5 = 3,437.50 + 132.30 + 735.30 = 4,307.30 kg**
- a) **Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 1 al final del año 5.**

$$\text{Gas producido} = 3,437.50 \text{ kg} \times 0.047 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 1} \\ = 161.60 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso del gas producido} = 161.60 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 \\ = 216.3 \text{ kg}$$

b) **Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno**  
**Peso del agua consumida** =  $161.60 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 25.90 \text{ kg}$

c) **Peso del vapor de agua presente en el gas**  
**Peso del vapor de agua** =  $161.60 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 2.60 \text{ kg}$

d) **Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1 al final del año 5.**

$$\text{Peso del agua} = 334.3 \text{ kg} - 25.90 \text{ kg} - 2.60 + 372.68 \text{ (lixiviados del nivel 2)kg} \\ = 678.50 \text{ kg}$$

e) **Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del año 5.**

$$\text{Peso seco de los residuos sólidos} = 1,781.40 \text{ kg} - [216.3 \text{ kg (gas del relleno)} - 25.90 \text{ kg} \\ \text{(agua consumida en la reacción de conversión)}] = 1590.90 \text{ kg}$$

f) **Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1.**

$$\text{Peso medio} = 4,307.30 \text{ (nivel 5)} + 2853.20 \text{ (nivel 4)} + 3,275.00 \text{ (nivel 3)} + 3931.20 \text{ (nivel} \\ \text{2)} + 0.50 (1591.0 + 678.50) + 737.50 = 16,238.89 \text{ kg}$$

g) **Factor de capacidad de campo:**

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[16,238.89/(4536 + 16,238.89)] = 0.17$$

h) **Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos.**

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1} = 0.17 \times 1591.0 \text{ kg} = 270.59 \text{ kg}$$

i) **Lixiviados producidos.**

$$\text{Lixiviados producidos} = \text{agua real en residuos sólidos} - \text{capacidad de campo de los} \\ \text{residuos sólidos.}$$

$$\text{Lixiviados producidos} = (678.50 - 270.59) \text{ kg} = 407.93 \text{ kg}$$

j) **Cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del año 5**

$$\text{Agua restante} = 678.50 \text{ kg} - 407.93 \text{ kg} = 270.59 \text{ kg}$$

k) **Peso total del nivel 1 al final del año 5**

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{material de cobertura} \\ &= 1591.0 \text{ kg} + 270.59 \text{ kg} + 737.50 \text{ kg} = 2599.0 \text{ kg} \end{aligned}$$

### 3.7.3 Parte 2

Al llegar a la parte final del relleno, para determinar los lixiviados en el nivel 1, se calculará la producción de lixiviado por año y en cada uno de los niveles del relleno sanitario

**3.7.3.1 Se calculará el lixiviado generado en cada uno de los niveles del relleno sanitario durante el año 6 (1996).**

**3.7.3.1.1 Se prepara un balance de aguas para determinar la cantidad de lixiviado en el nivel 5 al final del año 6.**

● **Peso de la lluvia que entra al relleno en el año 6 = 235.50 kg**

a) **Se calcula la cantidad y el peso del gas producido para el nivel 5 al final del año 6.**

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 3,437.50 \text{ kg} \times 0.059 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 5} \\ &= 202.80 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Peso del gas producido} &= 202.80 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 \\ &= 271.60 \text{ kg} \end{aligned}$$

b) **Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno**

$$\text{Peso del agua consumida} = 202.80 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 32.50 \text{ kg}$$

c) **Peso del vapor de agua presente en el gas**

$$\text{Peso del vapor de agua} = 202.80 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 3.25 \text{ kg}$$

d) **Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 5.**

Hay que resaltar que la cantidad inicial de agua presente en el nivel, es igual a la humedad de los residuos más el agua infiltrada en el año 5.

$$\text{Peso del agua} = 687.5 \text{ kg} - 32.50 \text{ kg} - 3.25 + 235.50 \text{ (lluvia año 6)} + 132.30 \text{ (lluvia año 5)} = 1019.6 \text{ kg}$$

e) **Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 5 al final del año 6**

Peso seco de los residuos sólidos= 2750 kg - [271.60 kg (gas del relleno) - 32.50 kg (agua consumida en la reacción de conversión)]= 2,510.90 kg

f) Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 5.

Peso medio= 4,307.3 (peso del nivel 5 en el año 5) + 0.50 (2,510.90 + 1019.60) + 737.50 = 6,810.04 kg

g) Factor de capacidad de campo:

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[6,810.04/(4536 + 6810.04)] = 0.30$$

h) Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 5 = 0.30 x 2,510.90 kg = 753.00 kg

i) Lixiviados producidos.

Lixiviados producidos= agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos

Lixiviados producidos= (1,019.6 - 753.00) kg = 266.6 kg

j) Agua restante en el nivel 5 al final del año 6.

Agua restante= 1,019.6 - 266.6 kg = 753.00 kg

k) Peso total del nivel 5 al final del año 6

Peso total del nivel= residuos secos + agua restante + material de cobertura  
= 1,510.90 kg + 753.00 kg + 737.50 kg = 3,001.40 kg

**3.7.3.1.2 Se prepara un balance de aguas para calcular los lixiviados en el nivel 4 al final del año 6.**

a) Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 4 al final del año 6.

Gas producido= 3,437.50 kg x 0.104 m<sup>3</sup>/kg de residuos depositados en el nivel 4  
= 357.50 m<sup>3</sup>

Peso del gas producido= 357.50 m<sup>3</sup> x 1.339 kg/m<sup>3</sup>  
= 478.7 kg

- b) **Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno**  
**Peso del agua consumida=  $357.50 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 57.20 \text{ kg}$**
- c) **Peso del vapor de agua presente en el gas**  
**Peso del vapor de agua=  $357.50 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 5.72 \text{ kg}$**
- d) **Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 4 al final del año 6**  
**Peso del agua=  $682.8 \text{ kg} - 57.2 \text{ kg} - 5.72 \text{ kg} + 266.6 = 886.48 \text{ kg}$**
- e) **Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 4 al final del año 6**  
**Peso seco de los residuos sólidos=  $2,51.90 \text{ kg} - [478.70 \text{ kg} (\text{gas del relleno}) - 57.20 \text{ kg} (\text{agua consumida en la reacción de conversión})] = 2,089.40 \text{ kg}$**
- f) **Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 4.**  
**Peso medio=  $4307.30 + 3001.14 + 0.50 (1,219.13 + 886.48) + 364.30 = 9,533.88 \text{ kg}$**
- g) **Factor de capacidad de campo:**  

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[9,533.88/(4536 + 9,533.88)] = 0.23$$
- h) **Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos**  
**Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 4 =  $0.23 \times 2,089.4 \text{ kg} = 480.56 \text{ kg}$**
- i) **Lixiviados producidos.**  
**Lixiviados producidos= agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos**  
**Lixiviados producidos=  $(886.48 - 480.56) \text{ kg} = 405.92 \text{ kg}$**
- j) **Cantidad de agua restante en el nivel 4 al final del año 6**  
**Agua restante=  $886.48 \text{ kg} - 405.92 \text{ kg} = 480.56 \text{ kg}$**
- k) **Peso total del nivel 4 al final del año 6**  
**Peso total del nivel= residuos secos + agua restante + material de cobertura**  
**=  $2,089.4 \text{ kg} + 480.56 \text{ kg} + 737.5 \text{ kg} = 3,307.46 \text{ kg}$**

**3.7.3.1.3 Se prepara un balance de aguas para calcular los lixiviados del nivel 3 al final del año 6.**

- a) Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 3 al final del año 6.

$$\text{Gas producido} = 3,437.5 \text{ kg} \times 0.076 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 3} \\ = 261.3 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso del gas producido} = 261.3 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 349.8 \text{ kg}$$

- b) Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno

$$\text{Peso del agua consumida} = 261.3 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 41.80 \text{ kg}$$

- c) Peso del vapor de agua presente en el gas

$$\text{Peso del vapor de agua} = 261.3 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 4.20 \text{ kg}$$

- d) Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 3 al final del año 6.

$$\text{Peso del agua} = 448.1 \text{ kg} - 41.80 \text{ kg} - 4.20 \text{ kg} + 405.92 \text{ kg} = 808.02 \text{ kg}$$

- e) Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 3 al final del año 6.

$$\text{Peso seco de los residuos sólidos} = 2089.40 \text{ kg} - [349.80 \text{ kg (gas del relleno)} - 41.80 \text{ kg} \\ \text{(agua consumida en la reacción de conversión)}] = 1,781.40 \text{ kg}$$

- f) Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 3.

$$\text{Peso medio} = 4,307.3 + 3,001.14 + 3307.46 + 0.50 (1,781.40 + 808.02) + 737.50 = \\ 12,648.11 \text{ kg}$$

- g) Factor de capacidad de campo:

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[12,648.11/(4536 + 12,648.11)] = 0.195$$

- h) Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 3} = 0.195 \times 1781.40 \text{ kg} = 347.37 \text{ kg}$$

## i) Lixiviados producidos.

Lixiviados producidos= agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos

$$\text{Lixiviados producidos} = (808.02 - 347.37) \text{ kg} = 460.65 \text{ kg}$$

## j) Cantidad de agua restante en el nivel 3 al final del año 6

$$\text{Agua restante} = 808.02 - 460.65 \text{ kg} = 347.37 \text{ kg}$$

## k) Peso total del nivel 3 al final del año 6

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{material de cobertura} \\ &= 1,781.40 \text{ kg} + 347.37 \text{ kg} + 737.50 \text{ kg} = 2,866.27 \text{ kg} \end{aligned}$$

### 3.7.3.1.4 Se prepara un balance de aguas para calcular la formación de lixiviados en el nivel 2 al final del año 6.

## a) Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 2 al final del año 6.

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 3,437.50 \text{ kg} \times 0.047 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 2} \\ &= 161.60 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso del gas producido} = 161.60 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 216.30 \text{ kg}$$

## b) Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno

$$\text{Peso del agua consumida} = 161.60 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 25.90 \text{ kg}$$

## c) Peso del vapor de agua presente en el gas

$$\text{Peso del vapor de agua} = 161.60 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 2.60 \text{ kg}$$

## d) Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 2 al final del año 6.

$$\begin{aligned} \text{Peso del agua} &= 334.30 \text{ kg} - 25.90 \text{ kg} - 2.60 + 460.65 \text{ (lixiviados del nivel 3) kg} \\ &= 766.45 \text{ kg} \end{aligned}$$

## e) Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 2 al final del año 6

$$\begin{aligned} \text{Peso seco de los residuos sólidos} &= 1,781.40 \text{ kg} - [216.30 \text{ kg (gas del relleno)} - 25.90 \text{ kg} \\ &\text{(agua consumida en la reacción de conversión)}] = 1,591.00 \text{ kg} \end{aligned}$$

## f) Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 2.

$$\text{Peso medio} = 4,307.3 + 3,001.14 + 3,307.46 + 2,866.27 + 0.50 (1,591.00 + 766.45) +$$

$$737.50 = 15,398.395 \text{ kg}$$

g) Factor de capacidad de campo:

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[15,398.395/(4536 + 15,398.395)] = 0.175$$

h) Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 2} = 0.175 \times 1,591.00 \text{ kg} = 278.425 \text{ kg}$$

i) Lixiviados producidos.

Lixiviados producidos = agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos

$$\text{Lixiviados producidos} = (766.45 - 278.425) \text{ kg} = 488.025 \text{ kg}$$

j) Cantidad de agua restante en el nivel 2 al final del año 6

$$\text{Agua restante} = 766.45 \text{ kg} - 488.025 \text{ kg} = 278.425 \text{ kg}$$

k) Peso total del nivel 2 al final del año 6

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{material de cobertura} \\ &= 1,591.00 \text{ kg} + 278.425 \text{ kg} + 737.50 \text{ kg} = 2,606.925 \text{ kg} \end{aligned}$$

**3.7.3.1.5 Se prepara un balance de aguas para calcular la formación de lixiviados en el nivel 1 al final del año 6.**

a) Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 1 al final del año 6.

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 3,437.50 \text{ kg} \times 0.019 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 1} \\ &= 65.30 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Peso del gas producido} &= 65.30 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 \\ &= 87.50 \text{ kg} \end{aligned}$$

b) Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno

$$\text{Peso del agua consumida} = 65.30 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 10.50 \text{ kg}$$

c) Peso del vapor de agua presente en el gas

$$\text{Peso del vapor de agua} = 65.30 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 1.0 \text{ kg}$$

d) **Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1 al final del año 6.**

$$\text{Peso del agua} = 270.60 \text{ kg} - 10.50 \text{ kg} - 1.0 + 488.025 \text{ (lixiviados del nivel 2) kg} = 747.125 \text{ kg}$$

e) **Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del año 6**

$$\text{Peso seco de los residuos sólidos} = 1,591.00 \text{ kg} - [87.50 \text{ kg (gas del relleno)} - 10.50 \text{ kg (agua consumida en la reacción de conversión)}] = 1514.00 \text{ kg}$$

f) **Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1.**

$$\text{Peso medio} = 4,307.30 + 3,001.14 + 3,307.46 + 2,866.27 + 2,606.925 + 0.50 (1,514.00 + 747.125) + 364.30 = 17,957.158 \text{ kg}$$

g) **Factor de capacidad de campo:**

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[17,957.158/(4536 + 17,957.158)] = 0.161$$

h) **Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos**

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1} = 0.161 \times 1,514.00 \text{ kg} = 243.754 \text{ kg}$$

i) **Lixiviados producidos.**

$$\text{Lixiviados producidos} = \text{agua real en residuos sólidos} - \text{capacidad de campo de los residuos sólidos}$$

$$\text{Lixiviados producidos} = (747.125 - 243.754) \text{ kg} = 503.37 \text{ kg}$$

j) **Cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del año 6**

$$\text{Agua restante} = (747.125 - 503.371) \text{ kg} = 243.754 \text{ kg}$$

k) **Peso total del nivel 1 al final del año 6**

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{material de cobertura} \\ &= 1,514.00 \text{ kg} + 243.754 \text{ kg} + 737.50 \text{ kg} = 2,495.254 \text{ kg} \end{aligned}$$

**3.7.3.2 Se calculará el lixiviado generado en cada uno de los niveles del relleno sanitario durante el Año 7 (1997).**

### 3.7.3.2.1 Se prepara un balance de aguas para calcular la cantidad de lixiviados en el nivel 5 en el año 7.

- **Peso de la lluvia que entra al relleno en el año 7 = 277.10 kg**
- a) **Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 5 durante año 7.**  
 Gas producido =  $3,437.50 \text{ kg} \times 0.104 \text{ m}^3/\text{kg}$  de residuos depositados en el nivel 5  
 =  $357.50 \text{ m}^3$   
 Peso del gas producido =  $357.50 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 478.70 \text{ kg}$
- b) **Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno**  
 Peso del agua consumida =  $357.50 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 57.20 \text{ kg}$
- c) **Peso del vapor de agua presente en el gas**  
 Peso del vapor de agua =  $357.50 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 5.72 \text{ kg}$
- d) **Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 5 al final del año 7**  
 Peso del agua =  $753 \text{ kg} - 57.20 \text{ kg} - 5.72 + 277.10$  (lluvia en el año 7)  $\text{kg} = 967.20 \text{ kg}$
- e) **Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 5 al final del año 7**  
 Peso seco de los residuos sólidos =  $2,510.90 \text{ kg} - [478.70 \text{ kg} (\text{gas del relleno}) - 57.20 \text{ kg} (\text{agua consumida en la reacción de conversión})] = 2089.40 \text{ kg}$
- f) **Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 5.**  
 Peso medio =  $3,001.14 + 0.50 (2,089.40 + 967.20) + 737.50 = 5,266.94 \text{ kg}$
- g) **Factor de capacidad de campo:**  

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[5,266.94/(4536 + 5,266.94)] = 0.30$$
- h) **Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos**  
 Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 5 =  $0.30 \times 2,089.40 \text{ kg} = 626.82 \text{ kg}$
- i) **Lixiviados producidos.**  
 Lixiviados producidos = agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos

**Lixiviados producidos= (967.20 - 626.82) kg= 340.38 kg**

**j) Cantidad de agua restante en el nivel 5 al final del año 7**

**Agua restante= 967.20 - 340.38 kg= 626.82 kg**

**k) Peso total del nivel 5 al final del año 7**

**Peso total del nivel= residuos secos + agua restante + material de cobertura  
= 2,089.40 kg + 626.82 kg + 737.50 kg= 3,453.72 kg**

**3.7.3.2.2 Se prepara un balance de aguas para calcular la cantidad de lixiviados en el nivel 4 al final del año 7.**

**a) Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 4 al final del año 7.**

**Gas producido= 3,437.50 kg x 0.076 m<sup>3</sup>/kg de residuos depositados en el nivel 4  
= 261.30 m<sup>3</sup>**

**Peso del gas producido= 261.30 m<sup>3</sup> x 1.339 kg/m<sup>3</sup> = 349.80 kg**

**b) Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno**

**Peso del agua consumida= 261.30 m<sup>3</sup> x 0.16 kg/m<sup>3</sup>= 41.80 kg**

**c) Peso del vapor de agua presente en el gas**

**Peso del vapor de agua= 261.30 m<sup>3</sup> x 0.016 kg/m<sup>3</sup>= 4.20 kg**

**d) Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 4 al final del año 7.**

**Peso del agua= 448.10 kg - 41.80 kg - 4.20 + 340.38 (lixiviados del nivel 5) kg= 742.48 kg**

**e) Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 4 al final del año 7**

**Peso seco de los residuos sólidos= 2,089.40 kg - [349.80 kg (gas del relleno) - 41.80 kg (agua consumida en la reacción de conversión)]= 1,781.40 kg**

**f) Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 4.**

**Peso medio= 3,001.14 + 3,453.72 + 0.50 (1,781.40 + 742.48) + 737.50 = 8,454.30 kg**

**g) Factor de capacidad de campo:**

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[8,454.30/(4536 + 8,454.30)] = 0.24$$

h) Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 4} = 0.24 \times 1781.40 \text{ kg} = 427.54 \text{ kg}$$

i) Lixiviados producidos.

Lixiviados producidos = agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos

$$\text{Lixiviados producidos} = (742.48 - 427.54) \text{ kg} = 314.94 \text{ kg}$$

j) Cantidad de agua restante en el nivel 4 al final del año 7

$$\text{Agua restante} = 742.48 \text{ kg} - 314.94 \text{ kg} = 427.54 \text{ kg}$$

k) Peso total del nivel 4 al final del año 7

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{material de cobertura} \\ &= 1,781.40 \text{ kg} + 427.54 \text{ kg} + 737.50 \text{ kg} = 2,946.44 \text{ kg} \end{aligned}$$

**3.7.3.2.3** Se prepara un balance de aguas para calcular la cantidad de lixiviados en el nivel 3 al final del año 7.

a) Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 3 al final del año 7.

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 3,437.50 \text{ kg} \times 0.047 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 3} \\ &= 161.60 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso del gas producido} = 161.60 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 216.30 \text{ kg}$$

b) Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno

$$\text{Peso del agua consumida} = 161.60 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 25.90 \text{ kg}$$

c) Peso del vapor de agua presente en el gas

$$\text{Peso del vapor de agua} = 161.60 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 2.60 \text{ kg}$$

d) Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 3 al final del año 7.

$$\text{Peso del agua} = 334.30 \text{ kg} - 25.90 \text{ kg} - 2.60 + 314.94 \text{ (lixiviados nivel 4) kg} = 620.74 \text{ kg}$$

e) Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 3 al final del año 7

Peso seco de los residuos sólidos= 1781.40 kg - [216.60 kg (gas del relleno) - 25.90 kg (agua consumida en la reacción de conversión)]= 1591.00 kg

f) Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 3.

Peso medio= 3,001.14 + 3,453.72 + 2,946.44 + 0.50 (1591.00 + 620.74) + 737.50 = 11,244.67 kg

g) Factor de capacidad de campo:

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[11,244.67/(4536 + 11,244.67)] = 0.21$$

h) Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 3= 0.21 x 1,591.00 kg= 334.11 kg

i) Lixiviados producidos.

Lixiviados producidos= agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos

Lixiviados producidos= (620.74 - 334.11) kg= 286.63 kg

j) Cantidad de agua restante en el nivel 3 al final del año 7.

Agua restante= 620.74 kg - 286.63 kg= 334.11 kg

k) Peso total del nivel 3 al final del año 7.

Peso total del nivel= residuos secos + agua restante + material de cobertura  
= 1,591.00 kg + 334.11 kg + 737.50 kg= 2,662.61 kg

**3.7.3.2.4 Se prepara un balance de aguas para calcular la formación de lixiviados en el nivel 2 al final del año 7.**

a) Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 2 al final del año 7.

Gas producido= 3,437.50 kg x 0.019 m<sup>3</sup>/kg de residuos depositados en el nivel 2  
= 65.30 m<sup>3</sup>

Peso del gas producido= 65.30 m<sup>3</sup> x 1.339 kg/m<sup>3</sup> = 87.50 kg

- b) **Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno**  
**Peso del agua consumida=  $65.30 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 10.50 \text{ kg}$**
- c) **Peso del vapor de agua presente en el gas**  
**Peso del vapor de agua=  $65.30 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 1.0 \text{ kg}$**
- d) **Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 2 al final del año 7.**  
**Peso del agua=  $270.60 \text{ kg} - 10.50 \text{ kg} - 1.0 + 286.63 \text{ (lixiviados del nivel 3) kg} = 545.73 \text{ kg}$**
- e) **Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 2 al final del año 7**  
**Peso seco de los residuos sólidos=  $1,591.00 \text{ kg} - [87.50 \text{ kg (gas del relleno) - } 10.50 \text{ kg (agua consumida en la reacción de conversión)] = 1,514 \text{ kg}$**
- f) **Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 2.**  
**Peso medio=  $3,001.14 + 3,453.72 + 2,946.44 + 2,662.61 + 0.50 (1,514.00 + 545.73) + 737.50 = 13,831.275 \text{ kg}$**
- g) **Factor de capacidad de campo:**  

$$FC = 0.60 - (0.55) [W / (4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55) [13,831.275 / (4536 + 13,831.275)] = 0.186$$
- h) **Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos**  
**Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 2=  $0.186 \times 1,514.00 \text{ kg} = 281.60 \text{ kg}$**
- i) **Lixiviados producidos.**  
**Lixiviados producidos= agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos**  
**Lixiviados producidos=  $(545.73 - 281.60) \text{ kg} = 264.13 \text{ kg}$**
- j) **Cantidad de agua restante en el nivel 2 al final del año 7**  
**Agua restante=  $(545.63 - 264.13) \text{ kg} = 281.60 \text{ kg}$**

k) **Peso total del nivel 2 al final del año 7.**

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{material de cobertura} \\ &= 1,514.00 \text{ kg} + 281.60 \text{ kg} + 737.50 \text{ kg} = 2,533.10 \text{ kg} \end{aligned}$$

### 3.7.3.2.5 Se prepara un balance de aguas para calcular la formación de lixiviados en el nivel 1 al final del año 7.

a) **Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 1 al final del año 7.**

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 3,437.50 \text{ kg} \times 0.005 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 1} \\ &= 17.20 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Peso del gas producido} &= 17.20 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 \\ &= 23.00 \text{ kg} \end{aligned}$$

b) **Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno**

$$\text{Peso del agua consumida} = 17.20 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 2.80 \text{ kg}$$

c) **Peso del vapor de agua presente en el gas**

$$\text{Peso del vapor de agua} = 17.20 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 0.28 \text{ kg}$$

d) **Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1 al final del año 7.**

$$\text{Peso del agua} = 270.20 \text{ kg} - 2.80 \text{ kg} - 0.28 + 264.13 \text{ (lixiviados nivel 2)} \text{ kg} = 531.25 \text{ kg}$$

e) **Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del año 7**

$$\begin{aligned} \text{Peso seco de los residuos sólidos} &= 1,514.00 \text{ kg} - [23.00 \text{ kg (gas del relleno)} - 2.80 \text{ kg} \\ &\text{(agua consumida en la reacción de conversión)}] = 1,493.60 \text{ kg} \end{aligned}$$

f) **Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1.**

$$\begin{aligned} \text{Peso medio} &= 3,001.14 + 3,453.72 + 2,946.44 + 2,662.61 + 2,533.10 + 0.50 (1,493.60 \\ &+ 531.25) + 737.50 = 16,346.935 \text{ kg} \end{aligned}$$

g) **Factor de capacidad de campo:**

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[16,346.935/(4536 + 16,346.935)] = 0.17$$

h) Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1} = 0.17 \times 1,493.60 \text{ kg} = 253.91 \text{ kg}$$

i) Lixiviados producidos.

Lixiviados producidos = agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos

$$\text{Lixiviados producidos} = (531.25 - 253.91) \text{ kg} = 277.34 \text{ kg}$$

j) Cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del año 7

$$\text{Agua restante} = (531.25 - 277.34) \text{ kg} = 253.91 \text{ kg}$$

k) Peso total del nivel 1 al final del año 7

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{material de cobertura} \\ &= 1,493.60 \text{ kg} + 253.91 \text{ kg} + 737.50 \text{ kg} = 2,485.01 \text{ kg} \end{aligned}$$

**3.7.3.3 Se calculará el lixiviado generado en cada uno de los niveles del relleno sanitario durante el año 8 (1998).**

**3.7.3.3.1 Se prepara un balance de aguas para calcular la cantidad de lixiviados en el nivel 5 al final del año 8.**

● **Peso de la lluvia que entra al relleno en el año 8 = 139.50 kg**

a) **Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 5 al final del año 8.**

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 3,437.50 \text{ kg} \times 0.076 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 5} \\ &= 261.30 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso del gas producido} = 261.30 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 349.80 \text{ kg}$$

b) **Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno**

$$\text{Peso del agua consumida} = 261.30 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 41.80 \text{ kg}$$

c) **Peso del vapor de agua presente en el gas**

$$\text{Peso del vapor de agua} = 261.30 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 4.20 \text{ kg}$$

d) **Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 5 al final del año 8.**

$$\text{Peso del agua} = 626.82 \text{ kg} - 41.80 \text{ kg} - 4.20 + 139.50 \text{ (lluvia en el año 8)} \text{ kg} = 720.32 \text{ kg}$$

- e) **Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 5 al final del año 8**  
 Peso seco de los residuos sólidos = 2,089.40 kg - [349.80 kg (gas del relleno) - 41.80 kg (agua consumida en la reacción de conversión)] = 1781.40 kg
- f) **Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 5.**  
 Peso medio = 3453.72 + 0.50 (1,81.40 + 720.32) + 737.50 = 5,442.08 kg
- g) **Factor de capacidad de campo:**  

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[5,442.08/(4536 + 5,442.08)] = 0.30$$
- h) **Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos**  
 Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 5 = 0.30 x 1,781.40 kg = 534.42 kg
- i) **Lixiviados producidos.**  
 Lixiviados producidos = agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos  
 Lixiviados producidos = (720.32 - 534.42) kg = 185.90 kg
- j) **Cantidad de agua restante en el nivel 5 al final del año 8.**  
 Agua restante = 720.32 kg - 185.90 kg = 534.42 kg
- k) **Peso total del nivel 5 al final del año 8**  
 Peso total del nivel = residuos secos + agua restante + material de cobertura  
 = 1,781.40 kg + 534.42 kg + 737.50 kg = 3,053.32 kg
- 3.7.3.3.2 Se prepara un balance de aguas para calcular la cantidad de lixiviados en el nivel 4 al final del año 8**
- a) **Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 4 al final del año 8.**  
 Gas producido = 3,437.50 kg x 0.047 m<sup>3</sup>/kg de residuos depositados en el nivel 4  
 = 161.60 m<sup>3</sup>  
 Peso del gas producido = 161.60 m<sup>3</sup> x 1.339 kg/m<sup>3</sup> = 216.30 kg

- b) **Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno**  
**Peso del agua consumida=  $161.60 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 25.90 \text{ kg}$**
- c) **Peso del vapor de agua presente en el gas**  
**Peso del vapor de agua=  $161.60 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 2.60 \text{ kg}$**
- d) **Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 4 al final del año 8.**  
**Peso del agua=  $334.30 \text{ kg} - 25.90 \text{ kg} - 2.60 + 185.90 \text{ (lixiviado nivel 5) kg} = 491.70 \text{ kg}$**
- e) **Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 4 al final del año 8**  
**Peso seco de los residuos sólidos=  $1781.40 \text{ kg} - [261.30 \text{ kg (gas del relleno) - } 25.90 \text{ kg (agua consumida en la reacción de conversión)] = 1,591.00 \text{ kg}$**
- f) **Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 4.**  
**Peso medio=  $3,453.72 + 3,053.32 + 0.50 (1,591.00 + 491.70) + 737.50 = 8,285.89 \text{ kg}$**
- g) **Factor de capacidad de campo:**  

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[8,285.89/(4536 + 8,285.89)] = 0.24$$
- h) **Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos**  
**Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 4=  $0.24 \times 1,591.00 \text{ kg} = 381.84 \text{ kg}$**
- i) **Lixiviados producidos.**  
**Lixiviados producidos= agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos**  
**Lixiviados producidos=  $(491.70 - 381.84) \text{ kg} = 109.86 \text{ kg}$**
- j) **Cantidad de agua restante en el nivel 4 al final del año 8**  
**Agua restante=  $491.70 - 109.86 \text{ kg} = 381.84 \text{ kg}$**
- k) **Peso total del nivel 4 al final del año 8**  
**Peso total del nivel= residuos secos + agua restante + material de cobertura**  
**=  $1,591.00 \text{ kg} + 381.84 \text{ kg} + 737.50 \text{ kg} = 2,710.34 \text{ kg}$**

### 3.7.3.3.3 Se prepara un balance de aguas para calcular la formación de lixiviados en el nivel 3 al final del año 8.

- a) Calcular la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 3 al final del año 8.

$$\text{Gas producido} = 3,437.50 \text{ kg} \times 0.019 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 3} \\ = 65.30 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso del gas producido} = 65.30 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 87.50 \text{ kg}$$

- b) Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno

$$\text{Peso del agua consumida} = 65.30 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 10.50 \text{ kg}$$

- c) Peso del vapor de agua presente en el gas

$$\text{Peso del vapor de agua} = 65.30 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 1.0 \text{ kg}$$

- d) Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 3 al final del año 8.

$$\text{Peso del agua} = 270.60 \text{ kg} - 10.50 \text{ kg} - 1.0 + 109.86 \text{ (Lixiviados nivel 4) kg} = 368.96 \text{ kg}$$

- e) Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 3 al final del año 8

$$\text{Peso seco de los residuos sólidos} = 1591 \text{ kg} - [87.50 \text{ kg (gas del relleno)} - 10.50 \text{ kg} \\ \text{(agua consumida en la reacción de conversión)}] = 1,514.00 \text{ kg}$$

- f) Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 3.

$$\text{Peso medio} = 3,453.72 + 3,053.32 + 2,710.34 + 0.50 (1,514.00 + 368.90) + 737.50 \\ = 10,896.36 \text{ kg}$$

- g) Factor de capacidad de campo:

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[10,896.36/(4536 + 10,896.36)] = 0.21$$

- h) Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 3} = 0.21 \times 1,514.00 \text{ kg} = 217.94 \text{ kg}$$

- i) Lixiviados producidos.

$$\text{Lixiviados producidos} = \text{agua real en residuos sólidos} - \text{capacidad de campo de los} \\ \text{residuos sólidos}$$

$$\text{Lixiviados producidos} = (368.96 - 317.94) \text{ kg} = 51.02 \text{ kg}$$

- j) Cantidad de agua restante en el nivel 3 al final del año 8

$$\text{Agua restante} = (368.96 - 51.02) \text{ kg} = 317.94 \text{ kg}$$

- k) Peso total del nivel 3 al final del año 8

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{material de cobertura} \\ &= 1,514.00 \text{ kg} + 317.94 \text{ kg} + 737.50 \text{ kg} = 2,569.44 \text{ kg} \end{aligned}$$

### 3.7.3.3.4 Se prepara un balance de aguas para calcular la formación de lixiviados en el nivel 2 al final del año 8.

- a) Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 2 al final del año 8.

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 3,437.50 \text{ kg} \times 0.005 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 2} \\ &= 17.20 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso del gas producido} = 17.20 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 = 23.00 \text{ kg}$$

- b) Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno

$$\text{Peso del agua consumida} = 17.20 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 2.80 \text{ kg}$$

- c) Peso del vapor de agua presente en el gas

$$\text{Peso del vapor de agua} = 17.20 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 0.28 \text{ kg}$$

- d) Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 2 al final del año 8.

$$\text{Peso del agua} = 278.425 \text{ kg} - 2.80 \text{ kg} - 0.28 + 51.02 \text{ (lixiviado nivel 3)} \text{ kg} = 326.365 \text{ kg}$$

- e) Peso seco de los residuos sólidos restantes en el nivel 2 al final del año 8

$$\text{Peso seco de los residuos sólidos} = 1,591.00 \text{ kg} - [23.00 \text{ kg (gas del relleno)} - 2.80 \text{ kg (agua consumida en la reacción de conversión)}] = 1,565.20 \text{ kg}$$

- f) Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 2.

$$\begin{aligned} \text{Peso medio} &= 3,453.72 + 3,53.32 + 2,710.34 + 2,569.44 + 0.50 (1,565.20 + 326.365) \\ &+ 737.50 = 13,470.1025 \text{ kg} \end{aligned}$$

- g) Factor de capacidad de campo:

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[13,470.1025 / (4536 + 13,470.1025)] = 0.19$$

h) Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos

$$\text{Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 2} = 0.19 \times 1,565.20 \text{ kg} = 297.388 \text{ kg}$$

i) Lixiviados producidos.

Lixiviados producidos = agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos

$$\text{Lixiviados producidos} = (326.365 - 297.388) \text{ kg} = 28.98 \text{ kg}$$

j) Cantidad de agua restante en el nivel 2 al final del año 8

$$\text{Agua restante} = (326.365 - 28.98) \text{ kg} = 297.388 \text{ kg}$$

k) Peso total del nivel 2 al final del año 8

$$\begin{aligned} \text{Peso total del nivel} &= \text{residuos secos} + \text{agua restante} + \text{material de cobertura} \\ &= 1,565.20 \text{ kg} + 297.388 \text{ kg} + 737.50 \text{ kg} = 2,600.10 \text{ kg} \end{aligned}$$

**3.7.3.3.5 Se prepara un balance de aguas para calcular la formación de lixiviados en el nivel 1 al final del año 8.**

a) Se calcula la cantidad y el peso del gas producido en el nivel 1 al final del año 8.

$$\begin{aligned} \text{Gas producido} &= 3,437.50 \text{ kg} \times 0.004 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ de residuos depositados en el nivel 1} \\ &= 13.80 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Peso del gas producido} &= 13.80 \text{ m}^3 \times 1.339 \text{ kg/m}^3 \\ &= 18.40 \text{ kg} \end{aligned}$$

b) Peso del agua consumida en la producción del gas del relleno

$$\text{Peso del agua consumida} = 13.80 \text{ m}^3 \times 0.16 \text{ kg/m}^3 = 2.20 \text{ kg}$$

c) Peso del vapor de agua presente en el gas

$$\text{Peso del vapor de agua} = 13.80 \text{ m}^3 \times 0.016 \text{ kg/m}^3 = 0.22 \text{ kg}$$

d) Peso del agua en los residuos sólidos en el nivel 1 al final del año 8.

$$\text{Peso del agua} = 253.91 \text{ kg} - 2.20 \text{ kg} - 0.22 + 28.98 \text{ (lixiviado nivel 2)} \text{ kg} = 280.47 \text{ kg}$$

e) **Peso saco de los residuos sólidos restantes en el nivel 1 al final del año 8**

**Peso seco de los residuos sólidos = 1,493.60 kg - [18.30 kg (gas del relleno) - 2.20 kg (agua consumida en la reacción de conversión)] = 1,477.40 kg**

f) **Peso medio sobre los residuos colocados en el nivel 1.**

**Peso medio = 3,453.72 + 3,053.32 + 2,710.34 + 2,569.44 + 2,600.10 + 0.50 (1,477.40 + 280.47) + 737.50 = 16,003.405 kg**

g) **Fctor de capacidad de campo:**

$$FC = 0.60 - (0.55)[W/(4536 + W)]$$

$$FC = 0.60 - (0.55)[16,003.405/(4536 + 16,003.405)] = 0.17$$

h) **Cantidad de agua que puede retenerse en los residuos sólidos**

**Agua retenida en los residuos sólidos en el nivel 1 = 0.17 x 1,477.40 kg = 251.175 kg**

i) **Lixiviados producidos.**

**Lixiviados producidos = agua real en residuos sólidos - capacidad de campo de los residuos sólidos**

**Lixiviados producidos = (280.47 - 251.175) kg = 29.30 kg**

j) **Cantidad de agua restante en el nivel 1 al final del año 8**

**Agua restante = (280.47 - 29.30) kg = 251.175 kg**

k) **Peso total del nivel 1 al final del año 8**

**Peso total del nivel = residuos secos + agua restante + material de cobertura  
= 1,477.40 kg + 251.175 kg + 737.50 kg = 2466.18 kg**

### 3.8 PRODUCCION TOTAL DE LIXIVIADOS (Por: Ing. Elías Vázquez Godina).

El cálculo de la producción de lixiviados se hizo para un metro cuadrado, ahora hay que estimar la cantidad total de lixiviado en toda el área estudiada del relleno.

#### 3.8.1 El área total ocupada por el relleno sanitario es:

a) El peso total de los residuos sólidos colocados en un nivel del relleno sanitario de 1 m<sup>2</sup> y 5 m de altura= 2,750 kg/m<sup>2</sup>.año

b) El área total ocupada por cada nivel expresada en m<sup>2</sup> es:

$$\text{Area total} = (1.3 \times 10^9 \text{ kg/año}) / 2,750 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{año} = 472,727.27 \text{ m}^2$$

3.8.2 Para calcular el factor de conversión y transformar los kilogramos de lixiviado obtenidos por m<sup>2</sup> a m<sup>3</sup>/año para el relleno completo tenemos:

$$\begin{aligned} \text{Factor de conversión} &= (1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{año} \cdot 472,727.27 \text{ m}^2) / 1000 \text{ kg/m}^3 * \\ &= 1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{año} \cdot 472.727 \end{aligned}$$

$$1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{año} = 472.727 \text{ m}^3/\text{año}$$

\* En el departamento de Ingeniería Ambiental se determinó la densidad del lixiviado y el resultado fue de 1.01 g/ml. Para casos prácticos generalmente se toma como 1.0 g/ml

**Tabla 7. Producción de lixiviados en cada nivel del relleno sanitario (kg/m<sup>2</sup>)**

AÑO	NIVEL DEL RELLENO SANITARIO				
	1	2	3	4	5
(1) 1991	0				
(2) 1992	133.05	0			
(3) 1993	304.79	133.05	0		
(4) 1994	372.68	304.79	133.05	0	
(5) 1995	407.93	372.68	304.79	133.05	0
(6) 1996	503.37	488.025	460.65	405.92	266.6
(7) 1997	277.34	264.13	286.63	314.94	340.38
(8) 1998	29.30	28.98	51.02	109.86	185.90

Ing. Elias Vázquez Godina

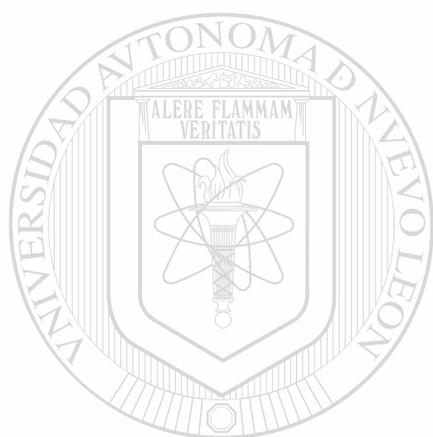
**Tabla 8. Producción Total de Lixiviado en el fondo del relleno sanitario**

PRODUCCION TOTAL DE LIXIVIADO		
AÑO	kg/m2	m3/AÑO
(1) 1991	0.0	0.0
(2) 1992	133.05	62,896.32
(3) 1993	304.79	144,082.46
(4) 1994	372.68	176,175.89
(5) 1995	407.93	192,839.52
(6) 1996	503.37	237,956.59
(7) 1997	277.34	131,106.11
(8) 1998	29.30	13,850.90

Ing. Elias Vázquez Godina

En total se tienen 958,907.79 m<sup>3</sup> de lixiviado, con un promedio de 119,863.47 m<sup>3</sup>/año

En la siguiente página se presenta la gráfica de la producción de lixiviados<sup>1</sup>. Como se puede apreciar, la producción máxima de lixiviado se presenta en el año 6 (1996); después empieza a disminuir la producción hasta mantenerse constante, lo cual depende del régimen de lluvias de cada año.



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

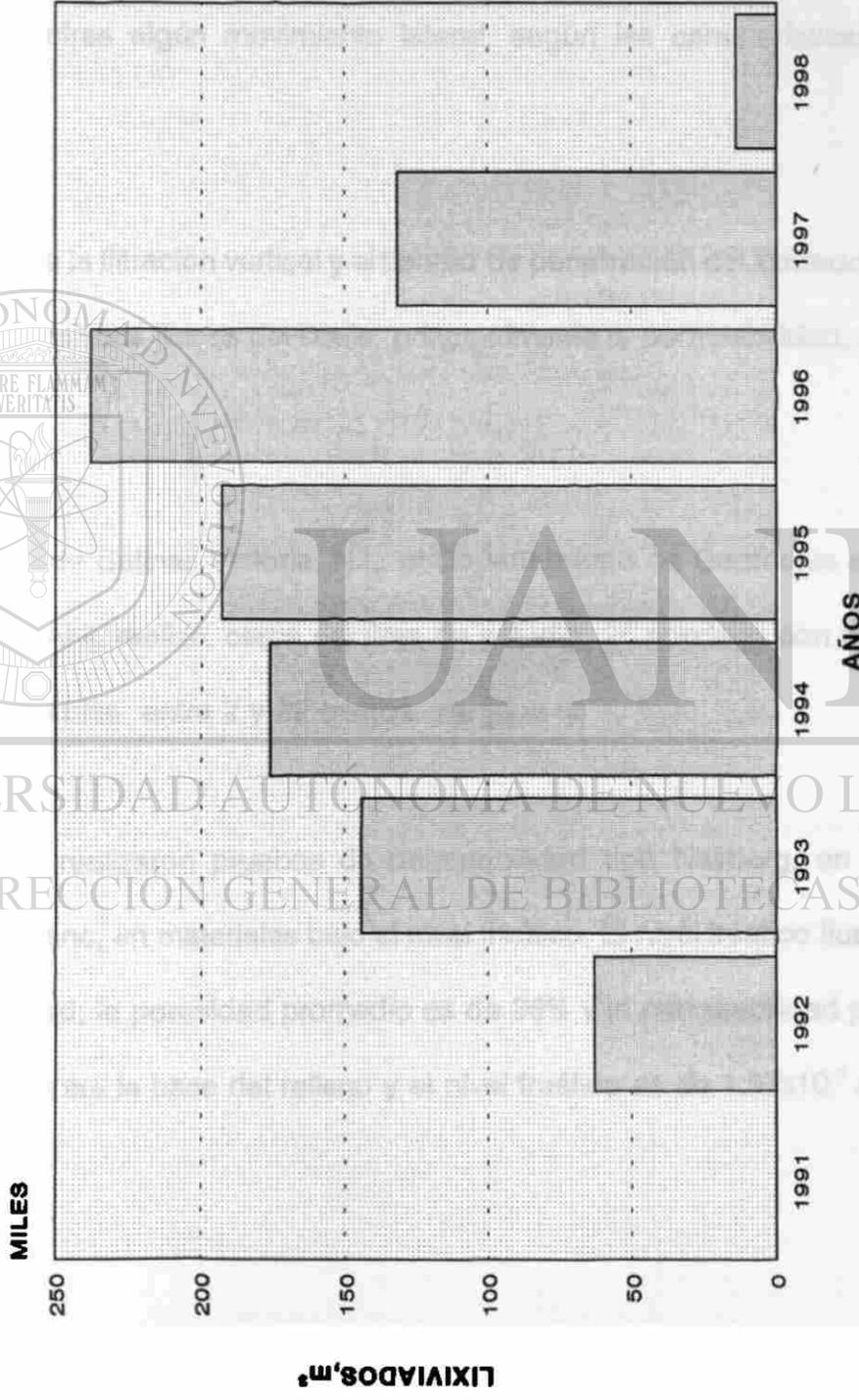
®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

---

<sup>1</sup> Elaborada por: Ing. Elías Vázquez Godina.

**RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, N.L.  
PRODUCCION DE LIXIVIADOS**



Ing. Elías Vázquez Godina

**FIGURA 13**

**CUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS  
EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, N.L.**

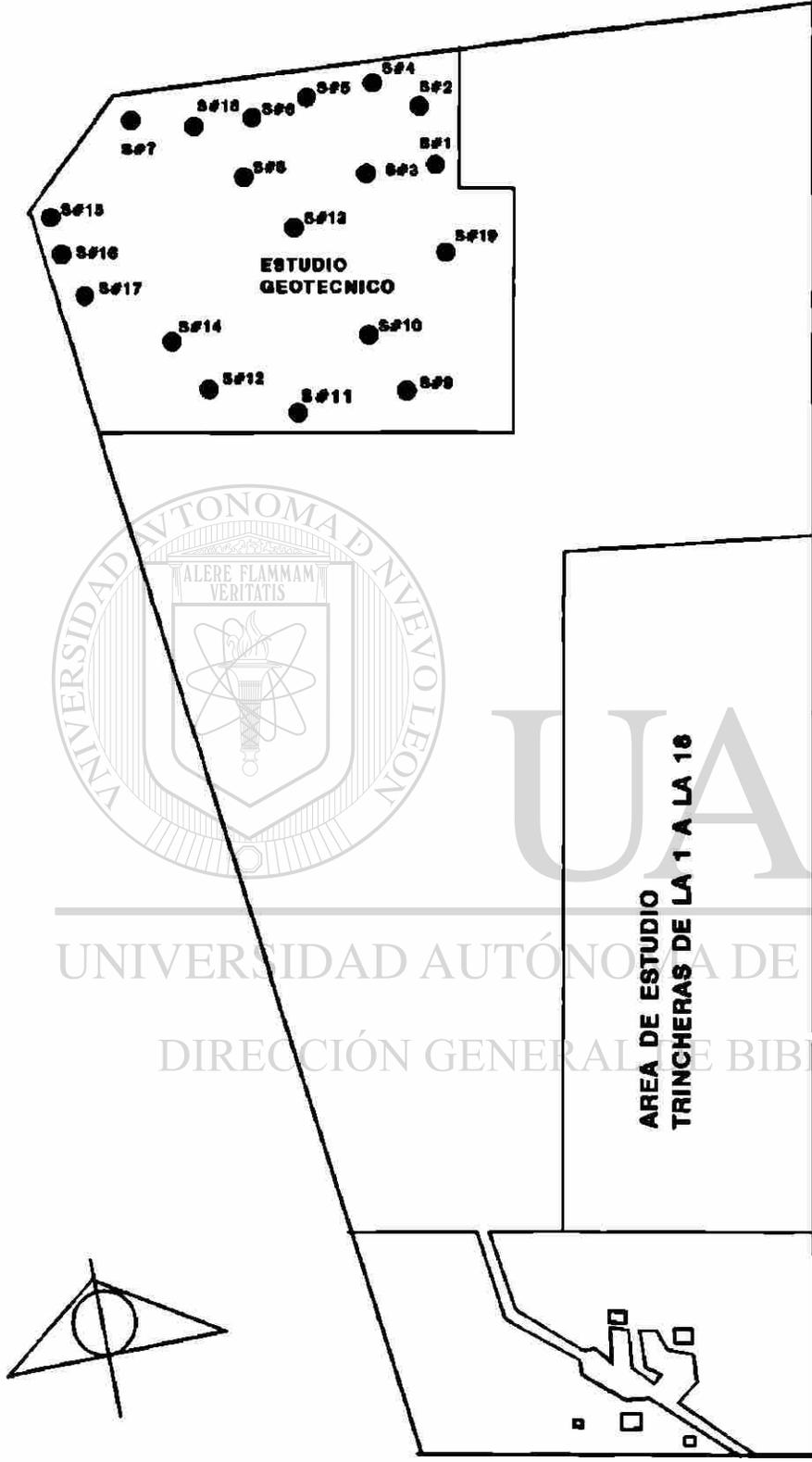
### 3.9 MOVIMIENTO DEL LIXIVIADO

En condiciones normales, es decir, en aquellos rellenos que cuentan con toda la infraestructura para la recolección de lixiviados, el lixiviado se encuentra en el fondo de los rellenos. Desde allí su movimiento en rellenos sin aislamiento es hacia abajo, a través del estrato inferior, aunque también puede producirse algún movimiento lateral, según las características del material circundante.

Para hacer el cálculo de la filtración vertical y el tiempo de penetración del lixiviado, es necesario determinar las características físicas del suelo, principalmente la permeabilidad, la porosidad y el nivel freático.

En el relleno sanitario de Salinas Victoria, N.L. el Departamento de Geotecnia del Instituto de Ingeniería Civil de la UANL realizó, cerca del área de estudio, 26 sondeos con máquina rotaria y a profundidades variables entre 2 y 22 metros. (Ver Figura 14)

En estos sondeos se realizaron pruebas de permeabilidad tipo Nasberg, en materiales no saturados; y tipo Le Franc, en materiales bajo el nivel freático. El nivel freático fluctúa entre 11.8 y 16.1 m de profundidad; la porosidad promedio es de 36% y la permeabilidad promedio en el estrato comprendido entre la base del relleno y el nivel freático es de  $1.57 \times 10^{-7}$  cm/seg.



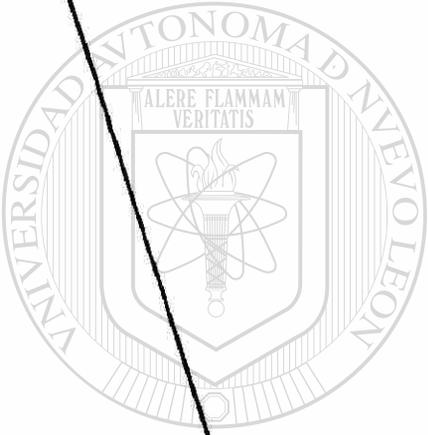
P.F.C.C. A LAREDO

**RELLENO SANITARIO**  
**Salinas Victoria, N.L.**

LOCALIZACION DE SONDEOS

FIGURA 14

Departamento de Geotecnia. Instituto de Ingeniería Civil. UANL.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



### 3.9.1 Cálculo de la Infiltración vertical (Por: Ing. Elías Vázquez Godina)

En la filtración del lixiviado, desde el fondo del relleno hacia el subsuelo, la más importante para el efecto de la contaminación del agua subterránea es la filtración vertical; los cálculos se harán en la sección vertical ya que, en los problemas prácticos de Mecánica de Suelos, es muy frecuente considerar el suelo isótropo en cuanto a su permeabilidad<sup>1</sup>.

Para el cálculo de la filtración vertical se hará uso de la Ley de Darcy, que puede expresarse de la siguiente forma:

$$Q = -KA(dh/dl)$$

donde:

$Q =$  Descarga del lixiviado por unidad de tiempo, m<sup>3</sup>/año

$K =$  Coeficiente de permeabilidad, m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.año

$A =$  Area en perfil a través de la cual corre el lixiviado, m<sup>2</sup>

$dh/dl =$  Gradiente hidráulico, m/m

$h =$  Perdida de carga, m

$l =$  Longitud del camino del flujo, m

El signo negativo en la Ley de Darcy viene del hecho de que la pérdida de carga,  $dh$ , siempre es negativa.

El coeficiente de permeabilidad también se conoce como conductividad hidráulica, permeabilidad efectiva o coeficiente de filtración.

<sup>1</sup> Juárez Badillo, Rico Rodríguez. Mecánica de Suelos, Tomo III. Flujo del agua en suelos.

La tasa de flujo de lixiviación del relleno al agua subterránea se calcula haciendo algunas consideraciones; por ejemplo, suponiendo que el material que se encuentra entre el fondo del relleno y la cima del nivel freático está saturada y que existe una pequeña capa de lixiviado en el fondo del relleno. En estas condiciones, la ecuación de Darcy se aplica de la siguiente forma:

$$Q(\text{m}^3/\text{año}) = -K(\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{año}) \times A(\text{m}^2) \times [-h_i(\text{m})/L_i(\text{m})]$$

Considerando que:

El área total del del relleno en estudio es de 420,000 m<sup>2</sup>

$$Q = 119,863.47 \text{ m}^3/\text{año}.$$

Entonces la capa de lixiviado en el fondo del relleno es de:

$$h = 0.285 \text{ m}$$

En seguida se calculará la distancia que recorre Q (cantidad de lixiviado por año), tomando en cuenta los siguientes datos.

$$Q = 119,863.47 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$h = 0.285 \text{ m}$$

$$A = 420,000 \text{ m}^2$$

$$K = 1.57 \times 10^{-7} \text{ cm/seg.} = 0.04951 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{año}$$

A partir de la ecuación de Darcy se tiene:

$$L = (KAh)/Q$$

$$L = (0.04951 \times 420,000 \times 0.285)/119,863.47$$

$$L = 0.0495 \text{ m}$$

Entonces se sabe que  $119,863.47 \text{ m}^3$  de lixiviado recorren una distancia vertical de  $0.0495 \text{ m}$  en un año.

### 3.9.2 Cálculo del tiempo de penetración del lixiviado, desde el fondo del relleno hasta el nivel freático (Por: Ing. Elías Vázquez Godina).

El tiempo de penetración, en años, que tardan los lixiviados en traspasar un recubrimiento de arcilla de un espesor dado, puede estimarse utilizando el cálculo anterior:

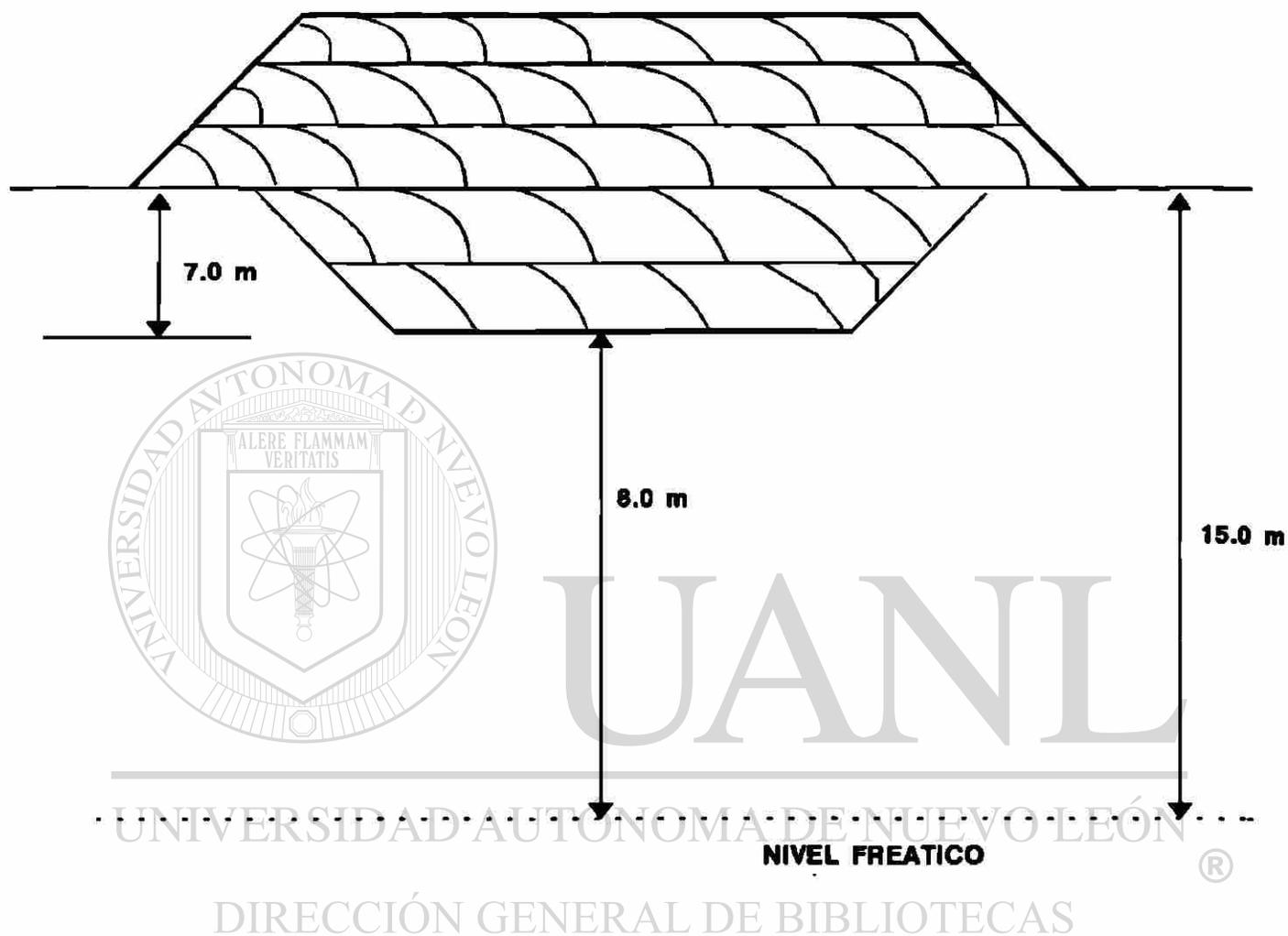
Si el recorrido del lixiviado es de  $L = 0.0495 \text{ m/año}$ , entonces los años que tarda en recorrer el lixiviado un espesor dado queda de la siguiente forma:

$$\text{Años} = L / 0.0495 \text{ m.}$$

Para este caso, el nivel freático se encuentra a 15 metros a partir del terreno natural, pero el fondo de la celda se encuentra a 7 metros, entonces la distancia que tiene que recorrer el lixiviado para llegar al nivel freático es de 8 metros, y el tiempo que tardaría sería de:

$$\text{Años} = 8 / 0.0495$$

161.61 Años.

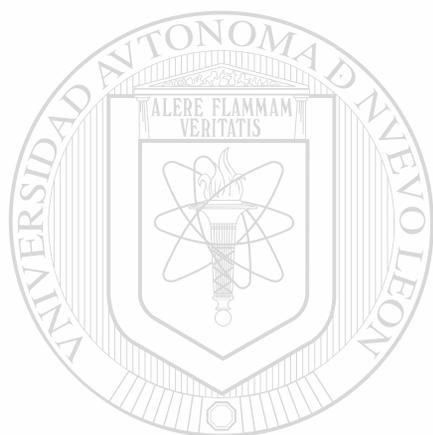


**FIGURA 15** Recorrido del lixiviado desde el fondo del relleno hasta el nivel freático

Ing. Elías Vázquez Godina

**CAPITULO 4**

**METODOS Y TECNICAS PARA EL CONTROL DE LIXIVIADOS**



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

#### 4.1 CONTROL DE LOS LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO.

Actualmente se utilizan, por lo general, materiales aislantes para limitar o eliminar el movimiento del lixiviado y de los gases del relleno, fuera de la zona del mismo. Hasta la fecha (2000), el uso de arcilla como material de aislamiento ha sido el método más utilizado para reducir o eliminar la filtración del lixiviado fuera del relleno. La arcilla es factible por su facilidad para absorber y retener muchos de los constituyentes químicos encontrados en el lixiviado y por su resistencia al flujo del lixiviado. Sin embargo, está aumentando la demanda del uso de aislantes formados por una combinación mixta de geomembrana y arcilla, especialmente por la resistencia proporcionada por las geomembranas al movimiento del lixiviado y de los gases del relleno.

En la tabla 9 se resumen las características , ventajas y desventajas de las geomembranas (también conocidas como recubrimientos de membrana flexible, RMF) que se pueden utilizar en las futuras celdas del relleno sanitario de Salinas Victoria, N.L.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**TABLA 9**

**RECOMENDACIONES ÚTILES PARA MEJORAR EL CONTROL DE LIXIVIADOS**

Material	Comentarios
Recubrimientos sintéticos de membrana flexible (SMF)	Los recubrimientos deben diseñarse y construirse para contener los fluidos, incluyendo a los residuos y lixiviados. Para los rellenos sanitarios no se requieren recubrimientos sintéticos. Sin embargo, si se selecciona esta alternativa, los recubrimientos sintéticos deben tener un espesor máximo de 40 mm. Estos recubrimientos deben instalarse para cubrir todos los materiales geológicos naturales que probablemente estarán en contacto con los residuos o el lixiviado en un relleno.
Selladores de fondo	No existen normas específicas que gobiernen la aplicación de los selladores de fondo de los rellenos sanitarios. El diseño, la construcción y la instalación de los selladores de fondo están sujetos a la aprobación de las dependencias locales.
Recubrimientos artificiales de arcilla	Los recubrimientos de arcilla son opcionales para los rellenos sanitarios. Si las condiciones del lugar lo requieren, los recubrimientos de arcilla para los rellenos sanitarios deben tener un espesor mínimo de 0.3 m y deben instalarse con una compactación relativa de por lo menos el 90%. Un recubrimiento de arcilla debe mostrar una permeabilidad máxima de $1 \times 10^{-8}$ cm/s. Los recubrimientos de arcilla, si se instalan, deben cubrir todos los materiales geológicos naturales que probablemente estarán en contacto con los residuos o el lixiviado en un relleno.
Barreras subsuperficiales	<p>Una barrera subsuperficial se usa conjuntamente con los materiales geológicos naturales para asegurar la satisfacción de las estandarizaciones de permeabilidad lateral.</p> <p>Las barreras serán requeridas en aquellos rellenos sanitarios donde haya un potencial de movimiento lateral de los fluidos, incluyendo residuos y lixiviados, y se puede aprovechar la permeabilidad de los materiales geológicos naturales para contener los residuos en vez de un recubrimiento.</p> <p>Las barreras deben tener un espesor mínimo de 2 pies para el material arcilloso o un mínimo de 40 mm para los materiales sintéticos. Se requiere que estas estructuras estén localizadas a un mínimo de 5 pies, dentro de materiales geológicos naturales que satisfagan los requisitos de permeabilidad de <math>1 \times 10^{-8}</math> a <math>1 \times 10^{-7}</math> cm/s. Si se utilizan muros interceptores, las excavaciones de los rellenos también deben localizarse en materiales geológicos naturales con permeabilidades no mayores que <math>1 \times 10^{-8}</math> cm/s.</p> <p>Se requiere que las barreras tengan sistemas de recolección de fluidos pendiente arriba de la estructura. Los sistemas deben diseñarse, construirse, expectarse y mantenerse para prevenir la acumulación de una cabeza hidráulica contra la estructura. El sistema de recolección debe inspeccionarse regularmente y los fluidos acumulados deben separarse.</p>

Tomada de: George Tchobanoglous, Hilary Theisen, Samuel A. Vigil. *Gestión Integral de Residuos Sólidos*, Volumen I, 1994

**a) Sistemas de recubrimiento para el relleno sanitario.**

El objetivo de utilizar aislamientos en el relleno sanitario es minimizar la filtración del lixiviado en los suelos subsuperficiales por debajo del relleno y eliminar, así, la contaminación potencial de las aguas subterráneas. Para ello se han desarrollado varios diseños de aislamientos para

minimizar el movimiento del lixiviado en la subsuperficie por abajo de los rellenos, entre ellos se recomienda:

**Diseño de multilaminados:** En este diseño se utilizan varias capas de arcilla y geomembranas. Por ejemplo, una capa de arcilla y geomembrana servirá como barrera mixta para controlar el movimiento del lixiviado y del gas del relleno.

La capa de arena o grava servirá como capa de recolección y drenaje del lixiviado generado dentro del relleno.

La capa de geotextil se utiliza para minimizar la mezcla de las capas del suelo con la capa de arena o grava.

La capa final del suelo se emplea para proteger la capa de drenaje y barrera.

Este tipo de diseño se complementa con la instalación de la tubería para la recolección de lixiviados. El diseño proporciona más protección y son hidráulicamente más efectivos que cualquier tipo de impermeabilización, utilizando aislantes.

Existen diferentes variantes del diseño de multilaminados usando telas de filtro geotextil, sobre membranas y arcilla compactada. Se pueden hacer diseños mixtos con capas primarias y secundarias; las primarias, para recolectar los lixiviados y, las secundarias, para detectar fugas

que a la vez sirven como respaldo a las primarias.

**b) Construcción de aislamiento de arcilla.**

Se debe tener mucho cuidado con la construcción del aislamiento de arcilla, ya que el mayor problema de la arcilla es su propensión a agrietarse debido a la desecación, por lo que es muy importante no dejar que la arcilla se seque durante su colocación. Para lograr un buen rendimiento, el recubrimiento de arcilla se debe instalar en capas de 10 a 15 cm, con una compactación adecuada antes de colocar las capas subsiguientes. Se recomienda colocar la arcilla en capas finas para evitar la posibilidad de fugas ocasionadas por la formación de grumos, lo que podría producirse si la capa de arcilla se coloca de una sola vez. Otro problema que podría presentarse, cuando se utilizan arcillas de distintos tipos, es el agrietamiento, ello debido a las diferencias en el hinchamiento. Para evitar estas diferencias, se debe utilizar un solo tipo de arcilla para la construcción del aislamiento.

**4.1.1 SISTEMAS PARA LA RECOLECCION DE LIXIVIADOS.**

El diseño de un sistema para la recolección de lixiviados en el relleno sanitario implica:

- 1) La selección del sistema que se va a utilizar.
- 2) El desarrollo de un plan gradual que incluya la puesta en obra de los canales para el drenaje y para la recolección del lixiviado y tuberías para canalizar el lixiviado, y
- 3) El trazo y diseño de instalaciones para canalizar, recoger y almacenar el lixiviado.

#### 4.1.1.1 Selección del sistema de aislamiento.

El sistema seleccionado depende en gran parte de la geología local y de los requisitos ambientales de la zona del relleno. Por ejemplo, en zonas en donde no hay agua subterránea, quizás sea suficiente un aislamiento sencillo con arcilla compactada. Sin embargo si se quiere controlar la migración de lixiviados y del gas, será necesario un aislamiento mixto de arcilla y geomembrana con una capa apropiada de drenaje y de protección del suelo.

#### 4.1.1.2 Diseño de instalaciones para la recolección de lixiviados.

Se pueden utilizar varios diseños para separar el lixiviado dentro del relleno sanitario. A continuación se describen los diseños de: terraza inclinada y de fondo con tuberías.

##### a) Terrazas inclinadas.

Para evitar la acumulación del lixiviado en el fondo del relleno, la zona del fondo se gradúa en una serie de terrazas inclinadas. En este tipo de diseño, las terrazas deben estar construidas para que el lixiviado que se acumula en la superficie de las terrazas, drene hasta los canales de recolección del lixiviado. Se utiliza una tubería perforada colocada en cada canal, para transportar el lixiviado recogido, hasta una localización central, a partir de la cual se separa para su tratamiento o para riego sobre la superficie del relleno.

La pendiente transversal de las terrazas es normalmente del 1 al 5% y la pendiente de los canales de drenaje es de 0.5 al 1.0%. La pendiente y la longitud máxima del canal de drenaje se seleccionan con base en la capacidad de las instalaciones de drenaje. La capacidad de la

tasa de flujo de las instalaciones se estima utilizando la ecuación de Manning. El objetivo del diseño es no permitir que el lixiviado se estanque en el fondo del relleno, creando así una importante carga hidráulica sobre el aislamiento del relleno. La profundidad de flujo en el tubo perforado de drenaje se incrementa continuamente, desde los tramos altos del canal de drenaje, hasta los tramos bajos.

#### **b) Fondo con tuberías.**

En este tipo de diseño, la zona del fondo se divide en una serie de tiras rectangulares con barreras de arcilla, colocadas a distancias apropiadas. El espaciamiento de cada barrera le corresponde una celda del relleno. Se procede a colocar la tubería longitudinalmente, encima de la geomembrana para recoger el lixiviado. Los tubos para la recolección del lixiviado son de 10 cm y tienen perforaciones cortadas con láser, similares a un colador, sobre la mitad de la circunferencia. Los cortes de láser están espaciados en 0.6 cm y el tamaño del corte es 0.00025 cm, que corresponde al tamaño más pequeño de la arena. Para proporcionar un drenaje efectivo, se inclina el fondo desde el 1.2 hasta el 1.8%. Los tubos para recoger el lixiviado, espaciados cada 6 m, se cubren con una capa de arena que mide 60 cm antes de comenzar el vertido. El uso de un sistema con tubería múltiple para la recolección del lixiviado asegurará la rápida separación del lixiviado del fondo del relleno. Además, el uso de la capa de arena de 60 cm sirve para filtrar los lixiviados, antes de recogerlos para su tratamiento. La primera capa de 1 m de residuos sólidos, que se coloca directamente encima de la capa de arena, no se compacta.

Un rasgo único del diseño es el método utilizado para separar las aguas pluviales de la porción no utilizada del relleno. En la porción no utilizada del relleno se recogen las aguas pluviales en las líneas que al final se utilizarán para la recolección del lixiviado. Cuando se va a poner en funcionamiento la siguiente celda del relleno, se conecta la tubería para el lixiviado al sistema para la recolección del lixiviado y se cubre el tubo que se extiende en la siguiente tira.

#### **4.1.1.3 Instalaciones para separar, recoger y almacenar lixiviados.**

Se pueden utilizar dos métodos para la separación del lixiviado que se acumula dentro del relleno. Se puede colocar un tubo para la recolección del lixiviado en la parte lateral del relleno. Cuando se utiliza este método, debe tenerse mucho cuidado para asegurar que el tubo penetre totalmente en el relleno. Un método alternativo, utilizado para la separación del lixiviado de los rellenos, es el uso de un tubo de recolección inclinado, localizado dentro del relleno.

Las instalaciones para la recolección del lixiviado se utilizan cuando éste se va a reciclar o tratar.

El lixiviado, separado del relleno, se recoge en un depósito de retención y la capacidad del depósito dependerá del tipo de instalaciones disponibles, de la tasa máxima y de descarga permisible en las instalaciones de tratamiento.

Generalmente se recomienda que los depósitos para la retención de lixiviados se diseñen para retener la producción de uno a tres días, durante el período de máxima producción de lixiviado. Se pueden utilizar depósitos de pared sencilla y doble, prefiriéndose los de pared doble por la

seguridad que proporcionan. En cuanto al material del depósito, éste puede ser de plástico o de metal, prefiriéndose los de plástico, ya que son más resistentes a la corrosión.

#### 4.1.2 ALTERNATIVAS PARA EL CONTROL DE LIXIVIADOS.

El control de lixiviados es clave para la eliminación del potencial que tiene un relleno sanitario para contaminar el agua subterránea. Se pueden utilizar varias alternativas para gestionar el lixiviado recogido del relleno sanitario, incluyendo:

- 1) Reciclaje del lixiviado,
- 2) Evaporación del lixiviado,
- 3) Tratamiento seguido por evacuación, y
- 4) Descarga a los sistemas municipales para la recolección de aguas residuales.

##### 4.1.2.1 Reciclaje de lixiviados.

Un método efectivo para el tratamiento de los lixiviados consiste en recogerlos y reciclarlos a través del relleno. Durante las primeras etapas del funcionamiento del relleno, el lixiviado contendrá cantidades importantes de SDT (sólidos disueltos totales), DBO<sub>5</sub> (Demanda bioquímica de oxígeno), DQO (Demanda química de oxígeno), nutrientes y metales pesados. (VER TABLA 1). Cuando se recircula el lixiviado, se diluyen y atenúan los compuestos producidos por la actividad biológica, y por otras reacciones químicas y físicas que se producen dentro del relleno. Por ejemplo, los ácidos orgánicos sencillos presentes en el lixiviado se convertirán en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Por la subida del pH dentro del relleno, cuando se produce CH<sub>4</sub>, los metales se precipitarán y serán retenidos dentro del relleno. Un beneficio extra del reciclaje de los lixiviados es la

recuperación del gas del relleno que contiene  $\text{CH}_4$ . Normalmente la tasa de producción de gas es mayor en sistemas para la recirculación del lixiviado. Para evitar la emisión incontrolada de gases del relleno, cuando se recicla el lixiviado para su tratamiento, se deberá equipar el relleno con un sistema para la recuperación del gas. Finalmente, será necesario recoger, tratar y evacuar el lixiviado residual. En forma que va aumentando el número de trincheras a trabajar, quizá será necesario proporcionar instalaciones para el almacenamiento de lixiviados.

#### 4.1.2.2 Evaporación de lixiviados.

Es uno de los sistemas más sencillos para el control de lixiviados y consiste básicamente en tanques recubiertos para el almacenamiento y evaporación de lixiviados, el lixiviado que no se evapora se riega por encima de las celdas del relleno ya terminadas. En lugares lluviosos, el tanque se cubre durante el invierno con una geomembrana para impedir el paso del agua de lluvia y posteriormente se destapa durante los meses cálidos del verano y el lixiviado que no se evapora, como se dijo anteriormente, se riega por encima de las celdas terminadas o en operación.

Los gases olorosos que pueden acumularse, cuando el tanque está tapado, se pueden extraer hacia un filtro de compost o suelo. Los lechos de suelo pueden tener una profundidad de 0.6 a 0.9 m con tasas de carga orgánica de aproximadamente 1.6 a 0.4  $\text{kg/m}^3$  de suelo.

Cuando se destapa el tanque en los meses de verano, es necesario una aireación superficial para el control de los olores. En el caso de que el tanque no sea muy grande, se puede dejar

tapado todo el año. Otra alternativa es el tratamiento del lixiviado por medio de un tratamiento biológico, con almacenamiento invernal y evacuación por medio de riego sobre terrenos cercanos, durante el verano, en caso de que se cuenta con suficiente terreno disponible; el riego puede ser continuo e incluso en época de lluvias.

#### **4.1.2.3 Tratamiento de lixiviados.**

Cuando no se utiliza el reciclaje y la evaporación de los lixiviados y no es posible evacuarlos directamente a una instalación de tratamiento, será necesaria alguna forma de pretratamiento o tratamiento completo. Debido a que las características de los lixiviados son muy variadas, se han utilizado varias opciones para el tratamiento del lixiviado. En la tabla 10 se resumen las principales operaciones y procesos de tratamiento biológico y físico/químicos utilizados para el tratamiento de lixiviado. El proceso o los procesos de tratamiento elegidos dependerán, en gran parte, del contaminante o contaminantes que haya que separar.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN<sup>®</sup>  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**TABLA 10**  
**PROCESOS Y OPERACIONES BIOLÓGICOS, QUÍMICOS Y FÍSICOS REPRESENTATIVOS, UTILIZADOS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS**

Proceso de Tratamiento	Aplicación	Observaciones
Procesos Biológicos Lodos activados	Separación de orgánicos	Pueden ser necesarios aditivos de desespumamiento; necesario clarificador separador.
Reactores de lotes secuenciales	Separación de orgánicos	Similar a lodos activados, pero no es necesario un clarificador separado; solamente aplicable con tasas de flujo relativamente lentas.
Estanques aireados de estabilización	Separación de orgánicos	Requiere una gran superficie de terreno
Procesos de película fija (filtros percoladores, contactores biológicos rotatorios)	Separación de orgánicos	Frecuentemente utilizado con efluentes industriales similares a los lixiviados, pero no ensayado con lixiviados de rellenos sanitarios
Lagunas anaeróbicas	Separación de orgánicos	Requiere de energía y producción de fangos menores que en los sistemas aerobios; requiere calefacción; mayor potencial para la inestabilidad del proceso; más lento que los sistemas aerobios.
Nitrificación/desnitrificación	Separación de nitrógeno	La nitrificación/desnitrificación puede llevarse a cabo simultáneamente con la separación de orgánicos.
Procesos Químicos Neutralización	Control de pH	De aplicación limitada para la mayoría de los lixiviados
Precipitación	Separación de metales y algunos aniones	Produce un lodo, que posiblemente requiera la evacuación como residuos peligrosos
Oxidación	Separación de orgánicos; destoxicación de algunas especies orgánicas	Funciona mejor con flujos de residuos diluidos; el uso de cloro puede provocar la formación de hidrocarburos clorados
Oxidación por aire húmedo	Separación de orgánicos	Costoso; funciona bien con orgánicos refractarios
Operaciones Físicas Sedimentación/ flotación	Separación de materia en suspensión	Sólo tiene una aplicación limitada; puede utilizarse conjuntamente con otros procesos de tratamiento
Filtración	Separación de materia en suspensión	Solamente útil como proceso complementario
Arrastre por aire	Separación de amoníaco u orgánicos volátiles	Puede requerir equipamiento de control de la contaminación atmosférica
Separación por vapor	Separación de orgánicos volátiles	Altos costos energéticos; el vapor de condensado requiere un tratamiento adicional
Absorción	Separación de orgánicos	Tecnología probada; costos variables según el tipo de lixiviado
Intercambio iónico	Separación de inorgánicos disueltos	Útil solamente como un paso de acabado
Ultrafiltración	Separación de bacterias y de orgánicos con alto peso molecular	Propenso al atascamiento; de aplicación limitada para los lixiviados
Osmosis inversa	Disoluciones diluidas de orgánicos	Costoso; necesario pretratamiento extensivo
Evaporación	Cuando no se permite la descarga de lixiviados	Los lodos resultantes pueden ser peligrosos; puede ser costoso excepto en zonas áridas.

Tomada de: George Tchobanoglus, Hilary Threlson, Samuel A. Vigil. Gestión Integral de Residuos Sólidos, Volumen I. 1994

### 4.1.3 SELECCION DE INSTALACIONES DE TRATAMIENTO

Para seleccionar el tipo de instalaciones de tratamiento hay que tomar en cuenta varios factores: en primer lugar, las características del lixiviado y, en segundo lugar, la localización geográfica y física del relleno.

Las características más importantes que se toman en cuenta de un lixiviado son: Sólidos Disueltos Totales (SDT), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Metales pesados, Sulfatos y constituyentes tóxicos sin especificar. Por ejemplo, un lixiviado que contiene altas concentraciones de SDT (por ejemplo, >50,000 mg/L), es difícil tratarlo biológicamente y con valores altos de DQO, es mejor un proceso de tratamiento anaerobio. Para un lixiviado con altas concentraciones de sulfatos, no es recomendable un proceso anaerobio, debido a la producción de olores procedentes de la reducción biológica de sulfatos a sulfuro. La toxicidad también representa un problema, sobre todo, para procesos de tratamiento biológico.

En cuanto a la capacidad de las instalaciones de tratamiento, éstas dependerán del tamaño del relleno sanitario y de la vida útil esperada.

## 4.2 SISTEMAS PARA EL CONTROL DEL AGUA SUPERFICIAL EN EL RELLENO SANITARIO

Para tener un buen control de los lixiviados es importante, también, el control de toda el agua superficial, incluyendo la lluvia, la escorrentía, los arroyos intermitentes y los manantiales artesianos. Con el uso de una cubierta correctamente diseñada, una pendiente superficial adecuada y un drenaje adecuado para el agua pluvial, se puede controlar eficazmente la

filtración superficial. Mediante controles correctos para el agua superficial, seguramente no será necesaria una barrera impermeable superficial.

Eliminar o reducir la cantidad de agua superficial que entra en el relleno es de fundamental importancia para el diseño de un relleno sanitario controlado, ya que el agua superficial es la que mayor contribuye al volumen total de lixiviado. No se debe permitir que la escorrentía del agua de lluvia de los alrededores entre al relleno, y no se debe permitir que la escorrentía superficial (procedente de lluvia), se acumule sobre la superficie del mismo.

Los sistemas para el control del agua superficial son:

- Instalaciones de drenaje para el agua superficial.
- Estanques para el almacenamiento del agua pluvial.
- Capas de cubierta intermedia.
- Capas de cubierta final.

#### 4.2.1 Instalaciones de drenaje para el agua superficial

En los lugares en donde la escorrentía del agua pluvial, procedente de los alrededores, pueda entrar en el relleno, se debe instalar un sistema de drenaje correctamente diseñado.

Se puede diseñar el sistema de drenaje para separar solamente la escorrentía de los alrededores, o bien para separar la escorrentía de los alrededores y también de la superficie del relleno.

En las partes del relleno donde se han instalado sistemas de aislamiento completo, en todo el fondo, el diseño del aislamiento debe tener en cuenta la desviación del agua pluvial que no cae sobre los residuos cuando se vierten.

En aquellas partes donde solamente hay que separar el agua superficial de la superficie del relleno, deberán instalarse obras de drenaje para limitar el recorrido del agua superficial. Se pueden utilizar canales interceptores y dirigirlos hacia un canal principal más grande para apartarlo del lugar.

#### **4.2.2 Estanques para el almacenamiento del agua pluvial.**

Para los meses cuando las precipitaciones son altas y fuertes, se deben construir estanques para contener los flujos desviados del agua pluvial, minimizando así las inundaciones. Normalmente, se debe recoger el agua pluvial, tanto de las áreas terminadas del relleno como en las zonas aún no utilizadas.

#### **4.2.3 CAPAS DE CUBIERTA INTERMEDIA.**

Se utilizan las capas de cubierta intermedia para cubrir los residuos colocados diariamente con el fin de:

- Prevenir la presencia y proliferación de moscas y aves.
- Impedir la entrada y proliferación de roedores.
- Evitar incendios y presencia de humos.
- Minimizar los malos olores.

- **Disminuir la entrada de agua de lluvia a los desechos.**
- **Orientar los gases hacia las chimeneas para evacuarlos del relleno.**
- **Dar una apariencia estética aceptable al relleno.**

La mayor cantidad de agua que entra en el relleno, y que finalmente se convierte en lixiviado, es la que entra durante el período de operación del relleno. Parte del agua, en forma de lluvia, entra mientras se están colocando los residuos en el relleno. El agua también entra en el relleno, primero, filtrándose y después, pasando a través de la cubierta intermedia. De esta forma, los materiales y la técnica de puesta en obra de la cubierta intermedia pueden limitar la cantidad de agua superficial que entra en el relleno.

#### **4.2.3.1 Materiales utilizados para las capas de cubierta intermedia**

Con el perfeccionamiento de técnicas de operación de rellenos sanitarios, se ha buscado la adaptabilidad a varios tipos de materiales para usarse como cubierta intermedia. De entre los materiales que se han usado, en diferentes partes del mundo, se encuentran residuos de jardín (abono verde), compost de residuos de jardín, compost de residuos sólidos urbanos, recubrimiento geosintético de arcilla, suelo nativo típico, arena arcillosa lodosa y arcilla.

De los materiales listados, el compost producido a partir de residuos de jardín y de residuos sólidos urbanos, el recubrimiento geosintético de arcilla y la arcilla, son eficaces para limitar la entrada de aguas superficiales en el relleno. Para conseguir la mayor eficacia posible, utilizando los materiales arriba citados, se debe inclinar la cubierta intermedia correctamente, para

aumentar la escorrentía de las aguas superficiales.

Se recomienda colocar una capa muy espesa de suelo sobre la celda llena. El agua de lluvia que se filtra por la capa de la cubierta intermedia, es retenida en virtud de su capacidad de campo; cuando va a colocarse un segundo nivel sobre el primero, se recomienda apartar el suelo y almacenarlo antes de comenzar el relleno. El uso de la técnica de almacenar temporalmente el material de cubierta adicional sobre una celda ya llena, puede limitar significativamente la cantidad de agua que entra en el relleno. También se puede utilizar espuma sintética como material de cubierta intermedia. Por lo general, la espuma funciona bien, excepto cuando llueve.

#### **4.2.3.2 Capas de cubierta intermedia utilizando materiales residuales.**

Quando está limitada la cantidad de suelo nativo para ser utilizado como material de cobertura intermedia, se pueden utilizar materiales alternativos para este propósito. Estos incluyen: compost y abono verde producidos a partir de residuos de jardín y compost producido a partir de los desechos sólidos. Una de las ventajas importantes de utilizar compost y abono verde, es que el volumen del relleno que habría sido ocupado por el suelo utilizado para la cubierta intermedia, ahora está disponible para la evacuación de materiales residuales. Cuando la cantidad de material de cubierta es limitada, el uso de residuos sólidos fermentados puede incrementar significativamente la capacidad del relleno sanitario.

Entre otros materiales que se pueden utilizar como material de cubierta intermedia se incluyen: alfombras, residuos de construcción y demolición y residuos agrícolas.

#### 4.2.3.3 Impacto del material de cobertura.

El material de cobertura, normalmente tierra, se incorpora al relleno en cada etapa de construcción. Una cubierta diaria, de 15 a 30 cm de tierra, se aplica en los frentes de trabajo del relleno, diariamente, al final de la operación, para controlar vectores sanitarios como ratas e insectos, y para no permitir el vuelo de materiales. La cobertura intermedia es una capa más espesa que el material de cubierta diaria, y que se aplica en las zonas del relleno que no se van a trabajar durante algún tiempo. Las coberturas finales, normalmente tienen de 1 a 2 metros de espesor e incluyen una capa de arcilla compactada, junto con otras capas, para aumentar el drenaje y soportar la vegetación. La cantidad de material de cubierta, necesario para el funcionamiento del relleno, es un factor importante en la determinación de la capacidad del relleno. Normalmente, las necesidades de cubierta diaria e intermedia son expresadas como una relación residuos/suelo, definida como el volumen de residuos depositados por unidad de volumen de cobertura proporcionado.

La relación residuos/suelo, se determina considerando la geometría de una celda del relleno. Las celdas son más o menos paralelepípedas, con material de cubierta en tres de los seis lados. El área superficial de estos frentes depende de la pendiente de los frentes de trabajo del relleno, del volumen de la celda, de la altura del nivel y de la anchura de la terraza en la que se colocan los residuos. Las pendientes del frente de trabajo, normalmente están entre 2:1 y 3:1. Se puede

calcular el volumen de la celda dividiendo la masa media del material depositado cada día por la densidad media del nivel. Se puede seleccionar la altura del nivel y la anchura de la celda para proporcionar la menor relación residuo/suelo aceptable.

#### 4.2.4 CAPAS DE CUBIERTA FINAL

Los propósitos principales de la cubierta final, en el relleno, son:

- Minimizar la entrada de agua procedente de la lluvia, después de terminar el relleno.
- Limitar la salida incontrolada de gases del relleno.
- Suprimir la proliferación de vectores.
- Limitar el potencial de incendios.
- Proporcionar una superficie apta para la vegetación del lugar.
- Servir como elemento central en la recuperación del lugar.

Para afrontar estos propósitos, la cubierta del relleno debe:

- soportar extremos climáticos (por ejemplo, ciclos de calor/frío, humedad/sequedad, etc.),
- resistir la erosión acuática y eólica,
- tener una estabilidad suficiente frente a hundimientos, roturas, fallas de pendiente, deslizamientos etc.,
- resistir los efectos del asentamiento diferencial en el relleno, causados por la salida del gas y la compresión de los residuos y del suelo de cimentación,
- resistir el deterioro debido a las operaciones del relleno, tales como sobrecargas ocasionadas por el almacenamiento y el movimiento de vehículos de recolección en las

partes terminadas del relleno,

- resistir las deformaciones producidas en los materiales de cubierta por los constituyentes del gas del relleno, y
- resistir rupturas causadas por plantas, animales de madriguera, lombrices e insectos.

#### **4.2.4.1 Materiales artificiales utilizados para la cubierta final.**

También es posible utilizar materiales artificiales para la cobertura final de los residuos sólidos, como son las membranas sintéticas, que en conjunción con materiales naturales, realizan satisfactoriamente todas las funciones de la cubierta.

Cabe mencionar que la utilización de estos materiales incrementa aún más el costo de la obra, pero para casos especiales, como pudiera ser la cobertura de residuos industriales no peligrosos, se justificaría ampliamente la utilización de estos materiales.

#### **Características de los materiales artificiales.**

Las características principales con que deberán contar las membranas sintéticas son las siguientes:

- Facilidad en su transporte, manejo y colocación.
- Resistencia al desgaste y agrietamiento, así como a elementos químicos y orgánicos.
- Capacidad de carga.

### **Tipos de membranas.**

Básicamente, se consideran tres tipos de membranas sintéticas, clasificadas en función del tipo de material de fabricación.

#### **a) membranas de polietileno.**

A este tipo de membranas se les conoce comúnmente como "geomembranas" y se emplean generalmente en espesores de 40 a 60 milésimas de pulgada. Deben colocarse sobre suelos perfectamente lisos y libres de restos de elementos punzantes, para evitar su rompimiento.

Las superficies de colocación deben tener aproximadamente 30 cm de espesor, perfectamente compactada y lisa, preferentemente arcilla limpia y libre de elementos gruesos.

Posteriormente, se deberá cubrir la geomembrana con otra capa de material de las mismas características con la finalidad de prevenir su deterioro debido a agentes climáticos y mecánicos.

La unión y sellado de la geomembrana se realiza por termofusión.

#### **b) membranas de P.V.C.**

Estas membranas deben colocarse también sobre superficies compactadas con rodillos lisos, siguiendo el mismo sistema de manejo y colocación que la anterior. Su costo es un poco más elevado que la membrana de polietileno.

La unión de la membrana se realiza mediante un sistema de inyección de un adhesivo especial, dejando un traslape de aproximadamente cuatro pulgadas, debiendo quedar esta unión perfectamente lisa y sellada.

**c) membranas con alma geotextil.**

Este tipo de membranas están constituidas por un alma de geotextil, el cual consiste en un hilado sintético, no tejido, impregnado con asfalto plástico.

La base de geotextil se presenta en tres espesores: base 100, base 200 y base 500. Este material se adapta perfectamente a las superficies a cubrir, no necesitan un acabado tan liso como las anteriores y permite además, el tránsito de equipos rodados sobre ellas.

El sellado y la unión de la membrana se realiza con el mismo asfalto plástico que impregna el alma.

De los tres tipos de membranas mencionados anteriormente, la que más se ha utilizado en nuestro país es la membrana de polietileno de alta densidad, o también llamada comúnmente "geomembrana".

#### **4.2.4.2 Selección del tipo de suelo para la cubierta final.**

Antes de utilizar un suelo para la cubierta final se debe hacer un análisis para su clasificación. Con base en los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio, se procederá a clasificar la muestra o muestras de los suelos potencialmente factibles, como bancos de material para la cobertura final de los residuos sólidos, con la finalidad de seleccionar el más adecuado.

La clasificación del suelo se recomienda que se realice de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), para posteriormente determinar su eficiencia como material de cubierta final. La tabla 11 muestra las características y propiedades más importantes de cada uno de los grupos en que se subdividen los suelos.

Esta misma tabla indica el grado de eficiencia que tiene cada suelo para ser utilizado como material de cobertura final de los residuos sólidos, con base en sus propiedades más importantes, como son: la permeabilidad, la compresibilidad, compactación y saturación; así como la transitabilidad de los vehículos sobre éste, la resistencia a la erosión por viento y agua, y al agrietamiento; de igual manera evita el venteo del biogás y la proliferación de vectores.

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

TABLA 11  
PROPIEDADES IMPORTANTES DE LOS SUELOS PARA LA COBERTURA FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

NOMBRES TIPOC DE SUELOS	GRUPO DEL SUELO	PERMEABILIDAD DEL SUELO COMPACTADO	COMPRESIBILIDAD COMPACTACIÓN Y SATURACIÓN	TRANSMISIBILIDAD	RESISTENCIA AL VIENTO DE BOMBAS	RESISTENCIA A LA EROSIÓN POR LLUVIA	RESISTENCIA A LA EROSIÓN POR VIENTO	IMPEDIR LA PROLIFERACIÓN DE VECTORES	RESISTENCIA AL AMPLIAMIENTO	EFICIENCIA COMO MATERIAL DE COBERTURA
Gravels bien graduadas; mezclas de grava y arena, pocos o ningunos finos	GW	Mala	Mínima	Excelente	Pésimo	Excelente	Excelente	Pésimo	Excelente	BUENA
Gravels mal graduadas; mezcla de gravas y arena, pocos o ningunos finos	GP	Pésima	Mínima	Excelente	Malo	Excelente	Excelente	Pésimo	Excelente	BUENA
Gravels limosas; mezclas mal graduadas de grava, arena y limo	GM	Regular	Mínima	Muy buena	Regular	Muy buena	Muy buena	Malo	Muy buena	EXCELENTE
Arenas arcillosas, mezclas mal graduadas de grava, arena y limo	GC	Buena	Muy baja	Buena	Buena	Muy buena	Buena	Regular	Buena	EXCELENTE
Arenas bien graduadas; arenas gravosas, pocos o ningunos finos	SW	Mala	Mínima	Excelente	Malo	Excelente	Excelente	Pésimo	Excelente	REGULAR

Manual para la clausura de Tiraderos a Cielo Abierto. Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C. Noviembre de 1994.

CUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS  
EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, N.L.

TABLA 11 (Continuación)  
PROPIEDADES IMPORTANTES DE LOS SUELOS PARA LA COBERTURA FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

NOMBRES TÍPICOS DE SUELOS	SÍMBOLO DEL GRUPO	PERMEABILIDAD DEL SUELO COMPACTADO	COMPRESIBILIDAD COMPACTA CON Y SATURACION	TRANSMISIBILIDAD	IMPEDIR EL VIENTO DE BOGAR	RESISTENCIA A LA EROSION POR LLUVIA	RESISTENCIA A LA EROSION POR VIENTO	IMPEDIR LA PROLIFERACION DE VEGETACION	RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO	EFICIENCIA COMO MATERIAL DE COBERTURA
Arenas mal graduadas; arenas gravosetas, pocas o ningunas finas	SP	Pésima	Muy baja	Excelente	Regular	Excelente	Excelente	Pésimo	Excelente	Regular
Arenas limosas; mezclas de arena y limo, mal graduadas	SM	Regular	Baja	Muy buena	Regular	Buena	Muy buena	Malo	Excelente	Regular
Arenas arcillosas; mezclas de arena y arcilla, mal graduadas	SC	Buena	Baja	Buena	Buena	Regular	Buena	Buena	Buena	Excelente
Limos inorgánicos y arenas muy finas; potvos de roca, arenas finas, arcillas limosas de baja plasticidad	ML	Muy buena	Medía	Regular	Muy buena	Regular	Regular	Regular	Regular	Buena
Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media; arcillas gravosas, arenas limosas y potres	CL	Excelente	Medía	Regular	Excelente	Pésima	Regular	Buena	Mala	Buena

Manual para la clausura de Tiraderos a Cielo Abierto, Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C. Noviembre de 1994.

TABLA 11 (Continuación)  
**PROPIEDADES IMPORTANTES DE LOS SUELOS PARA LA COBERTURA FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS**

TIPO DE SUELOS	GRUPO DEL SUELO	PERMEABILIDAD DEL SUELO COMPACTADO	COMPRESIBILIDAD COMPACTACIÓN Y SATURACIÓN	TRANSPIRABILIDAD	IMPEDIR EL VENTILADO DE LOS RESIDUOS	RESISTENCIA A LA EROSIÓN POR LLUVIA	RESISTENCIA A LA EROSIÓN POR VIENTO	IMPEDIR LA PROLIFERACIÓN DE VECTORES	RESISTENCIA AL AGRIETAMIENTO	EFICIENCIA COMO MATERIAL DE COBERTURA
Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad	OL	-	Medio	Mala	-	Pésimo	Malo	Regular	Mala	Mala
Limos orgánicos; limos micáceos o diatomáceos; limos eslécticos	MH	Muy buena	Alta	Pésimo	-	Mala	Pésimo	Muy bueno	Pésimo	Mala
Arcillas inorgánicas de alta plasticidad muy compresibles; arcillas francas	CH	Excelente	Alta	Pésimo	Excelente	Mala	Pésimo	Excelente	Pésimo	Mala
Arcillas orgánicas de plasticidad media o alta; limos orgánicos de media plasticidad	OH	-	Alta	-	-	Regular	-	-	Pésimo	Mala
Turba y otros suelos altamente orgánicos en proceso de descomposición	PI	-	Alta	-	-	Buena	-	-	-	Pésimo

Manual para la clausura de Tiraderos a Cielo Abierto. Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C. Noviembre de 1994.

#### **4.2.4.3 Manejo y mejoramiento del material de cobertura.**

Después de haber seleccionado el suelo a utilizar para la cobertura de los residuos sólidos, es necesario tomar en cuenta algunas recomendaciones necesarias en la colocación y el manejo del material, con objeto de mejorar sus propiedades y características.

A continuación se mencionan los procedimientos más usuales que se utilizan para mejorar las propiedades del material de cobertura durante su manejo y colocación en la obra:

##### **a) Compactación de la cubierta**

La compactación de la cubierta consiste en incrementar la resistencia del suelo y reducir su permeabilidad utilizando medios mecánicos.

La selección del equipo mecánico a utilizar para lograr buena compactación, estará en función del tipo de material a utilizar; esto es que, para suelos gravo-arenosos, el equipo recomendable es el de tipo vibratorio, mientras que para los suelos arcillosos, los equipos de carga estática resultan más ventajosos. Entre los equipos disponibles para realizar la compactación de la cubierta se encuentran los rodillos lisos y los rodillos "pata de cabra", así como algunos otros que son combinación de éstos.

La eficiencia del equipo, en la compactación del material de cubierta, estará en función de los resultados obtenidos en las pruebas de compactación realizadas en el laboratorio; estos resultados indicarán el contenido de agua y la energía de compactación suministrada al suelo

para alcanzar la mayor compactación posible.

En la figura 16 se muestran algunos ejemplos de curvas típicas de compactación, llamadas curvas de densidad máxima, para varios tipos de suelos ideales; estas curvas muestran el contenido de humedad óptima, expresado en porcentaje de peso del suelo seco, que permite el máximo grado de compactación.

Una vez seleccionado el tipo de suelo para la cubierta, se deberá hacer una curva tipo de compactación, para así determinar su humedad óptima y el grado de compactación.

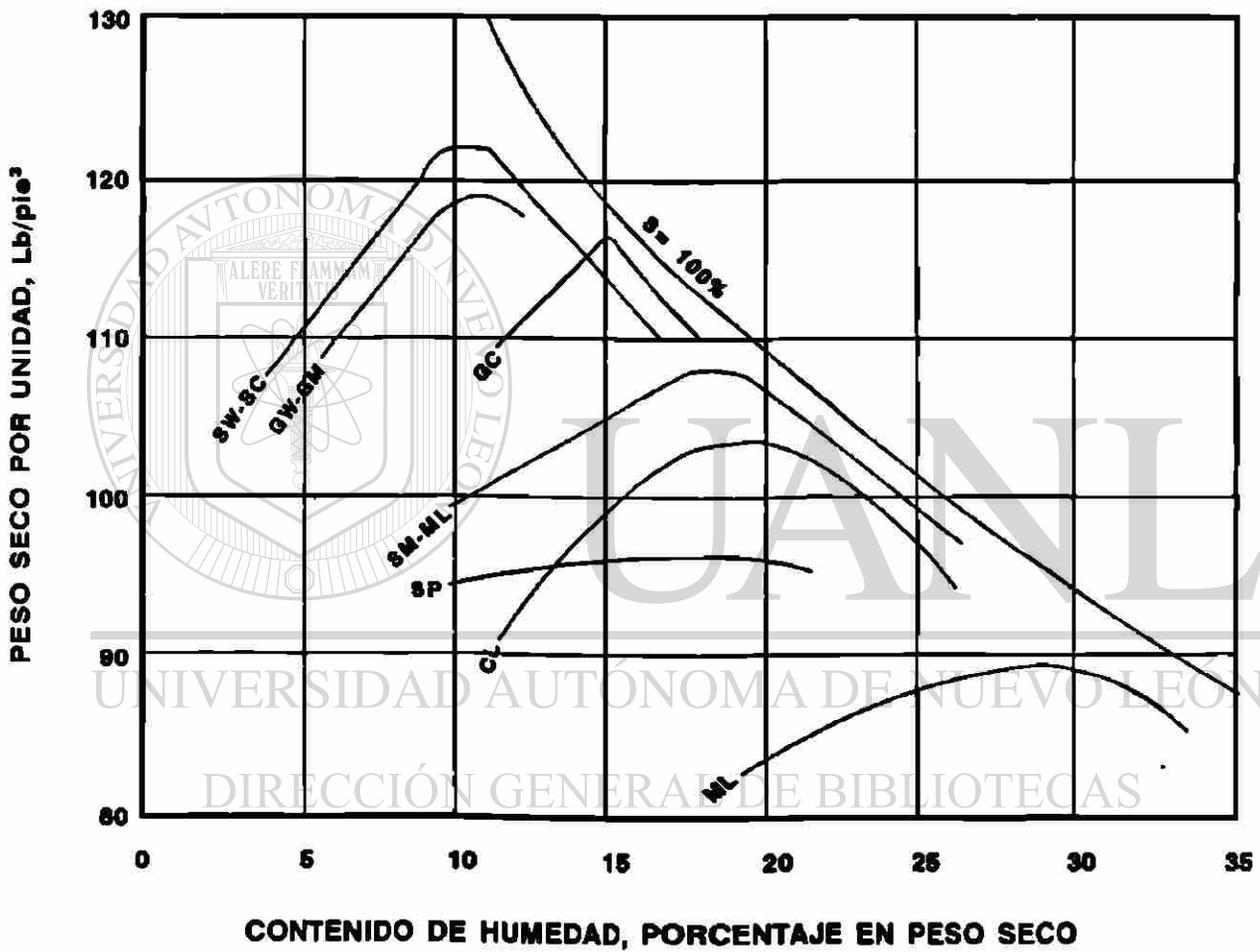
Es conveniente además, realizar directamente en la obra, una prueba simple de compactación para comprobar los resultados obtenidos en el laboratorio y, asegurarse de que el equipo empleado esté trabajando efectivamente en las condiciones previstas en el proyecto, una vez iniciada la obra.

#### **b) Mejoramiento del material de cobertura.**

En caso de que no se encontrara un banco de material que reuniera las características y funciones indispensables para ser utilizado como cubierta final, se puede realizar una mezcla de diferentes tipos de suelo.

Sin embargo, cabe señalar que esta mezcla de suelos aumenta el costo de la colocación y manejo de la cubierta final, por lo que no es muy común su utilización, a excepción de casos

### CURVAS DE COMPACTACION



Manual para la clausura de Tiraderos a Cielo Abierto. CICMAC.  
 Noviembre de 1994.

FIGURA 16

especiales.

Las mezclas más comunes de los suelos son con:

- Adición de grava.
- Adición de arenas.
- Adición de arcillas.

#### **c) Adición de grava.**

Con la adición de grava a los suelos finos se obtiene un incremento en el grado de compactación, pudiendo presentarse este mismo efecto, de manera similar, en otros materiales, como por ejemplo en los residuos sólidos triturados o molidos que, en casos especiales, se llega a utilizar como material de cubierta (diaria).

#### **d) Adición de arenas.**

La adición de este material tiene la finalidad de cubrir las deficiencias en la graduación de las partículas del material de cobertura, reduciendo con ésto la permeabilidad de la cubierta. También es posible disminuir los costos de esparcido y compactación al adicionar arenas a suelos arcillosos, ya que se hace menos pegajoso y resbaladizo el material de cobertura. Asimismo, estos materiales granulares son buenos como base de sustento de la cubierta vegetal.

**e) adición de arcillas.**

El suministro de suelos arcillosos repercute considerablemente en la reducción de la permeabilidad. Ciertamente, podrá causar dificultades en su manejo si su contenido de humedad es muy alto; pero deberá suministrarse en cantidades adecuadas para mejorar el material original de cobertura, disminuyendo con ésto su permeabilidad.

**f) Sellado del relleno sanitario.**

Un sellado moderno de un relleno sanitario conforma una serie de capas, cada una de las cuales tiene una función especial.

La capa sub-base del suelo se utiliza para contomear la superficie del relleno y servir como sub-base para la capa barrera.

En algunos casos, se deberá colocar una capa para la recolección del gas debajo de la capa de suelo, con la finalidad de transportar el gas del relleno hacia instalaciones para la gestión del gas.

Se utiliza la capa barrera para restringir la entrada de líquidos en el relleno y la salida de gases a través de la cubierta.

Se utiliza la capa de drenaje para transportar las aguas de lluvia, que se filtran a través del material de cobertura, fuera de la capa barrera, y para reducir la presión del agua sobre la capa barrera.

La capa superficial se usa para contorneear la superficie del relleno y que sirva como soporte de las plantas que se utilizarán en el diseño de clausura a largo plazo.

Se debe resaltar que no todas las capas son necesarias en todos los casos. Por ejemplo, una capa para la recolección de gas, no será necesaria donde exista un sistema activo para la recuperación del gas. A veces, también se puede utilizar la capa sub-base como capa para la recolección del gas.

La capa barrera es la más importante por las razones anteriormente citadas. Se puede utilizar una capa de arcilla como capa barrera, aunque tiene algunos inconvenientes. Por ejemplo, una arcilla es difícil de compactar sobre una cimentación blanda, la arcilla compactada puede desarrollar grietas debido a la desecación, la congelación puede dañar la arcilla, el asentamiento diferencial causa grietas en la arcilla y ésta, una vez dañada, es difícil de separar en una cubierta de relleno, y finalmente, la capa de arcilla no restringe el movimiento del gas del relleno de una forma significativa. En consecuencia, se recomienda el uso de una o más geomembranas, antes que el uso de arcilla, como capa barrera en el sellado del relleno. Y se pueden usar también recubrimientos geosintéticos de arcilla para la capa barrera.

#### **4.2.4.4 Selección de la cobertura final.**

La selección y colocación de un material adecuado para la cobertura final de los residuos sólidos requiere de la aplicación de técnicas de ingeniería con la finalidad de determinar el tipo de material adecuado para cubrir los residuos, cumpliendo con los requisitos técnicos

necesarios para asegurar el buen funcionamiento del sello final.

Las principales restricciones que se tienen al diseñar y seleccionar el material de cobertura para el sellado final de los residuos sólidos son: la cantidad y características del material, así como su localización y disponibilidad en volumen; es decir, que se deberá seleccionar un banco de material con las propiedades adecuadas y con el volumen suficiente para cubrir la superficie que demande los residuos sólidos, tomando en consideración que este banco se localice lo más cercano posible al sitio de clausura.

Para realizar una buena selección y buen diseño de la cubierta final, es necesario establecer ciertos lineamientos a seguir. Se recomienda tomar en consideración los siguientes puntos:

- Primero, establecer las funciones que deberá cumplir el material de cobertura.
- Segundo, determinar las características y propiedades del suelo, en términos del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.).
- Tercero, planear y diseñar el procedimiento de operación y clausura, así como de la superficie final del sitio, con la finalidad de realizar una cuantificación del material necesario para realizar la cobertura final. Establecer algunos procedimientos, como la compactación, con la finalidad de mejorar ciertas funciones del suelo.

- Cuarto, cuando no se disponga de un suelo que reúna las características mínimas para ser empleado como material de cobertura, se deberán considerar en el diseño algunos mejoradores de suelo o aditivos y, en algunos casos, el empleo de materiales sintéticos.

#### **Características de la cobertura final.**

Dentro de la operación de rellenos sanitarios existe un requisito indispensable: cubrir los residuos sólidos diariamente al término de la jornada de trabajo por lo que, al finalizar la vida útil de éste, es necesario colocar una cubierta final o capas de sello.

Por tal motivo, el material a utilizarse para la cobertura final de los residuos sólidos, deberá contar con ciertos requisitos para cumplir con sus funciones.

#### **Funciones de la cobertura.**

La cobertura o sello final de los residuos sólidos tiene como funciones primordiales las siguientes:

- a) Minimizar la proliferación de moscas y roedores, así como controlar la atracción de animales.
  - Evitando la aparición y atracción de moscas y otros insectos.
  - Disminuyendo la atracción de aves, roedores y otros animales.
- b) Controlar el escurrimiento de agua pluvial.
  - Minimizando la infiltración.

- **Disminuyendo la erosión.**
- c) **Controlar el flujo del biogás.**
- **Dirigiendo el flujo hacia los pozos de captación.**
  - **Facilitando el monitoreo de la calidad del biogás.**
- d) **Minimizar los posibles incendios.**
- **Confinando los materiales fáciles de incendiarse.**
  - **Controlando y disminuyendo la entrada de oxígeno.**
- e) **Disminuir el impacto estético negativo al medio ambiente.**
- **Evitando la dispersión de papeles.**
  - **Controlando los malos olores.**
  - **Estableciendo una apariencia agradable del sitio.**
- f) **Operar adecuadamente durante las clausuras de otras zonas.**
- **Facilitando el acceso y tránsito de vehículos, así como la facilidad de trabajo en época de lluvias.**
  - **Creando zonas para la construcción de obras provisionales (oficinas, campamentos etc).**

**g) Soportar la cubierta vegetal.**

**Algunas otras funciones de la cubierta final que pueden ser consideradas son:**

- **Minimizar la erosión ocasionada por viento.**
- **Proporcionar funcionalidad en condiciones adversas del clima (lluvia, frío, etc)**
- **Asegurar la estabilidad de los taludes.**
- **Evitar la saturación de los residuos sólidos.**

### **4.3 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO Y SELECCION DE LA COBERTURA FINAL.**

Para lograr una buena selección del material que servirá como cubierta final de los residuos sólidos y poder definir las especificaciones de diseño, para esta etapa, es recomendable tomar en cuenta algunas consideraciones.

A continuación se establece un plan general que deberá ser considerado, tomando en cuenta las características y restricciones propias del lugar y de los materiales disponibles.

#### **4.3.1 Esquema general.**

- **Establecer las funciones de la cubierta para el sitio de clausura, basándose en información confiable sobre la cantidad y tipo de los residuos a cubrir, las características climatológicas a las que estará sujeta la cubierta, aspectos sociales y económicos, así como los riesgos potenciales del sitio.**
- **Obtener información de los diferentes materiales de cubierta final.**

**Establecer y ubicar posibles bancos de material cercanos al sitio, considerando el tipo de material y el volumen disponible.**

**Realizar una clasificación del suelo de los diferentes bancos de material seleccionados, con base al S.U.C.S.**

**Efectuar los análisis del laboratorio correspondientes, para cada una de las muestras obtenidas, de cada uno de los bancos de material preseleccionados,**

**Revisar las opciones existentes sobre la utilización de materiales artificiales.**

- **Elegir el mejor sistema de cobertura con base en:**

**El orden de importancia de las funciones.**

**El grado de efectividad con que cubrirá cada una de las funciones.**

**La disponibilidad de obtener el material.**

**Una evaluación de costo-beneficio.**

**El uso final del sitio.**

- **Diseñar el sistema de cobertura.**

**Especificaciones para la colocación y manejo del material seleccionado.**

**Especificaciones de diseño para cubrir alguna función especial**

- Realizar un plan de operación y preparación de la superficie por cubrir.
- Establecer las normas de control de calidad.

Ahora bien, una vez seleccionado el material de cobertura final y teniendo las características de él, puede presentarse que éste no cubra satisfactoriamente con todas las funciones encomendadas, por lo que es necesario modificar su estructura o implementar algunos mecanismos de control o, tal vez, utilizar una combinación de diferentes materiales.

Por lo anterior, a continuación se mencionan algunas recomendaciones para suplir las deficiencias del material de cubierta en algunas de las funciones primordiales de ésta.

- 1.- Impedir la infiltración y la percolación de agua pluvial.
  - Incrementando la pendiente superficial y realizando cunetas de desvío y desalojo.
  - Adicionando otros suelos de mejor graduación.
  - Usando aditivos.
  - Incrementando el espesor de la cubierta de material.
  - Usando membranas como barreras impermeables.
  - Compactando el material con equipo especial.
  - Usando un sistema combinado por capas de diferentes materiales.

- 2.- Evitar el flujo del biogás en toda la superficie.
- Usando suelos muy finos, como la arcilla.
  - Manteniendo alto el grado de saturación del suelo.
- 3.- Controlar la erosión por agua.
- Mezclando suelos granulares como las arenas y las gravas.
  - Compactando el material con equipo especial.
  - Reduciendo la pendiente superficial.
  - Construyendo obras de drenaje interiores y exteriores.
  - Colocando una cubierta vegetal.
  - Usando aditivos.
- 4.- Reducir la erosión por viento.
- Adicionando suelos granulares como las arenas y las gravas.
  - Minimizando las elevaciones irregulares de la superficie.
  - Considerando en el diseño la orientación y dirección de los vientos.
  - Colocando una cubierta vegetal.
  - Usando aditivos.
- 5.- Minimizar la generación de polvos.
- Disminuyendo la distancia de recorrido dentro del sitio, creando un sistema

centralizado.

- Dando continuo mantenimiento a los caminos de acceso.
- Sembrar vegetación desde el inicio de las operaciones de cobertura

6.- Garantizar la seguridad de los taludes

- Realizando un análisis de estabilidad.
- Diseñando la inclinación de los taludes cuidando que no sea menor de 2:1.
- Construir bermas en la parte frontal o lateral del talud.
- Construyendo muros de retención.
- Compactando el material con equipo especial.

7.- Reducir los efectos de heladas.

- Utilizando capas de suelos granulares.
- Contando con una reserva de material disponible para la cobertura.
- Programando las operaciones de acuerdo con la época del año.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

#### **4.4 SUPERVISION DE LA CALIDAD AMBIENTAL EN EL RELLENO SANITARIO.**

La supervisión ambiental en el relleno sanitario se debe llevar a cabo para asegurar que ningún contaminante, que pueda afectar la salud pública y al ambiente circundante, escape del relleno.

La supervisión necesaria se puede dividir en tres categorías generales:

- supervisión de la zona aireada para gases y líquidos,
- supervisión de las aguas subterráneas y
- supervisión de la calidad del aire

##### **4.4.1 Supervisión de la zona aireada**

La zona aireada se define como aquella zona entre la superficie del suelo y el lugar donde se encuentra el agua subterránea permanente. Una característica importante de la zona aireada es que los espacios de los poros no están ocupados por agua y que las pequeñas cantidades de agua, que están presentes, coexisten con aire. La supervisión de la zona aireada en el relleno implica líquidos y gases.

##### **4.4.1.1 Supervisión de líquidos en la zona aireada.**

La supervisión de líquidos en la zona aireada es necesaria para detectar escapes de lixiviados desde el fondo del relleno. En la zona aireada, la humedad mantenida en los intersticios de las partículas del suelo o dentro de la roca porosa, siempre se mantiene a presiones por debajo de la presión atmosférica. Para eliminar la humedad, es necesario desarrollar una presión negativa o un vacío, para arrastrar la humedad fuera de las partículas del suelo. Como hay que aplicar una succión para arrastrar la humedad, fuera de la zona aireada, no se pueden usar pozos

convencionales u otras cavidades abiertas para obtener muestras en esta zona. Los dispositivos de muestreo, utilizados para la extracción de muestras en la zona no saturada, se llaman lisímetros de succión. Las tres clases de lisímetros más comúnmente utilizados son:

1. de taza cerámica,
2. de fibra hueca y
3. de filtro de membrana.

El dispositivo que generalmente se utiliza para obtener muestras de humedad en la zona aireada es la taza cerámica, que consiste en una taza porosa, o anillo hecho de material cerámico, que está acoplado a una sección corta de tubería no porosa (por ejemplo, PVC). Cuando se coloca en el suelo, como tiene poros, se convierte en una extensión del espacio poroso del suelo. La humedad del suelo es succionada a través del elemento poroso de cerámica, mediante la aplicación de vacío. Cuando se ha recogido una cantidad suficiente de agua en el muestreador, la muestra recogida se lleva a la superficie a través de un tubo estrecho, mediante la aplicación de vacío, o se empuja hacia arriba, mediante presión de aire.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

#### 4.4.1.2 Supervisión del gas en la zona aireada.

La supervisión de los gases en la zona aireada es necesaria para detectar el movimiento lateral de los gases del relleno. En muchos sistemas de control se recogen las muestras del gas, en múltiples profundidades, dentro de la zona aireada.

#### **4.4.2 Supervisión del agua subterránea.**

La supervisión del agua subterránea es necesaria para detectar cambios en la calidad de la misma, que puedan producirse a causa del escape de los lixiviados y de los gases del relleno. Se necesitan dos tipos de pozos (de pendientes positiva y negativa) para detectar cualquier contaminación del acuífero subterráneo, causado por el lixiviado del relleno. En la figura 17 se ilustra un ejemplo de un pozo utilizado para el monitoreo de las aguas subterráneas.

#### **4.4.3 Control de la calidad del aire.**

El control de la calidad del aire del relleno implica:

- a) el control de la calidad del aire ambiental, dentro y en el entorno del relleno,
- b) el control de los gases extraídos del relleno y
- c) el control de los gases de salida, procedentes de instalaciones, para el procesamiento o tratamiento del gas.

##### **4.4.3.1 Control de la calidad del aire ambiental.**

Se controla la calidad del aire ambiental en las zonas del relleno para detectar el movimiento de contaminantes gaseosos en el contorno del relleno. Se pueden dividir los dispositivos para el muestreo del gas en tres categorías: 1) pasivos, 2) de extracción, y 3) activos. El muestreo pasivo implica la recogida de una muestra del gas, mediante el paso de una corriente de gas a través de un dispositivo de recogida, en el que se separan los contaminantes contenidos en la corriente de gas para su análisis subsiguiente. El muestreo pasivo, comúnmente utilizado en el

pasado, apenas se utiliza actualmente. Las muestras de extracción se recogen utilizando un frasco vacío, una jeringuilla de gas o una bolsa para la recolección de aire, elaborada con un material sintético. Un muestreo activo implica la recolección y el análisis de una corriente continua de gas.

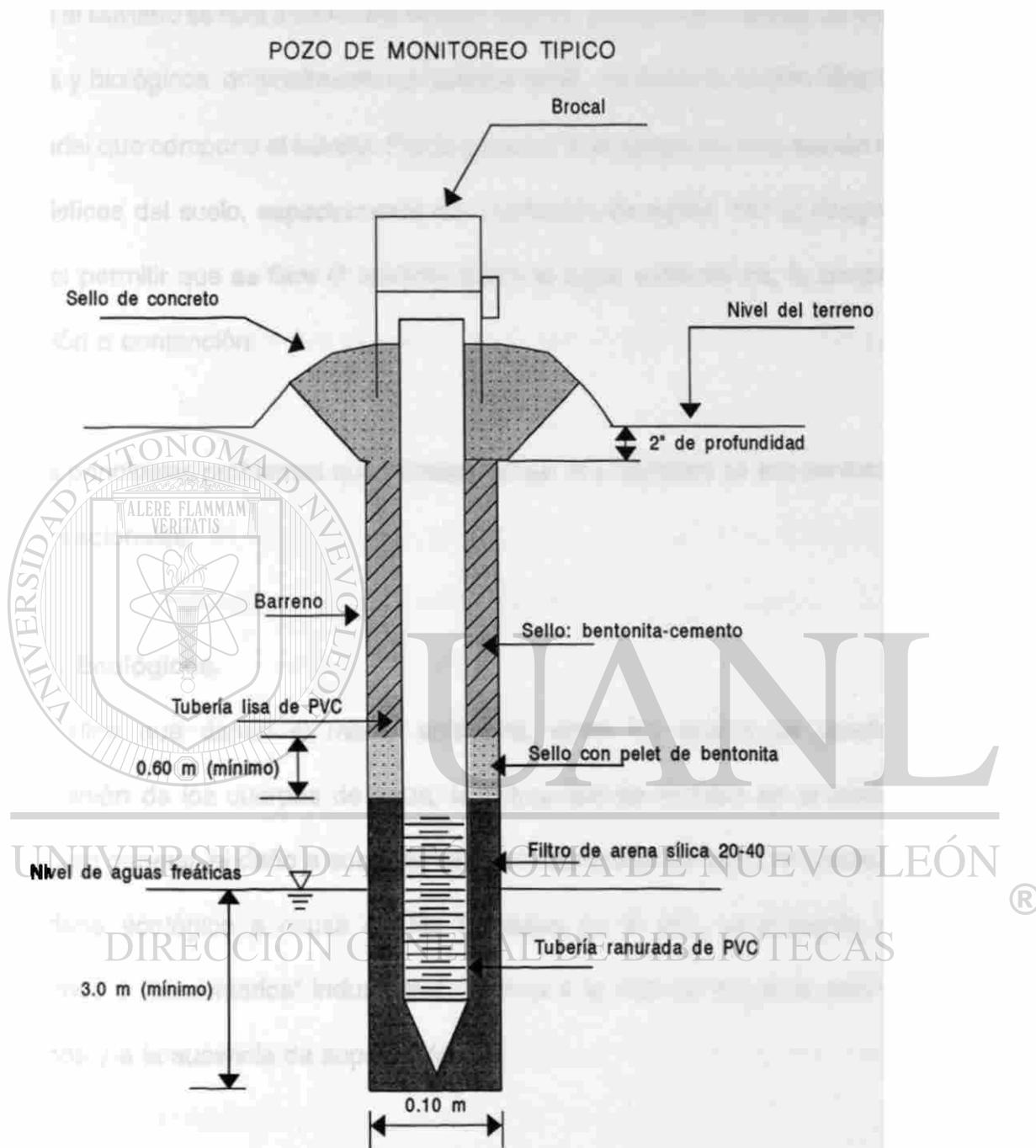
#### **4.4.3.2 Control del gas extraído del relleno.**

Se controla el gas del relleno para valorar la composición del gas, y para determinar la presencia de oligoconstituyentes, que puedan ocasionar un riesgo ambiental o para la salud pública.

#### **4.4.3.3 Control de los gases de salida.**

Se lleva a cabo el control de los gases de salida, procedentes de las instalaciones de tratamiento y de recuperación de energía, para determinar si cumplen los requisitos de control de contaminación atmosférica. Se puede utilizar el muestreo de extracción y el continuo para tal propósito.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**FIGURA 17** Pozo típico para el monitoreo del agua subterránea.

Recomendado por el Departamento de Geotecnia del Instituto de Ingeniería Civil, F.I.C. U.A.N.L. para el Relleno Sanitario. Estudio para SIMEPRODE. 1997

#### 4.5 IMPACTOS NEGATIVOS QUE PUDIERAN PRESENTAR LOS LIXIVIADOS.

Mientras el lixiviado se filtra a través del estrato inferior, se separan muchos de los constituyentes químicos y biológicos, originalmente contenidos en él, mediante la acción filtrante y absorbente del material que compone el estrato. Por lo general, la amplitud de esta acción depende de las características del suelo, especialmente del contenido de arcilla. Por el riesgo potencial que implica el permitir que se filtre el lixiviado hasta el agua subterránea, la mejor práctica es su eliminación o contención.

Entre los principales problemas que pueden causar los lixiviados se encuentran los ecológicos y los operacionales:

##### a) Ecológicos.

Son aquellos que dañan el medio ambiente, entre los cuales se puede mencionar la contaminación de los cuerpos de agua, la saturación de metales en el suelo que provocan acidez y, en general, el daño a ecosistemas que dependen del agua afectada. Actualmente, el mayor daño ecológico a causa de los lixiviados es el que se presenta en los tiraderos clandestinos o "cementeros" industriales, debido a la falta de estudios previos, tratamientos adecuados y a la ausencia de supervisión.

### **b) Operacionales.**

Estos dificultan la operación del relleno sanitario; un exceso de lixiviado provoca que la basura alcance un menor grado de compactación y, por consiguiente, una menor resistencia mecánica y menor volumen por almacenar en una celda.

Es importante, una vez que se tiene conocimiento de los problemas que generan los lixiviados, encontrar formas de controlar y neutralizar los impactos negativos que se presentan.

#### **4.5.1 Monitoreo de lixiviados.**

Este es el primer paso que se debe de dar para tomar acciones tendientes al control de lixiviados. Se pueden presentar dos situaciones en los rellenos sanitarios:

La primera, que tomando en cuenta las normas técnicas de diseño, se haya dado a la superficie del relleno las pendientes y la compactación necesarias para la recolección de lixiviados, entonces se llevarán a cabo la construcción de cárcamos de colección, tal como lo especifica el PROYECTO de Norma NOM 084 ECOL 94, Que establece los requisitos para el diseño de un relleno sanitario y la construcción de sus obras complementarias, y que sirven para determinar la composición química del lixiviado e implementar los procesos para su estabilización o neutralización.

La otra situación, se refiere a que el relleno sanitario se haya construido sin atender a las normas técnicas correspondientes, o se operen en forma incorrecta, de tal manera que presente la

infiltración de lixiviados hacia el subsuelo. En tal caso, se pueden hacer monitoreos para determinar la pluma contaminante, o sea el flujo de agua que tiene presencia de lixiviados.

EL monitoreo para detectar la presencia de lixiviado se puede hacer por medio de los siguientes métodos:

#### **4.5.1.1 Monitoreo por el método directo.**

El monitoreo de la pluma contaminante se puede realizar usando este método, que consiste en realizar pozos para la extracción de agua o muestras de suelo, las cuales se analizan para determinar la presencia de contaminantes. La desventaja de estos métodos se encuentra en el hecho de que solamente presentan resultados puntuales de la pluma de contaminante y su costo no permite realizar demasiadas perforaciones. En la figura 17 se presenta un ejemplo de un pozo para el monitoreo del agua subterránea.

#### **4.5.1.2 Métodos Indirectos.**

Esto se refiere, específicamente, al método geofísico de las resistividades, para el cual existen dos arreglos que comúnmente se usan, dependiendo de las características de los estudios:

Arreglo Wenner. Este tipo de arreglo tiene la separación constante entre electrodos; se utilizan comúnmente para delimitar estratos hasta profundidades de 30 metros de manera más detallada, pero abarcando un área más delimitada.

Arreglo Shulumerger. Este arreglo mantiene fijo el punto medio de la línea de electrodos de potencial y, mediante incrementos sucesivos, se separan los electrodos de corriente, permitiendo obtener las resistividades de estratos cada vez más profundos; este arreglo es el más usado por la profundidad que pueden alcanzar sus lecturas.

Experimentalmente se tienen rangos de valores para suelos típicos, de donde se hace una correlación entre las estratigrafías y las resistividades obtenidas. A continuación se da la siguiente tabla de "resistividades tipo".<sup>1</sup>

**Tabla 12. Resistividades tipo**

MATERIAL	RESISTIVIDAD (ohm-m)
Granito	$3 \times 10^4$
Pirita	$1 \times 10^5$
Salmuera	$5 \times 10^2$
Arcilla	1.0
Yeso	10
Agua dulce	50
Gravas y arenas saturadas con agua dulce	$10^2$
Serpentina	$3 \times 10^2$
Caliza	$10^{0.5}$
Granito	$10^{0.5}$
Cuarzo	$10^{0.11}$
Calcita	$5 \times 10^{0.12}$

<sup>1</sup> Revista de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Abril-Junio, 1994

En la tabla anterior puede observarse el intervalo de valores; el monitoreo de la pluma contaminante, por el método de las resistividades, está basado en el hecho de que el lixiviado contiene sales y metales en solución, lo que hace que la resistividad disminuya, o sea, que el lixiviado se comporte como un buen conductor; entonces se tiene un sondeo y sus resistividades resultantes. Analizando los resultados, se puede estimar con bastante exactitud la trayectoria del líquido contaminante, que será aquella en donde los puntos presentan una resistividad anormalmente baja con respecto a los puntos adyacentes o a los mismos puntos, si se cuentan con los registros de sondeos anteriores.

Lo anteriormente expuesto permite deducir que, para suelos con un alto contenido salino, no es aplicable el método de las resistividades pues la variación de ésta, debido a la migración de lixiviados, es casi imperceptible.

#### **4.6 ESTRATEGIAS PARA NEUTRALIZAR LOS IMPACTOS NEGATIVOS DEBIDO A LA PRESENCIA DE LIXIVIADO.**

Las medidas de control preventivas y correctivas que se pueden realizar para mitigar o prevenir los impactos negativos que provocan la presencia de lixiviado, en el relleno sanitario, son básicamente las siguientes:

- 1) Preventivas, para los confinamientos por construir, y
- 2) Correctivas, para los confinamientos en los que no se consideró la captación de lixiviados y no hubo el diseño de las obras complementarias adecuadas.

#### **4.6.1 Métodos de control preventivos.**

Los métodos de control preventivos se recomiendan para aquellas nuevas áreas a utilizar en el área del relleno sanitario de Salinas Victoria, N.L., o en otras áreas, al término de la vida útil del relleno sanitario.

En cualquiera de los dos casos, se sujetarán a las Normas Oficiales Mexicanas NOM 084 ECOL 94, en donde se dice que debe haber colectores, subcolectores y, por lo menos, tres pozos de monitoreo para lixiviados.

Al fondo de la microcelda, y en cada capa de cubierta, se le debe dar una pendiente de 0.4%. Eso tiene la finalidad de captar los lixiviados que escapen del sistema de recolección. Tanto el material de la base como el de cobertura de las capas, deberán compactarse al 90% próctor para asegurar una permeabilidad baja.

Otro método de control preventivo que permite conocer la composición química, la temperatura de los desechos, la generación de biogás y las interacciones entre celdas, es el método de las celdas de control. Permite investigar el comportamiento para generar parámetros de diseño, y llevar a cabo el monitoreo del mismo, para evitar posibles riesgos de contaminación ambiental. Para que una celda sea representativa de las condiciones reales del relleno, se deberán tomar las siguientes consideraciones:

- 1) El volumen de la celda que sea similar al de la basura por depositar en un día normal.
- 2) El volumen del lixiviado por captar.
- 3) El volumen del biogás, incluyen amoniaco, ácido sulfhídrico, nitrógeno y principalmente bióxido de carbono y metano.

Entre las instrumentaciones de la celda se encontrarán: tubería para extracción de biogás y lixiviado, termopares para poder conocer la temperatura de los desechos y se instalarán bancos de nivel fijos, a fin de conocer los asentamientos.

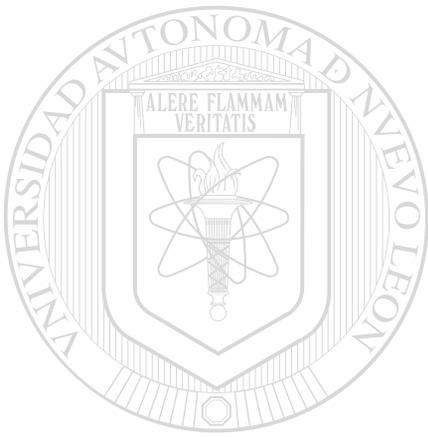
Otra forma de evitar el transporte de lixiviados es cubrir la totalidad de las celdas con geotextiles o cualquiera de las formas comentadas en el punto 4.1: "Control de Lixiviados en el Relleno Sanitario".

#### **4.6.2 Métodos correctivos.**

Se pueden hacer varias sugerencias para el control de lixiviado proveniente del relleno sanitario:

- 1) Para mejorar el fondo y aumentar la resistencia mecánica al esfuerzo cortante, se puede inyectar una solución de cal; ésto hace que aumente el número de iones hidróxido y, por lo tanto, la capacidad de intercambio catiónico aumenta también.

- 2) Dependiendo de las condiciones topográficas, se puede realizar la construcción de un canal perimetral a cielo abierto, abajo del nivel de la base del relleno sanitario y, previo estudio de flujo subterráneo, construir un cárcamo de colección.
  
- 3) En el caso de que el lixiviado ya se encuentre en la zona saturada, aprovechando la forma de transporte, se pueden crear controles hidrodinámicos, por medio de conos de abatimiento por bombeo y dirigir



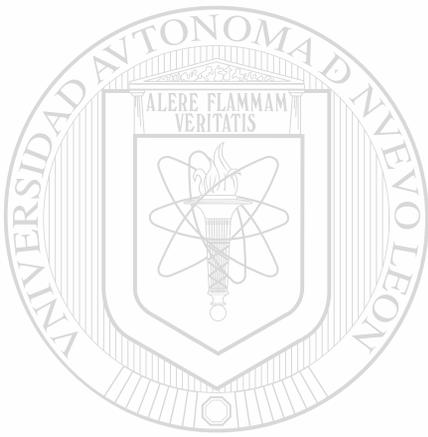
# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

---

**CUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS  
EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA N.L.**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

1. La producción de lixiviado se presenta a partir del segundo año de operación del relleno sanitario; y tampoco se produce gas sino hasta principios del segundo año de operación.
2. La producción de lixiviado aumenta de acuerdo con la operación del relleno sanitario. Mientras el relleno esté en operación, se produce cada vez más lixiviado.
3. Durante el tiempo de operación del relleno sanitario, la producción de lixiviado depende directamente del régimen de lluvias, pero esto no repercute en el mismo año, sino para los años siguientes, ya que se va acumulando la humedad en los residuos y en el material de cobertura.
4. Después de terminado el relleno sanitario, la cantidad de agua que penetra en el mismo es factor importante para la producción de lixiviado; pero esto no se ve reflejado en los resultados obtenidos en el fondo del relleno, sino más bien en los niveles intermedios. Cabe destacar que la producción de lixiviados, en el fondo del relleno, va disminuyendo, ya que tarda en descender por los diferentes niveles del mismo.
5. De acuerdo con los cálculos efectuados, la producción de lixiviados empieza a disminuir al segundo año después de que deja de operar el relleno sanitario, y podrá llegar un

momento en que esta producción sea constante, en cantidades mínimas, o que la producción sea cero; ésto dependerá básicamente de las condiciones de humedad y temperatura del lugar y de las características de la cubierta final del relleno sanitario.

6. En general, se puede decir que, aún en condiciones de altas temperaturas, puede haber producción de lixiviado ya que, por lo regular, se presentan lluvias durante la operación del relleno y la humedad queda atrapada entre los residuos y el material de cobertura y, aún con temperaturas cálidas no se evaporará completamente; por lo tanto, si se sigue trabajando a un ritmo normal, cada día será más difícil que la temperatura llegue hasta los residuos para evaporar completamente la humedad presente en los mismos. Hay que tomar en cuenta que la mayor cantidad de agua que entra en un relleno y que, finalmente, se convierte en lixiviado, entra durante el período de operación. En este caso en particular, en el Area Metropolitana de Monterrey se dan temperaturas promedio por arriba de los 30°C en algunos meses del año (junio, julio y agosto, principalmente) y aún así, de acuerdo con los cálculos, existe producción de lixiviado.

7. De acuerdo con los cálculos realizados, se tiene una producción promedio de 119,863.47 m<sup>3</sup>/año de lixiviado, y un recorrido de 0.0495 m por año, por lo que se calcula que, en aproximadamente 161 años, el lixiviado llegará al nivel freático.
8. El efecto principal de la contaminación se presenta en el suelo, ya que éste retiene los materiales contenidos en el lixiviado; ésto provoca que el suelo pierda o disminuya sus

características mecánicas, por lo que puede provocar asentamientos y grietas sobre el relleno sanitario, lo cual puede dar lugar a que se infiltre más agua de la pronosticada en los cálculos.

9. Los asentamientos y grietas son producto no solamente de la falla del suelo de base, sino también de la descomposición de la basura de las capas intermedias.
10. Se debe evitar, a cualquier costo, que la contaminación llegue al manto freático, ya que una vez ahí, será muy difícil su descontaminación o purificación.

## RECOMENDACIONES

- Dado que el agua que entra al relleno después de su operación depende básicamente de las condiciones y características de la cubierta final; se debe seleccionar muy bien el material para dicho propósito, y construir y dar mantenimiento periódico a las obras complementarias, como sería el caso de los canales laterales para recolectar el agua de lluvia.
- Dado que se pueden llegar a presentar ciertos problemas ocasionados, tanto por deformaciones ocurridas en el interior de la celda, como por intemperismo, para el mantenimiento y conservación de la cubierta final del relleno sanitario se recomienda:

- Que las pendientes que se deben preparar para el escurrimiento del agua pluvial, en la parte superior de la celda terminada, deberán prepararse de tal forma que, sobre ellas, las pendientes no sean mayores del 2% para facilitar el escurrimiento y salida del agua de lluvia, así como evitar encharcamientos y erosión por efecto del escurrimiento del agua de lluvia.
  
- Que para solucionar el problema de las depresiones se escarifique con pala, rastrillo o zapapico toda el área afectada, ello con el fin de cuantificar los daños y limpiar el área y que, después de escarificar y limpiar el área, se coloque el material de cobertura necesario para llevar a cabo la nivelación de la superficie afectada.
  
- Que para reparar las grietas se escarifique con pala, rastrillo o zapapico, el área afectada por la grieta y que, después de haber escarificado y limpiado el área afectada, se coloque material de cubierta a todo lo largo de la grieta y en un ancho de cuando menos 20 cm de cada lado de ella.
  
- Dado que la erosión se puede presentar tanto en taludes como en terraplenes, para ambos casos, se recomienda escarificar 10 cm con maquinaria o manualmente y, después, humedecer la zona afectada y reparar hasta llegar a la superficie original.

- Los suelos recomendados para la cubierta final son:

Las gravas arcillosas: mezclas mal graduadas de gravas, arena y arcillas, son excelentes como material de cobertura, ya que su permeabilidad al suelo compactado es buena, la resistencia a la erosión por lluvia es muy buena y la resistencia a la erosión, por viento, es buena y su resistencia al agrietamiento también es buena.

Se pueden usar también, con muy buenos resultados, arenas arcillosas: mezclas de arena y arcilla mal graduadas y gravas limosas: mezclas mal graduadas de grava, arena y limo<sup>1</sup>.

En este caso, se ha estado utilizando el material de corte, ya que es de buena calidad para tal propósito. El material de corte está compuesto principalmente de arcilla calichosa y limo café consolidado, y gravas y boleas empacados en arcilla, parcialmente cementados<sup>2</sup>.

- Dado que la supervisión ambiental es necesaria para asegurar que ningún contaminante proveniente del relleno pueda afectar la calidad sanitaria del ambiente circundante y por ende la salud pública; y ya que se encuentran asentamientos humanos muy cerca del relleno sanitario, es importante diseñar una red de monitoreo para la supervisión del agua subterránea con el fin de obtener información confiable y representativa de las características del acuífero, la dirección del flujo y características físicas y químicas del

---

<sup>1</sup> Manual para la Clausura de Tiraderos a Cielo Abierto. Colegio de Ingenieros Civiles de México. A.C. Nov. 1994

<sup>2</sup> Estudio Geotécnico. Departamento de Geotecnia. Instituto de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería Civil. U.A.N.L. 1997

**agua subterránea.**

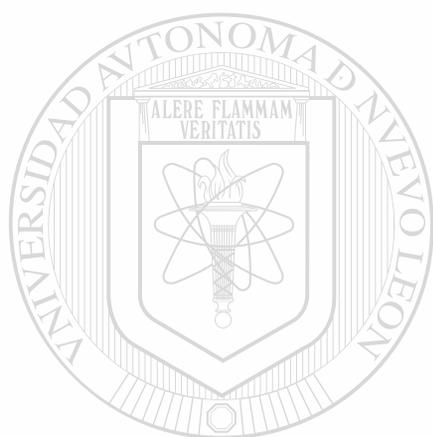
La red de pozos de monitoreo del agua subterránea deben adecuarse para monitorear las características de cada acuífero o las zonas de transporte de agua; las redes de monitoreo del agua subterránea deben incluir suficiente número de pozos, tanto aguas arriba como aguas abajo del relleno sanitario; sólo así se podrá detectar más fácilmente la extensión horizontal y vertical de algún contaminante y su posible transportación.

- En el caso de detectar algún contaminante en el agua subterránea, se deberá dar aviso a la autoridad correspondiente, para que sea ésta quien dicte las medidas a seguir y, al mismo tiempo, implementar cualquiera de las acciones recomendadas en el capítulo 4.5.2 ya que, como se comentó anteriormente, existen asentamientos humanos cerca del relleno sanitario, en los cuales existen norias y pozos, y se utiliza el agua para riego, abrevadero y uso doméstico en menor escala.

- Se recomienda diseñar una red de monitoreo para supervisar la calidad del aire en el relleno sanitario y para detectar el movimiento de los contaminantes gaseosos en la periferia del mismo. Se deberá controlar la salida del gas del relleno para evaluar la composición del mismo y detectar la presencia de compuestos que puedan representar un riesgo ambiental o a la salud pública.

- Para las áreas que se encuentran actualmente en operación, se recomienda que la basura proveniente de la planta clasificadora se ubique en una celda especial para tales residuos, para así poder llevar un control más estricto sobre la producción de gas y lixiviado ya que ambos dependen de la calidad de la basura, del método de operación y de la edad del relleno sanitario.
- También se recomienda instalar una área especial para almacenar la basura durante la época de lluvia; en el área se recibirá la basura durante los días de lluvia, para así evitar que la operación del relleno se haga en forma normal. Durante la época de lluvia se puede colocar el material de cobertura sobre los desechos para evitar que el agua penetre sobre ellos; después de las lluvias se puede laborar en otro frente de trabajo y cubrir los desechos con el material que se utilizó para cubrir los desechos durante la lluvia, siempre y cuando este material cumpla con las características para cubierta intermedia o final, según sea el caso. El uso de esta técnica de almacenar temporalmente el material de cubierta adicional sobre una celda terminada o en operación, puede limitar significativamente la cantidad de agua que entra en el relleno sanitario, y por lo tanto, disminuir la producción de lixiviado.
- Por último, se recomienda hacer una separación de celdas para cada tipo de desecho (desechos municipales que entran directamente a las celdas de confinamiento, desechos industriales no peligrosos, desechos provenientes de la planta clasificadora, etc.) y llevar un mejor control del tipo de desecho presente en cada una de las celdas. Una vez

identificadas las celdas, y las características de sus desechos, se procederá a cuantificar la producción de gas y sus características, y hacer una nueva valoración sobre la producción de lixiviado; tanto para las áreas terminadas, como para las que se encuentran en operación, para así poder llevar un mejor control sobre la producción y el tratamiento de lixiviado en todo el Relleno Sanitario.



UANL

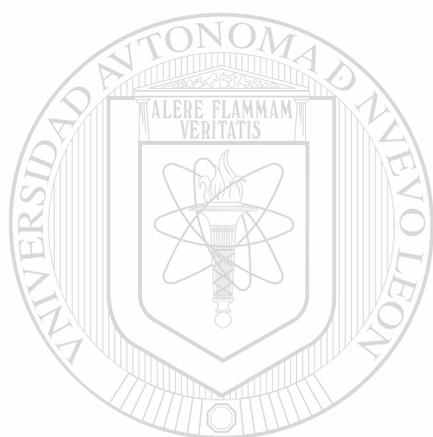
---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## **BIBLIOGRAFIA**



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

---

**QUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS  
EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA N.L.**

---

**BIBLIOGRAFIA**

**Azevedo Netto y Acosta Alvarez (1976)**

Manual de Hidráulica

México, Harla

**Castany G.(1971)**

Tratado práctico de las aguas subterráneas

Barcelona, Omega.

**Custodio Emilio y Llamas Manuel Ramón (1976)**

Hidrología subterránea

Barcelona, Omega.

**Ecology and Enviroment, Inc. Whitman, Requardt and Associates (1985)**

Toxic Substance Storage Tank Containment

Park Ridge, New Jersey, USA. Noyes Publications.

**Fried Jean J. (1975)**

Groundwater Pollution. Theory, Methodology, Modelling and Practical Rules.

Amsterdam. Elsevier Scientific Publishing Company.

**Gábor Kiss. "Consideraciones Medioambientales en Proyectos de Rellenos Sanitarios"**

En la Revista Ingeniería y Ciencias Ambientales

Año 10, Núm. 35, marzo - abril de 1998

**Gábor Kiss Köfalusi y Fluvio Mendoza Rosas. "Generación de materias contaminantes en Rellenos Sanitarios de Residuos Sólidos Municipales"**

En la Revista Ingeniería y Ciencias Ambientales

Año 10, Núm. 38, septiembre-octubre 1998.

**Gábor Kiss. "Modelos y Fórmulas para la Descripción del Balance de Agua en Rellenos Sanitarios". En la Revista Ingeniería y Ciencias Ambientales**

Año 10, Núm. 45, noviembre-diciembre 1999.

**García Avilés Alfredo (1977)**

Introducción a la Metodología de la Investigación Científica

México, Plaza y Valdés.

Jaramillo Jorge (1991)

Residuos Sólidos Municipales. Guía para el Diseño, construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales.

Programa de Salud Ambiental. Serie Técnica No. 28

Washington, D. C., OPS, OMS

Juárez Badillo Eulalio y Rico Rodríguez Alfonso (1982)

Mecánica de Suelos Tomo III. Flujo del Agua en Suelos

México, Limusa.

Johnson Division, UOP Inc. (1975)

El agua subterránea y los pozos

Saint Paul, Minesota.

Kostecki Paul T. & Calabrese Eduard J. (1991)

Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater. Analysis Fate Environmental and Public Health Effects Remediation.

Michigan. USA. Lewis Publishers, Inc.

Memorias del VII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C

Oaxaca, Oax. del 19 al 21 de septiembre de 1990.

Linsley Ray K. Jr, Kholer Max A. y Paulhus Joseph L.H. (1977)

Hidrología para ingenieros

México, McGraw-Hill.

L. Mijailov (1985)

Hidrogeología

Moscú, Mir.

México, Comisión Nacional del Agua, 1994

Manual para evaluar recursos hidráulicos subterráneos

Miller G. Tyler. Jr. (1994)

Ecología y Medio Ambiente

Traducción de Dra. Irma de León Rodríguez y Biol. Virgilio González Velázquez.

México. Grupo Editorial Iberoamérica.

Orta Ledesma María Teresa, Monje Ramírez Ignacio y Rojas Valencia Ma. Nefalí. "Manejo de los Lixiviados y el Biogas procedentes de Rellenos Sanitarios en México"

En la Revista Ingeniería y Ciencias Ambientales

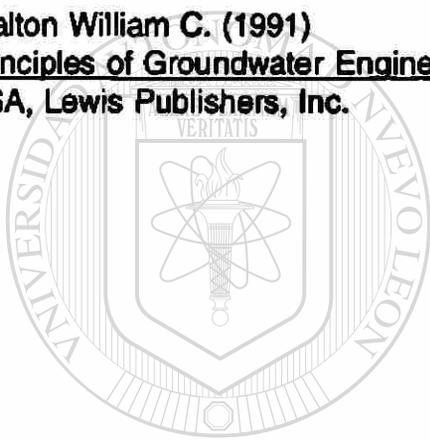
Año 10, Núm. 42, mayo-junio 1999

Rojas Soriano Raul (1994)  
Guía para realizar Investigaciones Sociales  
México, Plaza y Valdés.

Tchobanoglous George, Theisen Hilary, Vigil Samuel (1994)  
Gestión Integral de Residuos Sólidos  
Tomos I y II  
España, McGraw-Hill/Interamericana.

Vega Durán E; Morales y Monrroy R. y Hernández Oviedo E. "Contaminación por lixiviados"  
En la Revista de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos  
Mesa directiva de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos 1993-1994  
México, D.F.  
No.6, abril-junio, 1994

Walton William C. (1991)  
Principles of Groundwater Engineering  
USA, Lewis Publishers, Inc.



UANL

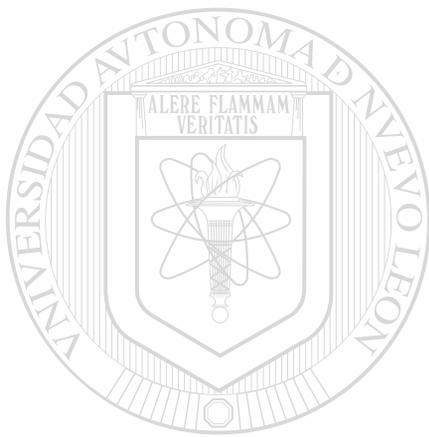
---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## GLOSARIO



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

---

## GLOSARIO

**Absorción.-** Incorporación y fijación de una sustancia en el cuerpo de otra, cuando el fenómeno no se limita tan solo a la superficie.

**Acarreo.-** Es la acción de transportar el material de cobertura desde el lugar donde se encuentra hasta el relleno sanitario.

**Acción microbiana.-** Proceso de degradación de la materia orgánica en los residuos sólidos debido principalmente a bacterias y hongos, los cuales la hidrolizan y oxidan a través de las enzimas.

**Agua Subterránea.-** Es el agua que se encuentra en el subsuelo, en formaciones geológicas parcial o totalmente saturadas.

**Aireación.-** Inclusión de oxígeno de la atmósfera, por medios naturales o mecánicos, para la degradación por vía aerobia de todos aquellos residuos biodegradables.

**Almacenamiento.-** La acción de retener temporalmente los residuos sólidos, en tanto se procesan para su aprovechamiento, se entregan al servicio de recolección, o se disponen.

**Arcilla.-** Suelo de grano fino o la porción de grano fino de un suelo que es plástica (como mastique) y presenta gran resistencia cuando es secado al aire.

**Biodegradable.-** Cualidad que tiene toda la materia de tipo orgánico para ser metabolizada por medios biológicos.

**Biogás.-** Gas, producto de degradación de los sólidos, por acción de organismos anaeróbicos. La mezcla de gases, producto de la descomposición biológica de la fracción orgánica de los residuos sólidos.

**Características Biológicas.-** Contenido de organismos en los residuos sólidos, medido a través de indicadores como: Número Más Probable (N.M.P), cuenta en placa y resultado de ensayos biológicos.

**Características Físicas.-** Propiedades que deriven el estado de la materia que constituye a todo residuo sólido, así como aquellas que no alteran o modifican su naturaleza y composición.

**Características Químicas.-** Propiedades que definen la potencialidad de la materia contenida en todo tipo de residuos sólidos para transformarse, cambiar en energía o alterar su estado.

**Carga Hidráulica.-** Es la energía presente en un acuífero, normalmente tiene dos componentes;

a) la carga relacionada con la elevación con respecto a un punto de referencia que es normalmente el nivel medio del mar, y b) la carga de presión, o presión de poro.

**Caudal o flujo.-** Es aquel en el que cada partícula de agua se mueve en una dirección paralela a la de cualquier otra y en el que la pérdida de carga es proporcional a la primera potencia de la velocidad.

**Celdas.-** Es la conformación geométrica que se le da a los residuos sólidos municipales y al material de cobertura, debidamente compactado mediante equipo mecánico.

**Compactación.-** Es la acción de presionar cualquier material para reducir los vacíos existentes en él.

**Contaminante.-** Todo elemento, materia, sustancia, compuesto, así como toda forma de energía técnica, radiaciones ionizantes, vibraciones o ruido que al incorporarse o actuar en cualquier elemento del medio físico, alteran o modifican su estado y composición o bien, afectan la flora, la fauna o la salud humana. Debe entenderse como medio físico el agua, el aire y el suelo.

**Corte.-** Es la acción de rebajar, por medios mecánicos o manuales, un material (vegetal o para cubierta).

**Cota.-** Es la marca que indica la elevación de un banco de nivel.

**Cuantificación.-** Proceso mediante el cual se determina la composición, en peso, de cada uno de los subproductos contenidos en los residuos sólidos.

**Cubierta intermedia.-** Es el estrato de material natural o sintético con que se cubre una franja o capa de residuos en un relleno sanitario

**Cubierta diaria.-** La capa de material natural o sintético con que se cubren los residuos depositados durante un día de operación.

**Cubierta final.-** El revestimiento de material natural o sintético que confina el total de las capas de que consta un relleno sanitario.

**Degradable.-** Calidad que presentan determinadas sustancias o compuestos para descomponerse gradualmente por medios físicos, químicos o biológicos.

**Densidad.-** Masa o cantidad de un determinado residuo sólido, contenido en una unidad de volumen.

**Disposición.-** La descarga, depósito, inyección, vertido, derrame o colocación de cualquier tipo de residuo en o sobre el suelo o cualquier cuerpo de agua.

**Disposición Final.-** El depósito permanente de los residuos en sitio y condiciones adecuadas para evitar daños a los ecosistemas.

**Ecosistema.-** Unidad básica de interacción de los organismos vivos entre sí y sobre el ambiente, en un espacio determinado.

**Escurrimiento.-** Es el agua pluvial que no se infiltra y no se evapora.

**Fauna nociva.-** Conjunto de especies animales, potencialmente dañina para la salud y la economía que nacen, crecen, se reproducen y se alimentan de los residuos orgánicos que son depositados en tiraderos, basureros y rellenos sanitarios.

**Generación.-** Cantidad de residuos sólidos originados por una determinada fuente en un intervalo de tiempo.

**Gravas.-** Partículas trituradas, semiredondeadas o redondeadas de roca que pasan las cribas 3" y son retenidas por la criba No. 4.

**Infiltración.-** Introducción suave de un líquido entre los poros de un sólido referido al agua, el paso lento de esta a través de los intersticios del suelo y del subsuelo.

**Incineración.-** Proceso de combustión controlada para tratar los residuos sólidos.

**Limos.-** Materia que pasa por la criba standar No. 200, que no es muy plástico o ligeramente plástico, y que tiene muy poca, o ninguna resistencia, cuando se seca al aire.

**Lixiviado.-** Líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción, arrastre o percolación y que contiene, disuelto o en suspensión, compuestos que se encuentran en los mismos residuos.

**Material de cobertura.-** Capa superficial que tiene, entre otras finalidades, controlar infiltraciones y el ingreso y egreso de fauna nociva.

**Monitoreo.-** Conjunto de actividades necesarias para conocer y evaluar la calidad de un determinado elemento del ambiente.

**Nivel freático.-** Es la profundidad en la que se encuentran las aguas freáticas; este nivel baja en tiempo de seca y sube en tiempo de lluvias.

**Pendiente.-** Es la inclinación que tiene un terreno o cualquier elemento tomando, como base, la relación longitud-altura.

**Pendiente hidráulica.-** Es la diferencia de niveles del escurrimiento de agua respecto a un plano horizontal a diferentes distancias.

**Percolación.-** Es el movimiento descendiente de agua a través del perfil del suelo debido a la influencia de la gravedad.

**Perímetro.-** Es la longitud exterior de un cuerpo cerrado.

**Permeabilidad.-** Es la propiedad de una formación geológica que determina el paso del agua a través de ella. La propiedad que tiene una sección unitaria de terreno para permitir el paso de un fluido a través de ella sin deformar su estructura bajo la carga producida por un gradiente hidráulico.

**Porosidad.-** Es el porcentaje de vacíos en el volumen total de una muestra, o bien, el cociente del volumen que puede ser ocupado por agua entre el volumen total.

**Pozo de monitoreo.-** Es aquella excavación hecha expreso, para hacer cualquier tipo de medición (hidráulica, geofísica, geológica, etc.).

**Reciclaje.-** Proceso de transformación de los residuos sólidos para fines productivos.

**Recolección.-** Acción de tomar los residuos sólidos de sus sitios de almacenamiento, para depositarlos en el equipo destinado a conducirlos a las estaciones de transferencia, instalaciones de tratamiento o sitios de disposición final.

**Relleno sanitario.-** Método de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos municipales, los cuales se depositan, se esparcen, compactan al menor volumen práctico posible y se cubren con una capa de tierra, al término de las operaciones del día.

**Residuo.-** Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización o tratamiento, cuya calidad no permite incluirlo nuevamente en el proceso que lo genera.

**Residuo peligroso.-** Se consideran peligrosos aquellos residuos que presenten una o más de las siguientes características: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y/o biológica infecciosas.

**Residuo sólido.-** Cualquier residuo que posea suficiente consistencia para no fluir por sí mismo.

**Residuo sólido municipal.-** Aquellos que se generen en: casas habitación, parques, jardines, vías públicas, oficinas, sitios de reunión, mercados, comercios, bienes muebles, demoliciones, construcciones, instituciones, establecimientos de servicio y en general todos aquellos generados en actividades municipales, que no requieran técnicas especiales para su control, excepto los peligrosos y potencialmente peligrosos de hospitales, clínicas, laboratorios y centros de investigación.

**Reuso.-** Acción de usar residuos sólidos sin previo tratamiento.

**Selección.-** Método por el cual se separan residuos sólidos con base a una clasificación previamente establecida.

**Talud.-** Parámetro inclinado de un dique, terraplén o desmonte. Es la inclinación formada por la acumulación de fragmentos de suelo con un ángulo de reposo del material del terreno de que se trate.

**Terraplén.-** Macizo de tierra con que se rellena un hueco, o que se levanta para hacer una defensa, un camino u otra obra semejante.

**Tratamiento.-** El proceso que sufren los residuos para eliminar su peligrosidad, o hacerlos reutilizables.

**Trincheras.-** Desmonte de un terreno para abrir un camino, con taludes a ambos lados. Zanjas para disponer los residuos sólidos.

**Evapotranspiración.-** Pérdida de humedad por la superficie foliar de los vegetales.

**Zona de aireación.-** La zona que contiene agua bajo presión menor a la de la atmósfera esta delimitada entre al superficie del terreno y el nivel freático.

**Zona de saturación.-** El área que se caracteriza por tener sus poros o fracturas llenas de agua, su límite superior corresponde al nivel freático y su límite inferior es una unidad impermeable.

**Zona no saturada.-** Es el espesor que existe entre la superficie del terreno y el nivel frático. Es equivalente a la profundidad del nivel freático.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN<sup>®</sup>  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## **RESUMEN AUTOBIOGRAFICO**

**Elías Vázquez Godina**

**Candidato para el grado de**

**Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental**

**Tesis: CUANTIFICACION Y EFECTOS DE LA PRODUCCION DE LIXIVIADOS EN EL RELLENO SANITARIO DE SALINAS VICTORIA, NUEVO LEON.**

**Campo de Estudio: Ciencias del Ambiente**

### **Biografía:**

**Datos Personales:** Nacido en Dr. Arroyo, N.L. el 6 de Octubre de 1965, hijo de J.Reyes Vázquez Obregón y Florentina Godina López.

### **Educación:**

**Egresado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León en 1990.**

### **Experiencia profesional:**

**Personal Profesional no Docente en el Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.A.N.L. desde 1990.**

**Departamento de Geotécnia, (1990-1992).**

**Diversos estudios de campo y laboratorio de Estudios Geotécnicos realizados en el Area Metropolitana de Monterrey. Participación en trabajos de perforación de pozos para monitoreo de agua y suelo y determinación de las características físicas y mecánicas del suelo y roca. Participación en el Estudio Geotécnico para la Línea 2 del Sistema de Transporte Colectivo Metro.**

**Departamento de Ingeniería Ambiental desde 1992.**

**Colaboración en diferentes estudios e investigaciones sobre Ecología y Medio Ambiente. Elaboración de Estudios de Impacto Ambiental en diferentes modalidades; preventivo, general y específico; a nivel Estatal y Federal dentro del Estado de Nuevo León y entidades vecinas.**

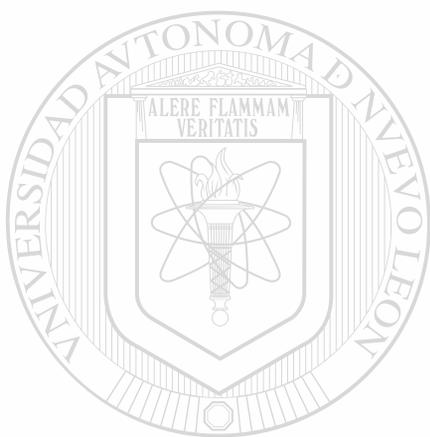
**Maestro por horas en la Facultad de Ingeniería Civil de la U.A.N.L**

**Maestro para la clase de Saneamiento Ambiental. (1995-1996)**

**Maestro para la clase de Ingeniería de Residuos. (febrero-julio del 2001)**

**Maestro por horas en la Facultad de Ciencias Políticas y Administración Pública de la U.A.N.L., desde 1994.**

**Maestro para las clases de: Probabilidad y Estadística, Matemáticas, Ecología y Técnicas de Investigación Social. Participación en la reforma Curricular de la Facultad. Elaboración de programas de estudio de: Matemáticas, Probabilidad y Estadística y Ecología.**



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



