



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

LA RECIRCULACIÓN DE LOS LIXIVIADOS  
Y SUS EFECTOS EN LA COMPACTACIÓN  
DE RELLENOS SANITARIOS

T E S I S  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**  
AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS  
P R E S E N T A:  
**ING. ALEJANDRA MEDINA ARÉVALO**



TUTOR:  
**M. EN C. CONSTANTINO GUTIERREZ P.**

2006

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M. EN I. LANDY IRENE RAMÍREZ BURGOS

Vocal: M. EN C. CONSTANTINO GUTIERREZ PALACIOS

Secretario: M. EN I. FRANCISCA IRENE SOLER ANGUIANO

1<sup>er</sup>. Suplente: DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES

2<sup>do</sup>. Suplente: DRA. TERESA ORTA LEDESMA

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Relleno de Bordo Poniente, Distrito Federal

**TUTOR DE TESIS:**

M. EN C. CONSTANTINO GUTIERREZ P.

---

FIRMA

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México,  
a la Facultad de Ingeniería por la preparación  
que me han continuado brindando.

A mi comité tutorial:

M.C. Constantino Gutiérrez,  
M.I. Landy I. Ramírez,  
M. I. Francis I. Soler,  
Dra. Teresa Orta y  
Dr. Adalberto Noyola  
por sus valiosas aportaciones  
para mejorar este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología,  
a la Dirección General de Estudios de Posgrado  
de la UNAM por el apoyo brindado  
durante la realización de la maestría.

A todos mis profesores de la maestría,  
por que todos sus conocimientos transmitidos. En especial al  
M.C. Constantino Gutiérrez por las oportunidades y confianza.

A la Dra. Rina Aguirre por las enseñanzas transmitidas

Al Ing. Arturo Dávila e Ing. Fernando Villanueva por permitirme  
los tiempos para concluir este trabajo

## DEDICATORIAS

A Teofila y Daniel mis padres, mis alicientes para mejorar, todo esto es por y para ustedes, por cuidarme siempre. Los admiro y quiero mucho.

Con cariño y admiración a mi hermana Elidé, por ayudarme, porque gracias a ti he aprendido a ser mejor persona, hermana y amiga.

A mi abuelita Clara, porque dedicarme tiempo y oraciones

A mi media hermana Rocío, por estar ahí siempre, ser buena prima, buena doctora y sobre todo excelente amiga.

A mis amigas y amigos de toda la vida: Dulce María, Engelberth, Rafael, Ana María, Marisol y mi primo Ismael. Pero en especial a ti Rebeca por darme ese pedacito de ti, Leonardo Iván.

A mis amigos y compañeros de la maestría: Toñito, Juan Pablo, Gilberto, Carlitos, Lucía, Ricardo, Mario, Susana, Jessica, Lilia, Wilson, Liliana, Luis Antonio y Angélica, por que hicieron que esta maestría fuera doblemente provechosa.

A mis amigas y amigos que conocí en esta época: Claudia, Jeremmi, Alejandro, Gabriela, Margarita, Emma, Nora, Edmundo y Salvador.

A los que ya no están aquí y que quise mucho:

Mi abuelito Juan, a G. Noemí y Miguel Ángel

A mi tierra, por ayudarme a ser mejor cada día, por las enseñanzas, por su tiempo, pero sobre todo por sus detalles. Con amor

<b>INDICE</b>	a
<b>SIGLAS Y ABREVIATURAS</b>	c
<b>INDICE DE TABLAS</b>	d
<b>INDICE DE FIGURAS</b>	e
<b>INDICE DE GRÁFICAS</b>	e
<b>INDICE DE FOTOGRAFÍAS</b>	f
<b>RESUMEN</b>	g
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	1
I.1 JUSTIFICACIÓN	3
I.2 HIPÓTESIS	3
I.3 OBJETIVO GENERAL	3
I.4 OBJETIVOS PARTICULARES	3
I.5 ALCANCES	4
I.6 METAS	4
<b>II. ANTECEDENTES</b>	5
II.1 NORMATIVIDAD EXISTENTE EN EL PAÍS E INTERNACIONAL RELATIVA AL SISTEMA DE LIXIVIADOS	8
II.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS	9
II.3 CANTIDAD Y COMPOSICIÓN DE LIXIVIADOS	13
II.4 TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LIXIVIADOS	16
II.5 METODOS PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS	20
<b>III. CALCULOS Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL</b>	24
III.1 METODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA GENERACIÓN DE LIXIVIADOS	24
III.2 CALCULO DE LIXIVIADOS GENERADOS	31
III.3 ADECUACIÓN DE LOS METODOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS A COMPACTACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS	36
III.4 DISEÑO EXPERIMENTAL	37
III.5 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	38

<b>IV. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS</b>	45
IV.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA REPRESENTACIÓN A ESCALA	45
IV.2 EFECTOS DE LA RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS EN LA COMPACTACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS	48
IV.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	49
IV.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	50
<b>V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	53
V.1 CONCLUSIONES	53
V.2 RECOMENDACIONES	54
<b>ANEXOS</b>	
<b>A. VALORES DIARIOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN</b>	56
<b>B. PROCESOS DE TRATAMIENTO PARA LIXIVIADOS</b>	70
<b>C. SELECCIÓN ALEATORIA DEL TRACTOCAMIÓN</b>	73
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS</b>	79

**SIGLAS Y ABREVIATURAS**

AASHO	American Association of State Highway Officials
ASCE	American Society of Civil Engineers
COT	Carbono Orgánico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DF	Distrito Federal
DGSU	Dirección General de Servicios Urbanos
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EPA	Environmental Protection Agency
HELP	Hydrologic Evaluation of Landfill Performance
INE	Instituto Nacional de Ecología
RSM	Residuos Sólidos Municipales
SDT	Sólidos Disueltos Totales
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

**INDICE DE TABLAS**

<b>Capítulo</b>	<b>Tabla No.</b>	<b>Nombre</b>	<b>Página</b>
II	II.1.	<i>Cobertura de disposición adecuada en México</i>	6
	II.2.	<i>Composición de lixiviados en fase acética y metanogénica</i>	14
	II.3.	<i>Composición de lixiviados en relleno sanitario nuevos y maduros</i>	15
III	III.1	<i>Valores Promedio de las Temperaturas en Bordo Poniente</i>	31
	III.2.	<i>Precipitaciones registradas</i>	31
	III.3.	<i>Cálculo de las evapotranspiraciones potenciales ajustadas (ETp)</i>	32
	III.4.	<i>Determinación del potencial de infiltración en mm</i>	33
	III.5.	<i>Determinación del lixiviado</i>	35
	III.6.	<i>Relación Peso / Área</i>	36
	III.7.	<i>Tasa de recirculación de lixiviados en Rellenos Sanitarios</i>	37
	III.8.	<i>Frecuencia de las tasas de recirculación de lixiviados en Rellenos Sanitarios</i>	38
	III.9.	<i>Procedencia del equipo que ingresa a Bordo Poniente</i>	41
IV	IV.1.	<i>Composición de los residuos sólidos en el Bordo Poniente, DF</i>	45
	IV.2.	<i>Valores de compactación en los lisímetros de Bordo Poniente, DF</i>	46
	IV.3.	<i>Valores de compactación en los lisímetros de Bordo Poniente, DF (2ª Parte)</i>	46
	IV.4.	<i>Promedio de compactación en lisímetros de Bordo Poniente, DF</i>	45
	IV.5.	<i>Promedio de asentamiento en lisímetros de Bordo Poniente, DF</i>	48
	IV.6.	<i>Comparación de la composición en los residuos sólidos en Bordo Poniente, DF</i>	51
	IV.7.	<i>Variación de la compactación inicial y final de los residuos sólidos en los lisímetros</i>	52

## **INDICE DE FIGURAS**

<b>Capítulo</b>	<b>Figura No.</b>	<b>Nombre</b>	<b>Página</b>
<i>II</i>	<i>II.1.</i>	<i>Diseño de terrazas inclinadas para la recolección de lixiviados</i>	<i>11</i>
	<i>II.2.</i>	<i>Detalle del diseño de terrazas inclinadas para la recolección de lixiviados</i>	<i>11</i>
	<i>II.3.</i>	<i>Diseño del sistema de fondo con tubos para recolección de lixiviados</i>	<i>12</i>
	<i>II.4.</i>	<i>Detalle del diseño del sistema de fondo con tubos para recolección de lixiviados</i>	<i>12</i>
<i>III</i>	<i>III.1.</i>	<i>Diagrama de calculo del método de Thorntwaite</i>	<i>27</i>
	<i>III.2.</i>	<i>Dimensiones del lisímetro</i>	<i>39</i>
	<i>III.3.</i>	<i>Diagrama del método de cuarteo</i>	<i>43</i>

## **INDICE DE GRÁFICAS**

<b>Capítulo</b>	<b>Gráfica No.</b>	<b>Nombre</b>	<b>Página</b>
<i>IV</i>	<i>IV.1.</i>	<i>Comportamiento de compactación en los lisímetros de Bordo Poniente, DF</i>	<i>47</i>
	<i>IV.2.</i>	<i>Comportamiento del asentamiento en los lisímetros de Bordo Poniente, DF</i>	<i>47</i>
	<i>IV.3.</i>	<i>Variación en los valores de compactación de los lisímetros de Bordo Poniente, DF</i>	<i>52</i>

**INDICE DE FOTOGRAFÍAS**

<b>Capítulo</b>	<b>Fotografía</b>	<b>Nombre</b>	<b>Página</b>
	<b>No.</b>		
<i>III</i>	<i>III.1.</i>	<i>Cárcamo de lixiviados de la planta de tratamiento de Bordo Poniente</i>	<i>40</i>
	<i>III.2.</i>	<i>Distancia entre cárcamo de lixiviados a zona de lisímetros</i>	<i>41</i>
	<i>III.3.</i>	<i>Compactación de los residuos sólidos en lisímetros</i>	<i>44</i>

## RESUMEN

El lixiviado (producto de la descomposición de los residuos sólidos urbanos y del arrastre de las aguas) es uno de los principales problemas que se tiene en la operación de los rellenos sanitarios, el problema se agrava ante la falta de manejo adecuado del relleno y en consecuencia hacia los productos derivados de él, tales como el biogás y lixiviado. Las características de los lixiviados hacen todavía más especial su manejo (la variabilidad en su composición y cantidad a lo largo de un periodo).

En el país, la normatividad a seguir referente al tema de lixiviados es la **NOM-083-SEMARNAT-2003**, la cual establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, basándose en las características geológicas, climatológicas, así como las especificaciones de protección para el diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias. Internacionalmente la normatividad se da principalmente a través de la Environmental Protection Agency (EPA).

Inicialmente uno de los problemas sobre los lixiviados era la cuantificación de este producto, actualmente a nivel mundial se cuentan con diversos métodos para cuantificar entre los que destacan: método de balance de agua, evaluación hidrológica de la evolución de un relleno sanitario y el balance hídrico desarrollado por C. W. Thornthwaite.

En este trabajo, se aplicó una de las técnicas más recientes para reducir el impacto ocasionado por el manejo inadecuado de los lixiviados, tal como se menciona dentro los capítulos; "la recirculación de lixiviados" permite que los lixiviados mejoren su calidad. Las tasas de recirculación de utilizadas fueron 0, 10, 50 y 100%, de acuerdo la operación de los rellenos sanitarios en el país.

Los valores de compactación fueron mayores en los lisímetros con tasa de recirculación (10 y 50% de recirculación) en comparación con los valores presentados en el lisímetro sin recirculación. El lisímetro con porcentaje de recirculación del 100% presentó valores de compactación similares a los presentados en el lisímetro sin recirculación.

## I. INTRODUCCIÓN

Un relleno sanitario (ASCE, 2004) es la técnica para la disposición de los residuos sólidos en el suelo sin causar perjuicios al medio ambiente, sin causar molestias o peligro para la salud y seguridad pública; este método utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos sólidos en la menor área posible, reduciendo su volumen al mínimo y cubriendo los residuos depositados con una capa de tierra con la frecuencia necesaria o por lo menos al final de cada jornada. El objetivo de esta obra, es disponer los residuos sólidos en forma definitiva, eficiente y sin afectar al ambiente.

Dentro del relleno sanitario se tienen pérdidas de masa y variaciones en sus características debido a la descomposición de los residuos y a esfuerzos mecánicos, dando lugar a asentamientos que pueden prolongarse por muchos años (Espinace et al, 1996).

Los lineamientos con que se construye el relleno sanitario son regulados por la normatividad de cada país. En nuestro país, la dependencia encargada de realizar dicho control es el Instituto Nacional de Ecología, mediante las normas NOM-SEMARNAT-083-2003 en forma oficial y como guía de carácter técnico a través de la PROY-NOM-ECOL-084-1994.

Los fenómenos de degradación que afectan a la materia orgánica de los residuos sólidos, producen una pérdida de masa que se manifiesta con la generación de biogás y lixiviados, que son los principales problemas que deben enfrentarse durante la operación de un relleno sanitario. Estos se acentúan ante la falta de un manejo adecuado y que resulte económico, en lo particular cuando se refiera a los lixiviados, ya que sus características (variada composición y cantidad) hacen complicado su manejo y en particular su tratamiento, para definir las dimensiones requeridas de las unidades.

De las técnicas más recientes para reducir el impacto ambiental ocasionado por los lixiviados, destaca la recirculación de los mismos al relleno. Estudios realizados en países como Estados Unidos, han indicado que la recirculación de los lixiviados en un relleno sanitario, permite que los mismos mejoren en su calidad (determinada a través de análisis físicos-químicos y

bacteriológicos), lo que asegura un óptimo tratamiento de los mismos, evitando el riesgo de contaminación en el agua superficial entre otras cosas. (Chugh, et.al, 1997)

La calidad del lixiviado se puede medir a través de distintos parámetros como DQO (Demanda Química de Oxígeno) y DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), tomando en cuenta otros parámetros como pH, alcalinidad, acidez, temperatura, etc. Por otro lado la generación de gases (principalmente metano) y el grado de asentamiento de un relleno sanitario, son fenómenos que se pueden utilizar para comparar el comportamiento entre un relleno sanitario con recirculación de lixiviados y otro sin recirculación.

En Latinoamérica se están efectuando estudios en laboratorios (Hernández, 2001) para determinar las ventajas de la recirculación de lixiviados en rellenos sanitarios a escala (México y Chile). Este tipo de investigación permitirá que se optimicen los sistemas de recolección de lixiviados en rellenos sanitarios futuros y que se alargue la vida útil de los mismos, al igual se busca minimizar los riesgos de contaminación causados por los lixiviados.

De los efectos ocasionados por la recirculación de lixiviados, el que menor estudio ha tenido es la medición o cuantificación de la compactación y asentamientos de los residuos sólidos, mientras que gran avance ha tenido el estudio referente a la generación de biogás, debido principalmente a los beneficios económicos que puede aportar, al aumentar la degradación biológica de la materia orgánica del relleno, lo cual es notable cuando el contenido de humedad se encuentra entre el 50 y 70% (Palma, et. al, 1999).

La recirculación de lixiviados es una opción muy apropiada para rellenos sanitarios ubicados en zonas de pluviometría baja, mientras que en las zonas lluviosas se reserva para determinadas épocas del año, siempre y cuando el balance hidrológico, no implique generación de exceso de agua. Los mejores resultados se logran cuando el pH se mantiene en 7, ya que la variación del mismo origina una caída en la actividad microbiana. La porosidad, la estructura y densidad del relleno sanitario son importantes para asegurar una distribución uniforme del lixiviado recirculado y evitar lo mayor posible la formación de canales a través del relleno.

## **I.1. JUSTIFICACION**

Hasta la fecha en nuestro país, de acuerdo al Instituto Nacional de Ecología (INE, 2004) los sitios de disposición final de los residuos sólidos municipales no cuentan con métodos científicos para obtener el porcentaje a recircular de los lixiviados; este proceso se realiza con base a la experiencia de los operadores de los rellenos. Además, se cuenta con escasos estudios que permitan definir si la recirculación de lixiviados afecta la operación de los rellenos sanitarios y todavía es menor la cantidad de experimentos relacionados con los valores logrados en la compactación con rellenos con recirculación de lixiviados.

La recirculación de lixiviados permite incrementar el tiempo de vida útil de los rellenos sanitarios. Por tal razón y ante la falta de espacios destinados a la disposición final, se requiere del estudio de la recirculación de lixiviados dentro de la operación de un relleno sanitario.

## **I.2. HIPÓTESIS**

La recirculación de lixiviados en los rellenos sanitarios incrementa los valores de la compactación de las celdas construidas, lo cual será realizado en un modelo a escala.

## **I.3. OBJETIVO GENERAL**

Identificar los efectos en la compactación de los residuos sólidos en los rellenos sanitarios, causados por la recirculación de lixiviados.

## **I.4. OBJETIVOS PARTICULARES**

- Recopilar información y estudios sobre la recirculación de lixiviados a nivel nacional e internacional.
- Determinar la generación de lixiviados para el relleno sanitario de Bordo Poniente.

- Mediante una prueba piloto, obtener los valores de la compactación en rellenos con y sin recirculación de lixiviados
- Presentar las ventajas y desventajas de la recirculación de lixiviados.

### **I.5. ALCANCES**

- Observar del funcionamiento de los rellenos sanitarios y su relación con la generación de lixiviados, mediante una prueba piloto.
- Determinar la generación de lixiviados en el relleno sanitario de Bordo Poniente mediante uno de los métodos de balance hídrico.
- Construir y operar un modelo físico (lisímetro) para obtener las diferencias de los valores de compactación, entre los procesos con recirculación de lixiviados y sin ella.
- Adecuar un método de compactación de suelos, para determinar la compactación de residuos sólidos en celdas.

### **1.6. METAS**

- Resaltar los efectos en la compactación de los residuos sólidos, mediante la recirculación de lixiviados.

## II. ANTECEDENTES

La gestión de los residuos sólidos municipales (RSM) -entendida como generación, recolección, tratamiento, reuso, reciclaje y disposición final -, tiene como principal objetivo proteger tanto a la salud pública como al ambiente y como objetivos complementarios disminuir los costos de dichos servicios, así como alargar lo más posible la vida útil de los sitios de disposición final y reducir la utilización de recursos naturales para el procesamiento de nuevos materiales o productos.

La inadecuada disposición final de los residuos sólidos municipales es, a pesar del avance tecnológico en el mundo, uno de los problemas más comunes en el país. En la actualidad se generan grandes cantidades de estos residuos, superiores a los que pueden ser manejados y administrados adecuadamente por los municipios del país (SSA, 2002). Esta situación empeorará, a menos que se tomen medidas inmediatas para reducir las tasas de generación de los RSM, disminuir los volúmenes que ingresan a los sitios de disposición final (mediante programas de reuso y reciclaje) y disponer de manera eficiente los residuos.

Actualmente en nuestro país y en Latinoamérica, para la disposición final adecuada de los RSM se utiliza en el mejor de los casos el relleno controlado en lugar del relleno sanitario. La disposición final de casi el 46 por ciento de los RSM generados en el país, se lleva a cabo mediante tiraderos a cielo abierto, métodos que no cumplen con los requisitos técnicos para lograr una adecuada disposición de los RSM y el 54.1 por ciento en rellenos sanitarios o rellenos controlados en los cuáles se disponen de manera adecuada (IVEX, 2003). Tal como se muestra en la tabla II.1.

Con excepción de algunos rellenos sanitarios, en la mayoría de los sitios de disposición final existe la separación de los materiales reciclables, esta separación se lleva a cabo por medio de grupos de pepenadores, los cuales realizan su trabajo en condiciones insalubres y desatendiendo leyes laborales que rigen en el país.

En la mayoría de los sitios de disposición final se cuenta con maquinaria pesada para llevar a cabo las actividades de empuje y compactación de los RSM y en ocasiones para realizar la

cobertura de los mismos, esta maquinaria a veces es propiedad de las autoridades municipales y en otras es rentada.

*Tabla II.1. Cobertura de disposición adecuada en México*

<b><i>Tipo de localidad</i></b>	<b><i>Cobertura de Disposición adecuada %</i></b>
<i>Zonas metropolitanas</i>	<i>85</i>
<i>Ciudades con mediano desarrollo</i>	<i>43</i>
<i>Áreas urbanas pequeñas</i>	<i>6</i>
<i>Semirurales y rurales</i>	<i>1</i>
<i>Total del País</i>	<i>53</i>

Fuente: Adaptado de IVEX, 2003

Es notable la falta de control en los sitios de disposición final. Con excepción de los rellenos sanitarios, los demás sitios de disposición final presentan condiciones de peligro para la salud y el ambiente, riesgo generado principalmente por la falta de cobertura, la producción incontrolada de biogás y lixiviado y en algunos casos por la presencia de animales.

Los sitios sin control representan riesgos importantes por contaminación del suelo en el que se depositan los RSM, inutilizándolo para cualquier fin productivo, por diversas causas; la contaminación de acuíferos subyacentes a los sitios debido a la migración del lixiviado que se forma por el paso del agua de lluvia y por el agua resultante de los procesos de degradación microbiana de los RSM, así como por la contaminación del aire con los gases que se desprenden o por el acarreo de partículas por el viento y las actividades que la maquinaria lleva a cabo en dichos sitios. A lo anterior se suma el deterioro de la imagen urbana, las molestias sanitarias, los riesgos inherentes al desarrollo de la fauna nociva, el ruido y la problemática social que está involucrada en las actividades de pepena de los materiales susceptibles de ser comercializados.

Existe una gran cantidad de tiraderos clandestinos en todo el país, estos sitios son creados en la mayoría de las veces por dos fuentes: por recolectores privados de RSM o de cascajo y por las poblaciones de zonas donde la recolección es deficiente, por lo consiguiente los RSM son depositados en barrancas o lotes baldíos.

En los últimos años se han impulsado acciones para mejorar la disposición de los RSM. Por ejemplo, en ciudades del país con crecimiento medio; la disposición final mediante el uso de rellenos sanitarios se ha incrementado en los últimos 8 años aproximadamente en un 20% (INE, 2002). La normatividad vigente (NOM-083-SEMARNAT-2003), busca impulsar la utilización de predios con vocación natural y establece las condiciones que deben reunir los sitios, el plazo fijado de su entrada en vigor. Sin embargo hasta la fecha, el manejo adecuado de los residuos sólidos y en particular, el establecimiento de los sitios de disposición final no se ha podido establecer como punto prioritario por parte de Servicios Públicos Municipales.

Los costos de operación de un relleno sanitario tienen una amplia variación dependiendo de diversos factores: el volumen de RSM a disponer, el origen de los recursos empleados para la construcción del relleno y el nivel de responsabilidad asignado a quien lo opera, entre otros. Quizás el más significativo de estos factores sea el volumen de RSM a disponer ya que los costos de operación e inversión aplican economías de escala, por lo que las autoridades estatales y federales han puesto mucho énfasis en la construcción de rellenos sanitarios regionales, cuando las distancias entre los diferentes centros de población lo permiten. Los costos de operación de un relleno sanitario en México representan aproximadamente el 18% del costo total del proceso (INE, 2002).

En localidades rurales y semiurbanas de menos de 20,000 habitantes, se han construido rellenos sanitarios de operación manual como es el caso de la Sierra Gorda de Querétaro. Este tipo de obras se debe complementar con acciones de capacitación y educación ambiental a la población así como de estrategias de reducción en la fuente, reuso y reutilización. Es necesario fomentar este tipo de rellenos y estrategias que permitan un aprovechamiento adecuado del sitio, debido a que la mayoría de los municipios del país se encuentran en este rango de población.

Dentro de la operación del relleno sanitario, uno de los procedimientos que requiere mayor cuidado para la compactación de los residuos sólidos, es la selección del material de cubierta, el cual puede ser de origen natural o sintético (NOM-083-SEMARNAT-2003). Este material tiene como objeto cubrir los residuos sólidos con el fin de controlar el ingreso de diversos organismos, así como controlar la humedad de los estratos de residuos, el movimiento de gas producido por la degradación de la materia orgánica, la propagación de incendios, la dispersión de residuos y también proporcionar al sitio una apariencia adecuada.

Los productos de la descomposición de los residuos sólidos que mayor importancia y relevancia tienen para este tipo de obras son: generación de lixiviados y biogás, principalmente por los contaminantes que llevan inmersos los cuales pueden dispersarse (biogás) y afectar la salud de la población o infiltrarse (lixiviados) al suelo hasta llegar a los mantos acuíferos.

El tratamiento de lixiviado es muy difícil debido a que la cantidad y calidad del mismo es muy variable, dependiendo del tiempo que tiene en operación el relleno sanitario. El más innovador y con alta proyección a utilizarse como método de tratamiento es regresar el lixiviado al relleno (Sponza D. T. y Nuri Un Da O, 2003), con el cual se logran algunas ventajas del funcionamiento del relleno sanitario: mejoran la calidad del lixiviado, reducen los costos por conceptos de operación de tratamiento, acortan el tiempo requerido para la estabilización (Reinhart y Al-Yousfi, 1996), entre otras.

En lo que se refiere al biogás, una de las tecnologías que mayor auge tiene es el aprovechamiento para producción de energía: calor y luz (electricidad) (INTI, 2005).

## **II.1. NORMATIVIDAD EXISTENTE EN EL PAÍS E INTERNACIONAL RELATIVA AL SISTEMA DE LIXIVIADOS**

Las Normas Oficiales Mexicanas que existen relacionadas con el sistema de lixiviados se reducen a una sola: la **NOM-083-SEMARNAT-2003**, la cual establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, basándose en las características geológicas, climatológicas, así como las especificaciones de protección para el diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias.

Los sitios de disposición final de residuos sólidos municipales generan lixiviados que contienen diversos grupos de contaminantes que afectan a los recursos naturales, la creación de esta norma esta destinada a proteger al ambiente, preservar el equilibrio ecológico y minimizar los efectos contaminantes.

Dicha norma es de observancia obligatoria para aquellos que tienen la responsabilidad de la disposición final de los residuos sólidos municipales, en ésta se especifican los procedimientos para llevar a cabo los estudios.

La **NOM-083-SEMARNAT-2003** especifica que los rellenos sanitarios mayores a una capacidad de 50 toneladas/día o con atención igual o mayor a 50,000 habitantes (tipo B y A) deben incluir estudios de generación de lixiviados y biogás previos a la construcción del relleno sanitario, mediante algún balance hídrico y estequiométrico, respectivamente. Contar con una barrera impermeable (natural o artificial) con un coeficiente de conductividad hidráulico de  $1 \times 10^{-7}$  cm/seg como mínimo para evitar las infiltraciones de lixiviado hacia el subsuelo, esta característica constructiva y operativa aplica para todos los tipos de rellenos sanitarios (A, B, C y D). Así como el establecimiento del sistema para el manejo de biogás: extracción, captación, conducción y control.

En lo que se refiere a nivel internacional, la Environmental Protection Agency (EPA) especifica que el relleno con enfoque híbrido debe contar con un "sistema compuesto de impermeabilización" con drenaje de lixiviados en el fondo y un sistema sencillo en la cubierta final. Estos sistemas son mucho menos rígidos y más económicos que los requeridos en los rellenos de seguridad. En caso de que un relleno de residuos sólidos municipales se localice en una "zona de impacto sísmico", se regula que las estructuras incluyendo las membranas, taludes, y sistemas de control de aguas superficiales y de lixiviados, deberán estar diseñadas para resistir la aceleración horizontal sísmica local.

De acuerdo a la EPA, la recirculación de lixiviados sólo se permitirá cuando los rellenos estén provistos de un sistema compuesto de impermeabilización (capa de suelo de  $k = 1 \times 10^{-7}$  cm/seg con espesor mínimo de 60 cm y sobre ella, una membrana sintética que resista cargas hidráulicas de hasta 30 cm. de altura) y de un sistema de drenaje de lixiviados (Zepeda, 1993).

## II.2. DISEÑO DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS

En el relleno sanitario se tienen dos procedencias de agua:

- La contenida en los residuos cuando se confinan

- La proveniente de las lluvias, aguas superficiales o subterráneas.

En la descomposición de la basura intervienen procesos físicos, químicos y biológicos; la calidad de los lixiviados está en función de estos procesos. Bajo condiciones conocidas de agua y temperatura, se pueden obtener datos acerca de la generación de lixiviados. La cantidad de éstos también se puede inferir realizando un balance de masa: según la generación de biogás. En este caso son relevantes dos conceptos: cantidad y calidad.

La recolección de lixiviados implica:

1. la selección del sistema que se va a utilizar (depende de la geología local y de los requisitos ambientales de la zona del relleno),
2. el desarrollo de un programa que incluya la puesta en obra de los canales para el drenaje y para la recolección del lixiviado,
3. el trazado y diseño de instalaciones para canalizar, recoger y almacenar el lixiviado.

### **II.2.1. Diseño de instalaciones para la recolección de lixiviados**

Anteriormente la forma de realizar la captación y conducción de lixiviados era mediante el método de terrazas inclinadas y fondo con tubos, los cuales utilizaban tradicionalmente a los materiales naturales, principalmente grava (Tchobanoglous et. al, 1982). Sin embargo, estos materiales ocupan un gran espacio y necesitan protección adicional para la capa impermeable. Además, pueden resultar costosos sobre todo cuando la grava de la calidad requerida no existe en el sitio y debe ser transportada desde largas distancias.

**Terrazas inclinadas.** Para evitar la acumulación de lixiviados en el fondo de un relleno, la zona del fondo se forma una serie de terrazas inclinadas. Tal como se muestra en las figuras II.1. y II.2., las terrazas estarán conectadas hasta los canales de recolección de lixiviados, los cuales pueden ser de tubería perforada colocada en cada canal para transportar el lixiviado hasta una zona de tratamiento o recirculación del relleno.

La pendiente transversal de las terrazas es del 1 al 5% y la pendiente de los canales de drenaje es del 0.5 al 1% (Tchobanoglous et. al, 1982). La capacidad de flujo de las instalaciones se estima utilizando la ecuación de Manning (Sotelo, 2000):

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \qquad R_h = \frac{A}{P}$$

Donde:

- V = Velocidad media en la sección, en m/seg.
- n = Coeficiente de rugosidad del material de la sección, adimensional
- s = Pendiente del canal o tubería en milésimas
- R<sub>h</sub> = Radio hidráulico, en m
- A = Área de la sección, en m<sup>2</sup>
- P = Perímetro mojado en m

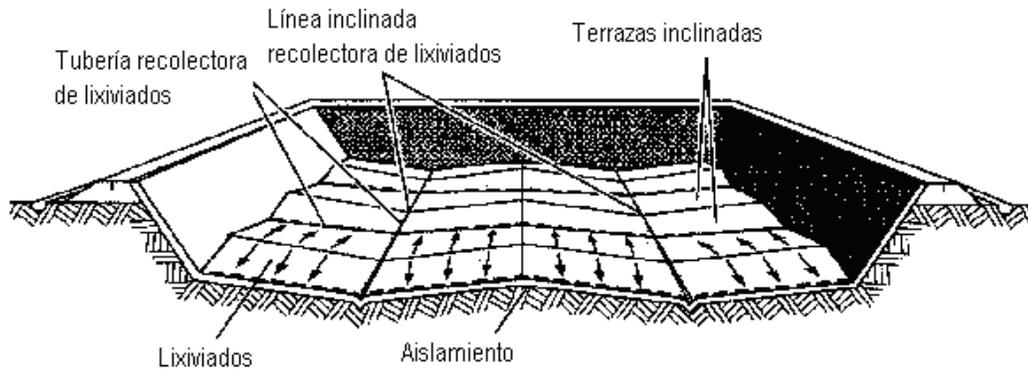


Figura II.1. Diseño de terrazas inclinadas para recolección de lixiviados

Fuente: Adaptado de Tchobanoglous et. al, 1982

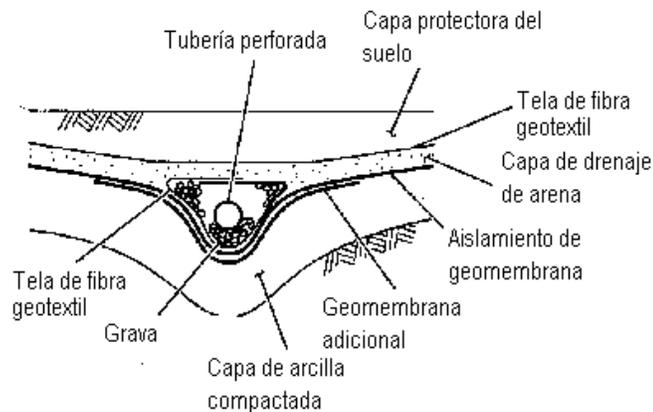


Figura II.2. Detalle del diseño de terrazas inclinadas para recolección de lixiviados

Fuente: Adaptado de Tchobanoglous et. al, 1982

**Fondo con tubos.** La zona del fondo se divide en una serie de tiras rectangulares con barreras de arcilla colocadas a distancias apropiadas (figuras II.3. y II.4.). La tubería se coloca encima de la geomembrana. Los tubos para la recolección del lixiviado son como mínimo de 10 cm de diámetro y tienen perforaciones (similares a una coladera), sobre la mitad de la circunferencia. Los cortes están espaciados en 0.6 cm y el tamaño del corte es 0.00025 cm, que corresponde el tamaño más pequeño de la arena. Para proporcionar un drenaje efectivo, se inclina el fondo desde 1.2 hasta 1.8%. Los tubos se colocan a cada 6 m, posteriormente son cubiertos con una capa de arena de 60 cm. La primera capa de residuos sólidos, se coloca directamente encima de la capa de arena y no se compacta.

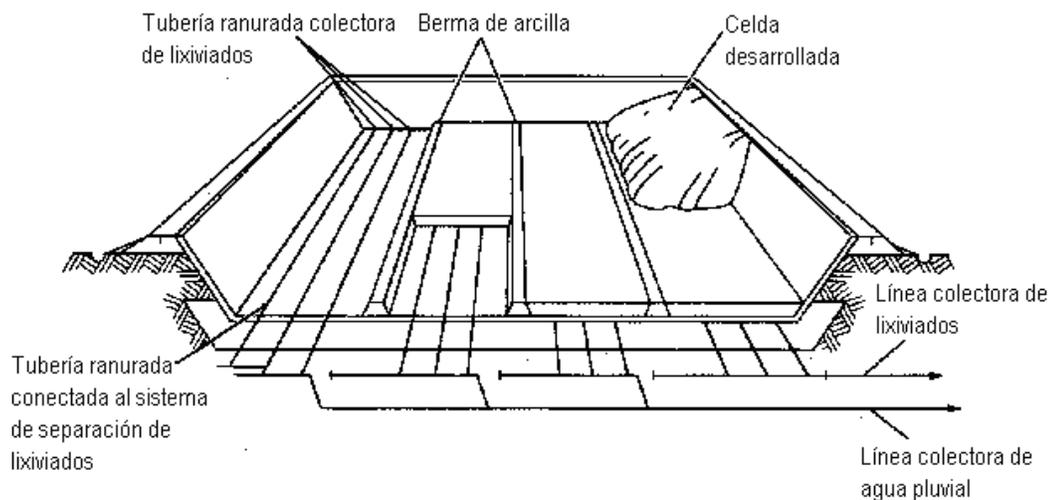


Figura II.3. Diseño de fondo con tubos para recolección de lixiviados

Fuente: Adaptado de Tchobanoglous et. al, 1982

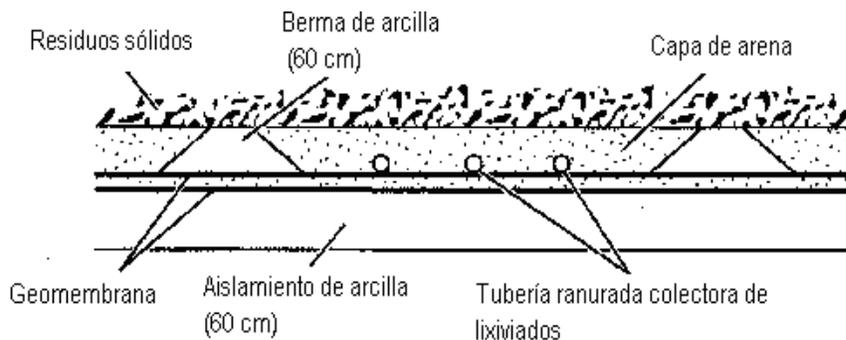


Figura II.4. Detalle del diseño de fondo con tubos para recolección de lixiviados

Fuente: Adaptado de Tchobanoglous et. al, 1982

## **II.3. CANTIDAD Y COMPOSICIÓN DE LIXIVIADOS**

### **II.3. 1. Cantidad de lixiviados**

La cantidad de lixiviado, así como su calidad, producida en un lugar específico depende principalmente de las características climáticas de la zona (temperatura, humedad, y precipitación) y de las cantidades de residuos sólidos descargados en el relleno sanitario, así como de la edad del relleno sanitario.

De acuerdo a estudios realizados (BFI, 2003) se estima que la producción de lixiviados que afloran del relleno sanitario inicia entre los años 1 y 2, presentándose el valor máximo en un periodo del año 15 a 20.

### **II.3. 2. Composición de lixiviados**

La calidad de lixiviados esta influenciada por los procesos biológicos, químicos y físicos que ocurren dentro del relleno sanitario. Generalmente como parámetros indicadores se considera la relación  $DBO_5$  y DQO, mismos que varían dentro de la fase acética y metanogénica de un relleno sanitario.

La fase acética esta caracterizada por alto contenido de orgánicos con relaciones de  $DBO_5/DQO$  mayores a 0.4 y bajo pH, así como el contenido de metano. Mientras que en la fase metanogénica el contenido de metano y pH son altos, pero la relación  $DBO_5/DQO$  es baja. Tal como se puede apreciar en la tabla II.2., donde se muestran los parámetros de 15 rellenos sanitarios del mundo (Cossu et al, 1989).

Como puede observarse en la tabla II.2, existen notables diferencias. La relación  $DBO_5/DQO$  con un valor de 0.58 en la fase acética indica buena biodegradación (valores cercanos a 0.4), mientras que en la fase metanogénica por el bajo valor presentado en la relación se indica una baja biodegradación.

Tabla II.2. Composición de lixiviados en fase acética y metanogénica

<b>Parámetros</b>	<b>Promedio</b>	<b>Rango</b>
<b>Fase acética</b>		
<i>pH</i>	6.1	4.5 – 7.5
<i>DBO<sub>5</sub></i>	13,000	4,000 – 40,000
<i>DQO</i>	22,000	6,000 – 60,000
<i>DBO<sub>5</sub>/DQO</i>	0.58	-
<i>SO<sub>4</sub></i>	500	70 – 1,750
<i>Ca</i>	1,200	10 – 2,500
<i>Mg</i>	470	50 – 1,150
<i>Fe</i>	780	20 – 2,100
<i>Mn</i>	25	0.3 – 65
<i>Zn</i>	5	0.1 – 120
<i>Sr</i>	7	0.5 – 15
<b>Fase metanogénica</b>		
<i>pH</i>	8	7.5 – 9
<i>DBO<sub>5</sub></i>	180	20 – 550
<i>DQO</i>	3,000	500 – 4,500
<i>DBO<sub>5</sub>/DQO</i>	0.06	-
<i>SO<sub>4</sub></i>	80	10 – 420
<i>Ca</i>	60	20 – 600
<i>Mg</i>	180	40 – 350
<i>Fe</i>	15	3 – 280
<i>Mn</i>	0.7	0.03 – 45
<i>Zn</i>	0.6	0.03 – 4
<i>Sr</i>	1	0.3 – 7

Valores en mg/l

Fuente: Cossu et al, 1989

En ambas fases los parámetros son influenciados por las condiciones microbiológicas, así en la fase metanogénica el valor de sulfato es el más influenciado, en cambio en la fase acética, el

alto contenido de ácidos orgánicos es resultado del decremento de los valores del pH con el incremento de la solubilidad de algunas sustancias inorgánicas.

Otro comparativo para la composición de lixiviados es la edad del relleno sanitario, estableciendo como relleno nuevo o recientemente construido, con un tiempo de operación hasta de 2 años y un relleno maduro el que tiene un tiempo de operación mayor a 10 años. En la siguiente tabla se observan los valores de los parámetros en ambos casos.

*Tabla II.3. Composición de lixiviados en relleno sanitario nuevos y maduros*

<b>Parámetros</b>	<b>Relleno Sanitario nuevo</b>		<b>Relleno sanitario maduro</b>
	<b>Rango</b>	<b>Promedio</b>	
<i>DBO<sub>5</sub></i>	<i>2,000 – 30,000</i>	<i>10,000</i>	<i>100 – 2,000</i>
<i>DQO</i>	<i>3,000 – 60,000</i>	<i>18,000</i>	<i>100 – 2,500</i>
<i>COT</i>	<i>1,500 – 20,000</i>	<i>6,000</i>	<i>80 – 1,500</i>
<i>Sólidos Totales</i>	<i>200 – 2,000</i>	<i>500</i>	<i>100 – 400</i>
<i>Suspendidos</i>			
<i>Nitrógeno Orgánico</i>	<i>10 – 800</i>	<i>200</i>	<i>80 – 120</i>
<i>Nitrógeno Amoniacal</i>	<i>10 - 800</i>	<i>200</i>	<i>20 – 400</i>
<i>Nitrato</i>	<i>5 – 40</i>	<i>25</i>	<i>5 – 10</i>
<i>Total Fósforo</i>	<i>5- 100</i>	<i>30</i>	<i>5 – 10</i>
<i>Ortofosfato</i>	<i>4 – 80</i>	<i>20</i>	<i>4 – 8</i>
<i>Alcalinidad como CaCO<sub>3</sub></i>	<i>1,000 – 10,000</i>	<i>3,000</i>	<i>200 – 1,000</i>
<i>pH</i>	<i>4.5 – 7.5</i>	<i>6</i>	<i>6.6 – 7.5</i>
<i>Dureza total como CaCO<sub>3</sub></i>	<i>300 – 10,000</i>	<i>3,500</i>	<i>200 – 500</i>
<i>Calcio</i>	<i>200 – 3,000</i>	<i>1,000</i>	<i>100 – 400</i>
<i>Magnesio</i>	<i>50 – 1,500</i>	<i>250</i>	<i>50 – 200</i>
<i>Potasio</i>	<i>200 – 1,000</i>	<i>300</i>	<i>50 – 400</i>
<i>Sodio</i>	<i>200 – 2,500</i>	<i>500</i>	<i>100 – 200</i>
<i>Cloro</i>	<i>200 – 3,000</i>	<i>500</i>	<i>100 – 400</i>
<i>SO<sub>4</sub></i>	<i>50 – 1,000</i>	<i>300</i>	<i>20 – 50</i>
<i>Hierro Total</i>	<i>50 – 1,200</i>	<i>60</i>	<i>20 – 200</i>

Valores en mg/l

Fuente: Adaptado de Tchobanoglous et. al, 1982 y D. Reinhart and A.B. Al-Yousfi, 1996.

Con las tablas anteriores se demuestra que la composición de los lixiviados varía mucho según la antigüedad del relleno sanitario. Así la biodegradabilidad del lixiviado varía también con el tiempo, los cuales se ven reflejados en la relación  $DBO_5/DQO$ . En un relleno nuevo la relación estará en un rango de 0.5 o más, el indicador de que la materia orgánica en los lixiviados es fácilmente biodegradable (0.4 a 0.6), en cambio en los rellenos antiguos la relación se encuentra en un rango de 0.05 a 0.2, indicativo de que los lixiviados contienen ácidos húmicos y fúlvicos, que no son fáciles de biodegradar.

De acuerdo a la experiencia en estudios de rellenos sanitarios, la composición de los lixiviados es afectada por diversos efectos de operación del mismo, tales como:

- Adición de agua
- Recirculación de lixiviados
- Agregación de lodos de aguas residuales
- Adición de limo
- Alto contenido de residuos orgánicos
- No realizar compactación
- Espesor de la capa de residuos

#### **II.4. TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LIXIVIADOS**

Dadas las condiciones de cantidad y composición de lixiviados es complicado establecer un proceso adecuado para su tratamiento, actualmente se utilizan los tratamientos biológicos aerobios, tales como: lagunas aireadas, plantas lodos activados, discos biológicos, filtros rociadores, lagunas facultativas y lagunas aerobias; tratamientos anaerobios, entre los que se encuentran: lagunas y digestores anaerobios y filtros anaerobios, y tratamientos fisicoquímicos: floculación-coagulación, precipitación, osmosis inversa, vaporización y adsorción. Cada uno de estos, con algunas limitantes tal como se puede apreciar en la breve descripción que a continuación se da y que en forma detallada se explica en el Anexo B, donde adicionalmente se presenta algunos casos de aplicación.

#### II.4.1. Tratamientos biológicos aerobios

**Lagunas Aireadas.** Por su simplicidad en la operación y facilidad de recircular el lodo, las lagunas aireadas son un método favorable para el tratamiento de lixiviados. Valores muy altos de remoción de  $\text{DBO}_5$  y DQO pueden obtenerse, sobre todo cuando la relación de  $\text{DBO}_5/\text{DQO}$  es mayor a 0.4. Las posibles limitantes son las bajas temperaturas en invierno y los requerimientos de espacios. Se puede utilizar aireadores superficiales y la excavación dentro del relleno sanitario con impermeabilización son el método más simple para la construcción de la laguna. (Cossu et al, 1989a)

**Plantas Lodos Activados.** Este tratamiento, puede obtener buenos resultados, y resulta menos apropiado que el anterior, porque requiere de habilidad en la operación y de un grado de control en el equipo que no es usual en los rellenos sanitarios. (Cossu et al, 1989a)

**Discos Biológicos.** Estos pueden ser considerados para reducir el contenido de nitrógeno amoniacal de los lixiviados de edad. El equipo requiere muy poco mantenimiento, la instalación resulta simple y usa muy poca energía para su operación. (Cossu et al, 1989a)

**Filtros Rociadores.** El uso de filtros rociadores no es muy apropiado en el tratamiento de lixiviados porque existe una alta posibilidad de que el medio del filtro sea tapado por depósitos inorgánicos. (Cossu et al, 1989a)

#### II.4.2. Tratamientos Anaerobios

**Lagunas Anaerobias.** Este tratamiento es sumamente empleado en los países donde la temperatura y el clima prevalecen constantes. No es un método de tratamiento completo pero puede ser usado para almacenamiento, balanceo y como pretratamiento. (Cossu et al, 1989a)

**Digestores Anaerobios.** Actualmente es de los tratamientos más estudiados y provee eficientes remociones de cargas orgánicas y metales pesados. Las limitantes de los tratamientos

son los costos de las plantas si se requieren de altas eficiencias de remoción. (Cossu et al, 1989a)

**Filtros Anaerobios.** El descubrimiento de los reactores anaerobios de lecho de lodos y flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés) para el tratamiento de lixiviados es prometedor por las altas eficiencias en bajos tiempos de retención; cabe mencionar que este tratamiento es todavía investigado en muchos aspectos. (Cossu et al, 1989a)

#### II.4.3. Tratamientos Físicoquímicos

**Floculación-coagulación.** Es recomendable para tratar lixiviados estabilizados (Qasim RS et al, 1994 Amokrane et al, 1997). Si este tratamiento se aplica en la fase metanogénica reduce las concentraciones de DQO y AOx (Adsorbable Organic Halogens) aunque sin llegar a los valores requeridos (Hans Jurgen –Ehrig, 1989).

**Oxidación.** En lixiviados de relleno sanitario, la oxidación con ozono se ha estudiado bajo esquemas diferentes: como un solo proceso, la oxidación con ozono no es muy eficaz. Debido a la complejidad del lixiviado, se requieren dosis de ozono altas y la reacción toma un tiempo largo. En combinación con otros métodos (biológico, coagulación), el ozono incrementa la eficiencia de tratamiento de DQO de 54% a 94% (Monge I. and Orta de Velásquez, 2004).

**Osmosis inversa.** No es tratamiento independiente, ya que requiere de una combinación de operaciones y procesos anteriores para lograr resultados adecuados (Hans Jurgen –Ehrig, 1989), cuando el lixiviado se encuentra en la fase acética es necesario un pretratamiento biológico. La osmosis inversa en combinación con la vaporización tiene mejores eficiencias, puede realizarse también en combinación con la floculación y con la adsorción.

**Vaporización.** Tiene la limitante de que es un proceso muy costoso. No es una tecnología probada en los lixiviados provenientes de residuos domésticos (Hans Jurgen –Ehrig, 1989).

**Adsorción.** Al igual que la vaporización es un proceso costoso y la capacidad de adsorción esta en función del valor de efluente de DQO. No es efectivo para la remoción de ácidos grasos

volátiles por las largas cadenas moleculares (Hans Jurgen –Ehrig, 1989 y Chian and De Walle, 1976).

#### **II.4.4. Recirculación de lixiviados**

Es un tratamiento efectivo y económico, consiste en recoger los lixiviados y recircularlos a través del relleno sanitario. Se estima que durante las primeras etapas del funcionamiento del relleno, el lixiviado contendrá cantidades importantes de Sólidos Disueltos Totales (SDT), DBO<sub>5</sub>, DQO, nutrientes y metales pesados. Cuando se recircula el lixiviado, se diluyen y atenúan los compuestos por actividad biológica y por otras reacciones químicas y físicas que se producen dentro del relleno.

Actualmente en el país, la recirculación de lixiviados solo es llevada a cabo en los rellenos sanitarios de Monterrey, Querétaro y en la Etapa IV de Bordo Poniente (Ciudad de México). Mientras que a nivel internacional se lleva a cabo en los rellenos sanitarios de Virginia, USA (Civil Infrastructure, 2004); Brescia, Italia (Bertanza G., 2002); Bangkok, Tailandia (Visvanathan C. et al, 2002); Pennsylvania, USA (D. Reinhart and A.B. Al-Yousfi, 1996); California, USA (El Fadel M, 1997) y Estambul, Turquía (Suna A. E. and Onay T.T., 2003). En estos rellenos sanitarios se han obtenido beneficios que van desde una mejor calidad de lixiviado, menores asentamientos en el sitio y mayor producción de biogás, entre otros.

#### **II.4.5. Evaporación de lixiviados**

Es el sistema más sencillo para la disposición de lixiviados, implica el uso de estanques recubiertos de una geomembrana para la evaporación de lixiviados por medio de la luz solar. El lixiviado que no se evapora se riega por encima de las celdas completas del relleno, tal como se lleva a cabo en el relleno controlado de Cancún, Quintana Roo y relleno sanitario de Tlanepantla, Estado de México.

En lugares lluviosos es conveniente que la instalación para el almacenamiento de lixiviados se cubra durante el invierno con una geomembrana, para excluir las aguas de lluvia. Se evacua el

lixiviado acumulado mediante evaporación durante los meses cálidos del verano, destapando las instalaciones de almacenamiento y regando el lixiviado sobre las superficies del relleno en activo o ya clausurado.

## **II.5. METODOS PARA LA COMPACTACIÓN DE SUELOS**

Actualmente existen muchos métodos para reproducir en laboratorio la compactación efectuada en campo. Históricamente, el primer método es el debido a R.R. Proctor (Peck, et al 1957) y es conocido como la Prueba Proctor Estándar o AASHO. (American Association of State Highway Officials) Estándar.

De acuerdo a Juárez et al, 1998 la prueba consiste en compactar el suelo que se encuentra en análisis (de preferencia suelos finos plásticos), dentro de un molde de 0.9 litros, con un diámetro de 10.2 cm. y una altura de 11.7 cm. La compactación se realiza por medio de golpes de un pisón de 2.5 kg. de peso, que consta de un vástago en cuyo extremo inferior hay un cilindro metálico de 5 cm. de diámetro, que se deja caer libremente desde una altura de 30.5 cm. Dentro del molde, el suelo debe colocarse en tres capas, las cuales se compactan dando 25 golpes a lo largo del área del cilindro en cada una de las capas. Cabe mencionar que el molde cuenta con una extensión desmontable del mismo diámetro y con una altura de 5 cm., el molde puede fijarse a una base metálica con tornillos de mariposa.

Debido a las modificaciones que fueron sufriendo los equipos de compactación, la prueba tuvo que ser modificada; esta prueba se lleva a cabo mediante 5 capas, con un peso del pistón de 4.5 kg. y la altura de caída del mismo es de 45.7 cm., dichas modificaciones dieron el nombre a la prueba Proctor Modificada o AASHO Modificada.

El equipo que se requiere para efectuar dicha prueba consiste en:

- Molde estándar de compactación cilíndrico, con extensión
- Pisón estándar
- Guía metálica para el pisón
- Regla recta metálica
- Balanza de laboratorio

- Balanza de plataforma con sensibilidad de 50 g y 15 kg. de capacidad
- Malla N° 4
- Horno secador

El procedimiento de pruebas de compactación se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Secar al aire una muestra de 2.5 kg. de peso y retirarse todo el material que sea mayor que la malla N° 4.
2. Determinar y registrar la tara del molde proctor teniendo colocada la placa de base.
3. Mezclar la muestra con agua suficiente para finalmente obtener una mezcla ligeramente húmeda, que se desmorone cuando se suelte después de ser apretada en la mano.
4. Dividir la muestra en el número requerido de porciones, una por cada que vaya a usarse e iguales, las cuales se pondrán en el cilindro compactando cada capa con el número de golpes requerido, dado con el pisón.
5. Quitar la extensión del molde y enrasar el molde en la parte superior con la regla metálica
6. Determinar y registrar el peso del cilindro, con la placa de base y el suelo compactado
7. Retirar el suelo del molde y obtener el contenido de agua de dos muestras representativas, de unos 100 g., una obtenida de un nivel cercano al superior y otra de una parte próxima al fondo.
8. Repetir el procedimiento anterior con un contenido de agua en el suelo ligeramente mayor y así sucesivamente hasta que se hayan obtenido, por lo menos, dos puntos en la gráfica de compactación que se sitúen arriba de la humedad óptima.
9. Dibujar los resultados obtenidos en la gráfica, teniendo como abscisas los diferentes contenidos de agua resultantes y como ordenadas los pesos específicos seco y de la masa. Dibujar la curva de saturación completa.

Con los datos anteriores la energía específica de compactación, se puede calcular con la siguiente formula:

$$E_e = \frac{NnWh}{V}$$

Donde:

$E_e$  = Energía específica

$N$  = Número de golpes por capa

$n$  = Número de capas de suelo

$W$  = Peso del pisón

$h$  = Altura de caída libre del pisón

$V$  = Volumen del suelo compactado

Es importante mencionar que las pruebas que se mencionaron anteriormente presentan la desventaja de que requieren mucho tiempo, trabajo y una cantidad de material que en ocasiones resulta excesiva. Ante tales circunstancias se ha desarrollado la siguiente prueba: "Miniatura", la cual fue elaborada en la Universidad de Harvard y es aplicable únicamente a suelos finos plásticos, con partículas menores que 2 mm., que son los suelos que se compactan en el campo con los rodillos conocidos como "patas de cabra"; el molde es un cilindro metálico de 3.3 cm. de diámetro interior y 7.2 cm. de altura; al igual que en las pruebas anteriores el molde está provisto de una extensión removible que en este caso es de 3.5 cm. de altura. Para esta prueba, el émbolo aplicador de presión es una barra metálica de 1.3 cm. de diámetro con mango de madera; dentro de este mango actúa un resorte comprimido y calibrado, el cual permite conocer el momento en que la presión a sido aplicada.

El equipo que se utiliza en esta prueba, esta compuesto básicamente de los mismos que se utilizan en la prueba proctor estándar, siendo modificado el equipo de pesaje, que tiene una precisión de 0.1 g. Mientras que el procedimiento se compone de los siguientes pasos:

1. Colocar el suelo en estado suelo por capas y presionándolo con un pisón de hule
2. Después de ajustar apropiadamente el resorte del pisón, insertar en el suelo el émbolo del pisón y presionar hasta que el resorte empiece a comprimirse. Quitar la presión, cambiar el émbolo ligeramente de posición y repetir la operación, repartiendo de esta forma la presión aplicada uniformemente en la superficie de la capa, hasta completar el número de aplicaciones deseadas.
3. Agregar la siguiente capa y repetir las operaciones 1 y 2, hasta continuar y completar con el número deseado de capas. La capa superior debe sobresalir por lo menos 1 cm. del molde, entrando en la extensión metálica del mismo.

4. Quitar el molde de su base y enrasar su borde superior usando la regla metálica, posteriormente verificar el borde inferior del molde y enrasarlo.
5. Pesar el molde con el suelo compactado.
6. Extraer la muestra, utilizando el extractor y colocarla en un recipiente adecuado, para posteriormente introducirla en el horno, a fin de determinar el contenido de agua.
7. Compactar otros suelos con contenidos de agua mayores, hasta que el peso húmedo de la muestra vaya decreciendo, lo cual nos indicara que se ha sobrepasado el contenido de agua optimo.
8. El peso específico correspondiente a cada contenido de agua podrá calcular con la siguiente formula:

$$\gamma_d = 100 \frac{\gamma_m}{100 + w(\%)}$$

9. Dibujar la curva de compactación

Por otra parte debemos tomar en cuenta los factores que influyen en la compactación de los suelos, principalmente son:

- Contenido inicial de agua
- Energía específica de compactación

### **III. CALCULOS Y DISEÑO DEL EXPERIMENTO**

Este capítulo describe los métodos de cuantificación de generación de lixiviados, así como el desarrollo de los cálculos que se realizaron para este proyecto y las consideraciones que se realizaron para la elaboración del mismo.

#### **III.1. METODOS PARA LA CUANTIFICACION DE LA GENERACIÓN DE LIXIVIADOS**

Dentro del balance hídrico, la humedad en el terreno es esencial porque se puede infiltrar a las celdas de residuos sólidos, además de que afecta la disponibilidad de nutrientes y bacterias necesarias para la descomposición biológica. Asimismo, el contenido y el desplazamiento de agua dentro de un relleno sanitario determinan el diseño del sistema colector, de tratamiento de lixiviados, del sistema de protección e impermeabilización.

Los métodos más usuales para determinar la generación de lixiviados son (Orta L. de V. T. et al 2003):

1. Método de balance de agua (Water Balance Method)
2. Evaluación hidrológica de la evolución de un relleno sanitario (Hydrologic evaluation of landfill performance: HELP)
3. Balance hídrico desarrollado por C. W. Thornthwaite

Adicionalmente, para determinar el volumen de lixiviados existen distintas herramientas computacionales como los programas Visual HELP (Schroeder et. al, 1994) y FILL (Khanbilvardi et al, 1996), ambos desarrollados en EEUU (Espinoza, et al, 2002). El programa Visual HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) corresponde a un modelo hidrológico, cuasibidimensional, que representa el movimiento del agua dentro, a través y fuera de un relleno sanitario. El modelo requiere datos climáticos, de suelo, y de diseño. Este modelo funciona mediante un balance de masa, pero no considera la producción de percolado debido a la descomposición de la basura. El programa FILL (Flow Investigation for Landfill Leachate) corresponde a un modelo bidimensional, más detallado que el Visual HELP, y presenta una aproximación más exacta del proceso de generación del lixiviado.

**Método de balance de agua (Water Balance Method).** Para el balance hídrico de un relleno es clave la cuantificación de evapotranspiración y está en función de:

- Temperatura
- Humedad
- Viento
- Radiación solar

La evotranspiración se calcula mediante una ecuación empírica, en tres etapas:

- Obtención del índice de calor de cada mes; se suman, para obtener el índice anual
- Con el índice de calor y tablas, se calcula el potencial diario de evapotranspiración
- Ajuste de este potencial por mes según la duración del día solar, mediante factores de corrección

$$P = PERC + AET + DST + r/o$$

Donde:

P = lixiviado generado

PERC = Percolación (pulgadas de agua)

AET = evapotranspiración (pulgadas de agua)

DST = cambio en la humedad del suelo, para cada mes (pulgadas de agua)

r/o = múltiplo de la precipitación pluvial mensual por el coeficiente de caída para calcular la caída mensual (pulgadas de agua)

**Evaluación hidrológica de la evolución de un relleno sanitario (Hydrologic evaluation of landfill performance: HELP).** El modelo HELP es bidimensional; se utiliza el perfil vertical completo: capas, residuos, membranas, agua drenante, etc., del relleno sanitario. Por su versatilidad para considerar varias configuraciones de perfil de relleno, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) lo utiliza ampliamente.

Los datos necesarios para su funcionamiento correcto son:

- Climáticos
- Del suelo
- Referentes a la vegetación del lugar
- De diseño

Y se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$K_u = K_s \left[ \frac{(\theta - \theta_r)}{\theta_s - \theta_r} \right]^{\left(3 + \frac{2}{\lambda}\right)}$$

Donde:

$K_u$ : conductividad hidráulica insaturada

$K_s$ : conductividad hidráulica saturada

$\theta$ : humedad del suelo (volumen/volumen)

$\theta_r$ : humedad residual del suelo (capacidad de campo), [volumen/volumen]

$\theta_s$ : humedad saturada del suelo (volumen/volumen)

$\lambda$ : índice de distribución de poros

Este modelo requiere información detallada de la zona, carente en la mayor parte de las regiones de México

**Balance hídrico desarrollado por C. W. Thornthwaite.** La secuencia del cálculo se extrajo del apéndice A y B (descripción del Método del Balance de Agua de C. W. Thornthwaite para el cálculo del Índice de Infiltración) de la PROY-NOM-140-SEMARNAT-2003 que a su vez fue tomada de Castany, F., 1971.

Esta metodología, establece una relación entre la hidrología básica de superficie con la hidrología subterránea, a través de la cual las variaciones en la cantidad de agua en el suelo, vienen determinadas por la diferencia entre las entradas y salidas de todas las fuentes posibles que tengan ingerencia en el balance. Como entradas, se consideran las precipitaciones pluviales mensuales promedio. Así mismo, como salidas, se incluyen las evapotranspiraciones mensuales obtenidas a partir de las temperaturas promedio mensuales y la capacidad que el suelo tiene para retener humedad antes de lixiviarla (capacidad de campo del suelo). Además, la fracción de la precipitación pluvial que se pierde por escurrimiento sobre el suelo, es también considerada como pérdida o salida. La aplicación de este balance, con los valores mensuales de

las variables antes mencionadas, puede expresarse como metodología de cálculo según el siguiente diagrama.

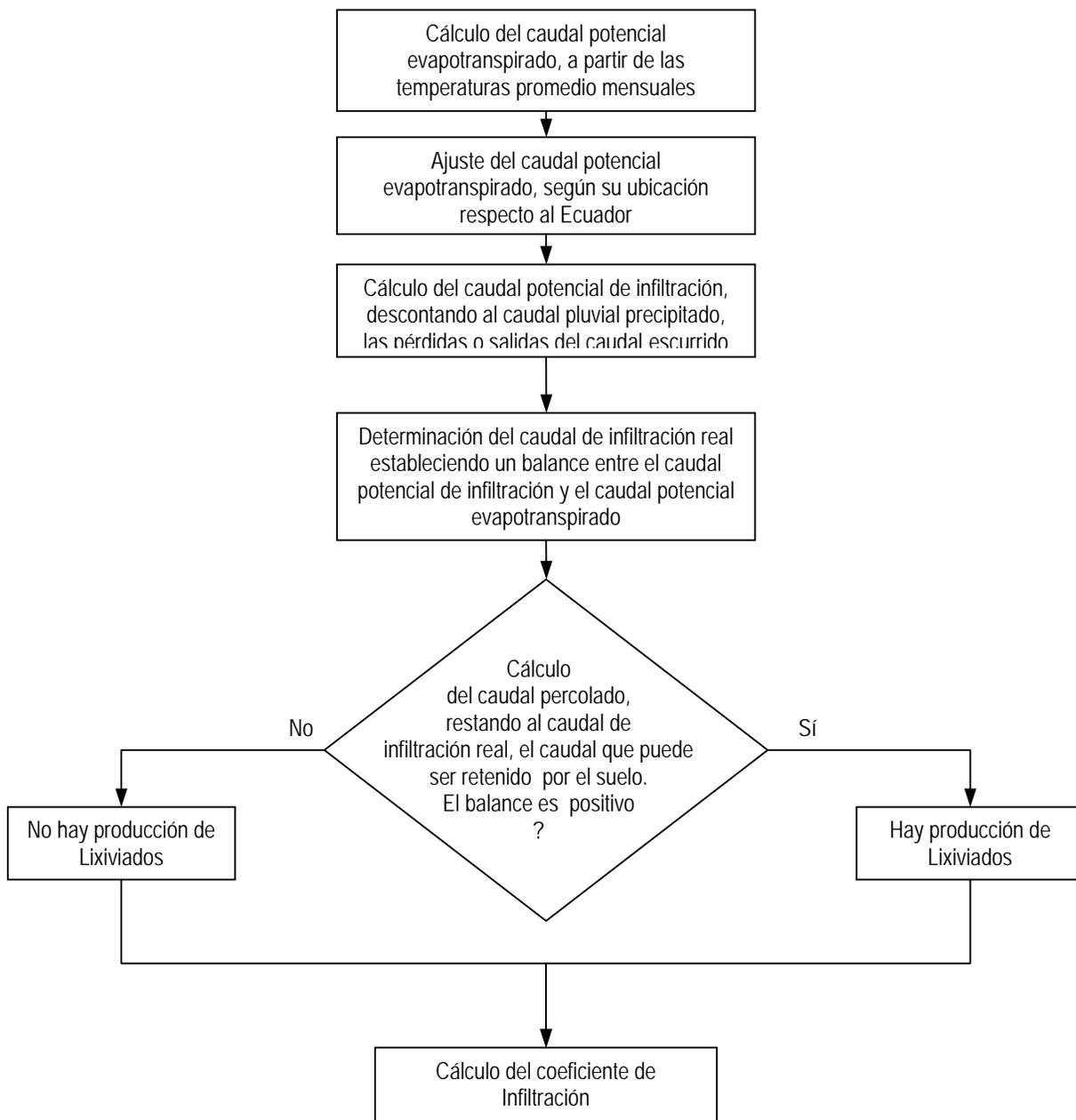


Figura III.1. Diagrama de calculo del método de Thorntwaite

La metodología, que expresa lo indicado en el diagrama anterior, se presenta a continuación:

**a) Determinación de la evapotranspiración mensual potencial corregida**

$$E_s = h_p * K_e$$

Donde:

$h_p$  = Es la altura de precipitación media mensual ( mm).

$K_e$  = Coeficiente de escurrimiento que depende del tipo de suelo en estudio, adimensional.

$E_s$  = Escurrimiento superficial mensual (mm).

- Evapotranspiración (E), y se mide en milímetros (mm)
- Evapotranspiración potencial ( $E_p$ ), y se mide en milímetros (mm)
- Evapotranspiración real ( $E_r$ ), en milímetros (mm)

$$i = \left( \frac{T_j}{5} \right)^{1.514}$$

$$ET = 16 * \left( \frac{10T}{I} \right)^a$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} ij$$

$$a = 0.492 + 179 \times 10^{-5} I - 771 \times 10^{-7} I^2 + 675 \times 10^{-9} I^3$$

Identificando a cada uno de los términos anteriores como:

ET = Evapotranspiración potencial sin corregir, en mm.

$T_j$  = Temperatura media mensual, en °C

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

ij = Índice mensual de calor, adimensional.

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

$j$  = Número del mes considerado.

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

$$ET_p = K_c \times ET$$

Donde:

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

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

$ET_p$  = Evapotranspiración potencial mensual ajustada, en mm.

#### **b) Cálculo de la humedad potencial de infiltración mensual**

$$I_j = h_p - h_p K_e - ET_p$$

Donde:

$I_j$  = Infiltración mensual, en mm.

$h_p$  = Altura de precipitación mensual, en mm.

$K_e$  = Coeficiente de escurrimiento mensual, adimensional.

$ET_p$  = Evapotranspiración potencial mensual, en mm

#### **c) Balance hídrico de la cubierta diaria y de la final del relleno sanitario, para cada mes.**

Se considera:

c.1. Cuando la precipitación pluvial mensual es igual o superior a la evapotranspiración potencial mensual, en la cubierta del terreno hay exceso de aporte de agua, que al ser absorbido incrementa la reserva de agua almacenada en el propio terreno.

c.2. Si tal precipitación es inferior a dicha evapotranspiración, el valor real de ésta consume totalmente a aquélla, y genera un déficit, que se suple con las reservas de agua del terreno

hasta su agotamiento. Si éstas son suficientes para satisfacer la deficiencia, la evapotranspiración real es igual a la potencial, y se asemeja a la consideración anterior. Si son insuficientes, la evapotranspiración real queda ligada a la precipitación pluvial mensual, y se agotan: en el almacenamiento de agua en el subsuelo se genera un déficit (generación de lixiviados).

El cálculo del coeficiente de infiltración, se obtiene empleando la siguiente ecuación:

$$COI_{j=1}^{12} = \frac{\sum_{j=1}^{12} ET}{\sum ET_p}$$

Donde:

COI = Coeficiente de Infiltración, adimensional.

j = Indicador de los meses del año.

El método antes descrito, se debe aplicar para cada uno de los meses del año, estableciendo el balance de agua en la capa de cubierta considerada.

De los métodos anteriormente descritos, el método que es más aplicable a las condiciones mexicanas es el de **Balance hídrico desarrollado por C. W. Thornthwaite**, y por lo consiguiente fue el utilizado en el cálculo de la generación de lixiviados para el caso en estudio (Bordo Poniente).

El método de balance de agua, determina la cantidad agua a infiltrarse al subsuelo, por lo que es de suponerse que las condiciones del suelo deben estar bien definidas, pues son condiciones que pueden afectar la percolación (escurrimiento de lixiviados), además de que existen varios coeficientes que serán utilizados en el cálculo. Por lo tanto, las condiciones, el tipo y espesor de cobertura, la presencia o ausencia de vegetación y las características topográficas, deberán definirse con precisión.

### III.2. CÁLCULO DE LIXIVIADOS GENERADOS

Con el fin de obtener la cantidad de lixiviados a recircular en los modelos, es necesario determinar los lixiviados que se generan dentro de un relleno sanitario, el relleno elegido fue Bordo Poniente (Cd. de México), debido a la existencia de datos climatológicos y a la cercanía del lugar.

Para la determinación de la temperatura media mensual (tabla III.1) y precipitación (tabla III.2) se utilizaron los datos de la estación climatológica ubicada en el relleno sanitario de Bordo Poniente, que se encuentra bajo la jurisdicción de la Dirección General de Servicios Urbanos (DGSU) y que se obtuvieron a través del Ing. Conrado Sarmiento encargado de Disposición Final de dicha dependencia. Los valores diarios (de cada 2 horas) de ambos parámetros se presentan en el anexo A. Resultando los siguientes valores mensuales promedios:

*Tabla III.1. Valores Promedio de las Temperaturas en Bordo Poniente*

	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
Temp. °C	11.72	15.74	16.41	18.56	19.83	17.20	16.22	16.00	16.24	15.48	11.40	10.29

*Tabla III.2. Precipitaciones registradas en Bordo Poniente*

	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Ma y</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
Precipitación mm	0	0	0	0	1.9	75.8	92.3	71.6	39	24.5	8.9	0
Anual												314

De acuerdo a la metodología expuesta en la sección III.1. "Métodos para la cuantificación de generación de lixiviados", en primer termino se calcula el valor de la evapotranspiración potencial ajustada [ET<sub>p</sub>] (ver tabla III.3). Para este cálculo se utilizan los datos de la estación climatológica y las fórmulas del inciso a); que al aplicarlas, se tiene:

Tabla III.3. Cálculo de las evapotranspiraciones potenciales ajustadas ( $ET_p$ )

<i>Mes</i>	<i>Temperatura media mensual (°C)</i>	<i>I</i>	<i>ET (mm)</i>	<i>Kc</i>	<i>ET<sub>p</sub></i>
Enero	11.72	3.63	38.15	0.92	35.07
Febrero	15.74	5.67	60.16	0.96	58.02
Marzo	16.41	6.05	64.21	1.00	64.00
Abril	18.56	7.28	77.65	1.05	81.53
Mayo	19.83	8.05	86.03	1.09	94.07
Junio	17.20	6.49	69.02	1.10	76.14
Julio	16.20	5.94	63.04	1.10	69.54
Agosto	16.00	5.82	61.72	1.07	65.89
Septiembre	16.24	5.95	63.19	1.02	64.25
Octubre	15.48	5.53	58.63	0.97	56.74
Noviembre	11.40	3.48	36.53	0.91	33.23
Diciembre	10.29	2.98	31.19	0.93	28.89
I = $\Sigma ij$		66.88			

Donde el valor del coeficiente "a" esta en función de la sumatoria de los índices mensuales de calor y que para este caso resulto de un valor de 1.548 en forma adimensional.

Además de los datos de precipitación, es necesario determinar el coeficiente de escurrimiento superficial, que para nuestro caso (en Bordo Poniente) se tiene una grava arcillosa con una pendiente menor al 2%; por lo que de acuerdo a Chow, 1974; el coeficiente " $K_e$ " será de 0.13 a 0.17. Utilizando los valores de 0.13 para los meses de sequía y 0.17 para los meses de mayor precipitación, tal como se aprecia en la columna 3 de la tabla III.4.

Tabla II.4. Determinación del potencial de infiltración en mm

<i>Mes</i>	<i>Precipitación total (mm)</i>	$K_e$	$h_p \cdot K_e$	$I$	$ETp$	$I_j$
Enero	0.00	0.13	0.00	0.00	35.07	-35.07
Febrero	0.00	0.13	0.00	0.00	58.02	-58.02
Marzo	0.00	0.13	0.00	0.00	64.00	-64.00
Abril	0.00	0.13	0.00	0.00	81.53	-81.53
Mayo	1.90	0.13	0.25	1.65	94.07	-92.42
Junio	75.80	0.17	12.89	62.91	76.14	-13.22
Julio	92.30	0.17	15.69	76.61	69.54	7.07
Agosto	71.60	0.17	12.17	59.43	65.89	-6.47
Septiembre	39.00	0.17	6.63	32.37	64.25	-31.88
Octubre	24.50	0.17	4.17	20.34	56.74	-36.40
Noviembre	8.90	0.13	1.16	7.74	33.23	-25.48
Diciembre	0.00	0.13	0.00	0.00	28.89	-28.89

El agua disponible en el suelo y su potencial almacenamiento, están relacionados con la capacidad de campo del suelo, propiedad que le permite retener una cierta cantidad de agua antes de percolarla. De Tchobanoglous, et. al, 1982 y USEPA, 1975; la cantidad de agua disponible será de 450 mm/m, debido a que el suelo utilizado en la cubierta de la celda del relleno es tipo arcilloso. Para la obtención del almacenamiento de agua, se utiliza el dato del grosor de la cubierta de la celda, la cual es de 30 cm. Por lo que finalmente el almacenamiento estará dado por la expresión:

$$450 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \times 0.30\text{m} = 135\text{mm}$$

Con este valor y los determinados en las tablas III.3. y III.4 se determinó el valor a percolar de lixiviados, tal como se muestra en la tabla III.5.

El volumen de agua a lixiviar será de 127.9 mm, que equivale a 1,279 m<sup>3</sup> por hectárea.

Con base en dicho caudal y a sabiendas de que la suma de las precipitaciones mensuales, es igual a 314 mm, el coeficiente de Infiltración será:

$$COI = \frac{81.19}{333.9} \times 100 = 40.73\%$$

*Tabla III.5. Determinación del lixiviado*

Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
Infiltración superficial	0.00	0.00	0.00	0.00	1.65	62.91	76.61	59.43	32.37	20.34	7.74	0.00
Evapotranspiración potencial corregida	35.07	58.02	64.00	81.53	94.07	76.14	69.54	65.89	64.25	56.74	33.23	28.89
Potencial de infiltración	-35.0	-58.0	-64.0	-81.5	-92.4	-13.2	7.07	-6.47	-31.8	-36.4	-25.4	-28.8
Almacenamiento	135.0	135.0	135.0	135.0	135.0	135.0	135.0	135.0	135.0	135.0	135.0	135.0
Déficit de agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	127.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

### III.3. ADECUACIÓN DE LOS METODOS DE COMPACTACIÓN DE SUELOS A COMPACTACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Con los procedimientos descritos en el punto II.5., se puede calcular la energía específica por compactación realizando 4 golpes por capa (número promedio realizado de pasadas con los compactadores de los residuos sólidos dentro del relleno sanitario), en un total de 4 capas de residuos sólidos con un peso del pisón de 31.15 kg. a una altura de 10 cm., mientras que el volumen de residuos sólidos será de 0.603 m<sup>3</sup>.

De acuerdo a los pesos de los equipos de compactación para relleno sanitario, que se tienen en el mercado (ver tabla III.6.) se procedió a determinar el peso requerido del pisón a utilizar en el modelo a escala de la celda de un relleno sanitario.

*Tabla III.6. Relación Peso / Área*

Compactador modelo	Peso (kg)	Dimensiones (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Relación W/A
816B	20,628	3.35 x 6.00	20.10	1,026.27
826C	31,631	3.53 x 7.18	25.35	1,247.77
836	45,500	3.81 x 8.27	31.51	1,443.99
			PROMEDIO	1,239.34

Fuente: Caterpillar, 2003

Considerando la relación promedio obtenida de peso entre área de 1,239.34 kg/m<sup>2</sup>, se tiene que para el área superficial del lisímetro de 0.50 m<sup>2</sup> requiere un peso de 311 kg, el cual corresponde a una altura nula de lanzamiento del pistón. Con lo cual, si se tiene una altura propuesta de 10 cm., es necesario un peso de 31.15 kg. para el pisón y lograr la compactación deseada.

### III.4. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental es un medio de importancia para el rendimiento de un proceso (Montgomery, 1991). La aplicación de técnicas de diseño experimental en una fase temprana del desarrollo de un proceso puede dar como resultado:

- Mejorar el rendimiento del proceso
- Menor variabilidad y mayor apego a los requerimientos nominales u objetivo
- Menor tiempo de desarrollo
- Menores costos globales

El objetivo que se persiguió con el diseño experimental, en primera instancia fue determinar la tasa de recirculación de lixiviados a través de los rellenos sanitarios del país y Latinoamérica que emplean la recirculación como una forma de eliminación del lixiviado; y evaluar los efectos que se tienen en la compactación de residuos.

De acuerdo a la búsqueda de bibliografía reflejada en el capítulo II, sección 4.4: los rellenos sanitarios del país que emplean la recirculación de lixiviado son cinco, mientras que a nivel internacional y en condiciones similares a las de estudio (nivel escala) son cinco, los cuales se mencionan en la tabla III.7. con su valor de porcentaje de recirculación de lixiviados. Estos datos son parte importante para definir los valores del porcentaje a recircular.

*Tabla III.7. Tasas de recirculación de lixiviados empleadas en los rellenos sanitarios*

<b>Sitio de Disposición Final</b>	<b>Tasa de recirculación (%)</b>
Querétaro, México	100
Tlanepantla; México	50
Monterrey, México	100
Cancún, México	10
Bordo Poniente (IV Etapa), México	10

*Tabla III.7. Tasas de recirculación de lixiviados empleadas en los rellenos sanitarios*

<b>Sitio de Disposición Final</b>	<b>Tasa de recirculación (%)</b>
Virginia, USA	83
Brescia, Italia	22
Bangkok, Tailandia	100
Pennsylvania, USA	50
California, USA	100
Estambul, Turquía	50

Con los porcentajes de recirculación de lixiviados empleados en los rellenos sanitarios del país y los experimentos a nivel escala internacional, los valores de recirculación más frecuentes son presentados en la tabla III.8., dichos valores de recirculación fueron los empleados para la realización del experimento.

*Tabla III.8. Frecuencia de las tasas de recirculación de lixiviados empleadas en los rellenos sanitarios*

<b>Tasa de recirculación de lixiviados</b>	<b>Porcentaje de Frecuencia</b>
100 %	36
50 %	27
10 %	18

#### **III.4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Debido a que el estudio de la recirculación de lixiviados en una celda de un relleno sanitario se vuelve complicada, para la realización de estudios es común el empleo de lisímetro, que es una representación a escala de un relleno y que simula el comportamiento de una celda de un relleno sanitario.

Para este estudio se propone la construcción de cuatro lisímetros.

- Tres lisímetros con recirculación de lixiviados
- Sin recirculación de lixiviados (testigo)

Cada lisímetro fué construido de fibra de vidrio y de acuerdo a estudios experimentales de Latinoamérica donde se han utilizado las siguientes dimensiones: 0.8 m de diámetro con 2.40 m de altura (ver figura III.2. se muestra el lisímetro utilizado en los experimentos de Chile (Espinace et. al, 1997)), se opto por utilizar el mismo diámetro, con una altura diferente (1.2 m). Para el lisímetro con recirculación de lixiviados, se le alimentarán lixiviados del relleno sanitario de Bordo Poniente perteneciente al Distrito Federal (DF).

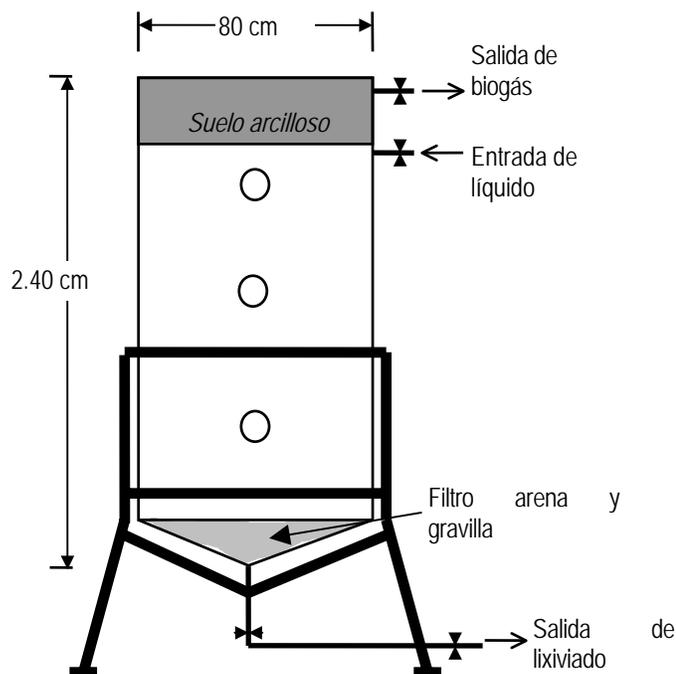


Figura III.2. Dimensiones del lisímetro

Una vez determinadas las dimensiones de los lisímetros, se procedió a establecer el número de lisímetros quedando como número mínimo cuatro, tres de los cuales cuentan con sistema de recirculación y uno sirvió como testigo (tal como se observó en la tabla III.7.).

Los lisímetros fueron ubicados dentro de la zona federal del ex lago de Texcoco, el cual colinda al norte con la autopista México- Texcoco y el lago de regulación horaria, al sur con terrenos propios del ex lago de Texcoco, al oriente y poniente con el río Churubusco.

El área destinada para la instalación de los lisímetros fue de 24 m<sup>2</sup> (4 metros de ancho por 6 metros de largo) dentro de la planta de tratamiento de lixiviados; este sitio se seleccionó debido a la cercanía del cárcamo de lixiviados, tal como se aprecia en las fotografías III.1. y III.2 ya que del cárcamo al sitio de colocación de los lisímetros existe una distancia de 30 metros, lo cual representa un ventaja para la adquisición del material por donde se conducirá el lixiviado.



*Fotografía III.1. Cárcamo de lixiviados de la planta de tratamiento de Bordo Poniente*

Otro de los factores que se determinó para la selección del sitio fue la cercanía con los residuos sólidos, ya que se encuentra aproximadamente a 3 km. de la IV etapa de construcción del relleno sanitario de Bordo Poniente, además de ubicar los lisímetros en sitios donde no causaran molestias los olores (en caso de presentarse) y por último, por encontrarse en condiciones físicas similares a las que se encuentra el relleno sanitario de Bordo Poniente.

Para el llenado de los lisímetros, se estableció que se realizaría con los residuos sólidos de uno de los camiones de las estaciones de transferencia que ingresan a Bordo Poniente, por lo cual primero se tuvo que hacer un listado de dichos camiones (ver tabla III.9.) y posteriormente se

seleccionó aleatoriamente realizó un sorteo aleatorio para seleccionar uno de los camiones (ver anexo C) y esperando el ingreso del camión en el día del muestreo para realizar el llenado de los lisímetros.



*Fotografía III.2. Distancia entre cárcamo de lixiviados a zona de lisímetros*

*Tabla III.9. Procedencia del equipo que ingresa a Bordo Poniente.*

<i>Estación</i>	<i>No. de tractocamiones</i>
<i>Álvaro Obregón</i>	<i>24</i>
<i>Azcapotzalco</i>	<i>18</i>
<i>Central de Abasto</i>	<i>18</i>
<i>Coyoacán</i>	<i>24</i>
<i>Cuauhtémoc</i>	<i>18</i>
<i>Gustavo A. Madero</i>	<i>15</i>
<i>Iztapalapa</i>	<i>20</i>

*Tabla III.9. Procedencia del equipo que ingresa a Bordo Poniente.*

<i>Estación</i>	<i>No. de tractocamiones</i>
<i>Miguel Hidalgo</i>	<i>16</i>
<i>Tlalpan</i>	<i>10</i>
<i>Venustiano Carranza</i>	<i>12</i>
<i>Xochimilco</i>	<i>14</i>
<i>Milpa Alta</i>	<i>5</i>
<b><i>Total</i></b>	<b><i>194</i></b>

Para no influir en la composición de residuos sólidos, fue necesaria una homogenización adecuando para esto el método de cuarteo a las características del experimento, hasta lograr la cantidad deseada de residuos sólidos ( $0.60 \text{ m}^3$ ), quedando el lado contrario para analizar la composición de los residuos sólidos en el sitio de disposición final, que en este caso es Bordo Poniente.

Para realizar el cuarteo, se depositan todos los residuos sólidos en un área plana horizontal de cemento pulido o similar y bajo techo. El montón de residuos sólidos se traspalea con pala y/o bieldo, hasta homogeneizarlos (Paso 1), a continuación, se divide en cuatro partes aproximadamente iguales A B C y D (Paso 2), y se eliminan las partes opuestas A y C ó B y D, repitiendo esta operación hasta dejar la cantidad requerida. Ver figura III.3.

El llenado de los lisímetros fue realizado por capas de residuos sólidos de 30 cm. y posteriormente se realizó la compactación de éstos con un pisón, dejándolo caer desde la altura especificada (10 cm.), ver fotografía III.3.

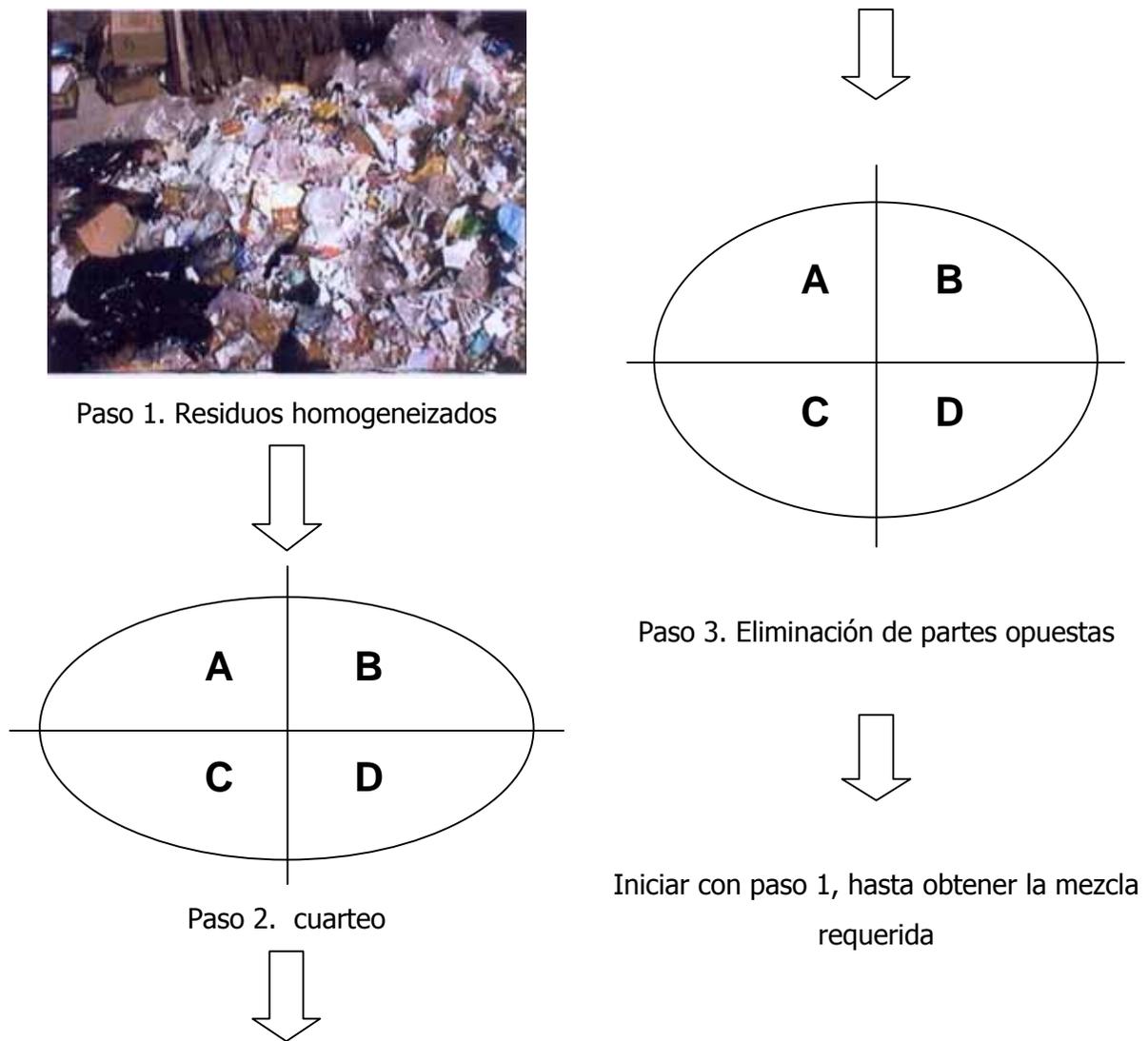


Figura III.3. Diagrama del método de cuarteo



*Fotografía III.3. Compactación de los residuos sólidos en lisímetros*

Al finalizar el llenado de los lisímetros con residuos provenientes de DF, se inyectó el lixiviado de acuerdo a la cantidad calculada en la sección III.1. y al volumen de cada uno de los lisímetros ( $0.60 \text{ m}^3$ ), con los cálculos realizados en la sección mencionada le correspondió 0.35 litros/día. Una vez realizado este paso, transcurrió el tiempo de estabilización, el cual se consideró de un mes, para posteriormente iniciar la recirculación con las tasas recomendadas de 0, 10, 50 y 100 % de lixiviados (es decir: 0, 0.04, 0.18 y 0.35 litros/día, respectivamente).

## IV. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### IV.1. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA REPRESENTACIÓN A ESCALA

Los cuatro lisímetros fueron llenados con residuos sólidos provenientes del Distrito Federal., la composición obtenida por medio del método de cuarteo, se menciona en la tabla IV.1.

*Tabla IV.1. Composición de los residuos sólidos en el Bordo Poniente, DF*

<b><i>Subproductos</i></b>	<b><i>Composición del muestreo (%)</i></b>
<i>Papel y cartón</i>	<i>17.83</i>
<i>Orgánicos</i>	<i>43.94</i>
<i>Vidrio</i>	<i>8.79</i>
<i>Metal</i>	<i>2.67</i>
<i>Madera</i>	<i>-----</i>
<i>Textil</i>	<i>1.51</i>
<i>Plástico</i>	<i>10.39</i>
<i>Otros</i>	<i>14.87</i>

Los valores de compactación que se obtuvieron en cada uno de los lisímetros se muestran en las tablas IV.2. y IV.3., mientras que en la tabla IV.4 se muestra el valor promedio de compactación para cada uno de los lisímetros que fueron utilizados durante el periodo de enero a abril de 2004.

*Tabla IV.4. Promedio de compactación en lisímetros de Bordo Poniente, DF*

<b><i>Lisímetro (Recirculación)</i></b>	<b><i>Promedio de valores de compactación (ton/m<sup>3</sup>)</i></b>
<i>1 (0%)</i>	<i>0.926</i>
<i>2 (10%)</i>	<i>1.027</i>
<i>3 (50%)</i>	<i>1.015</i>
<i>4 (100%)</i>	<i>0.942</i>

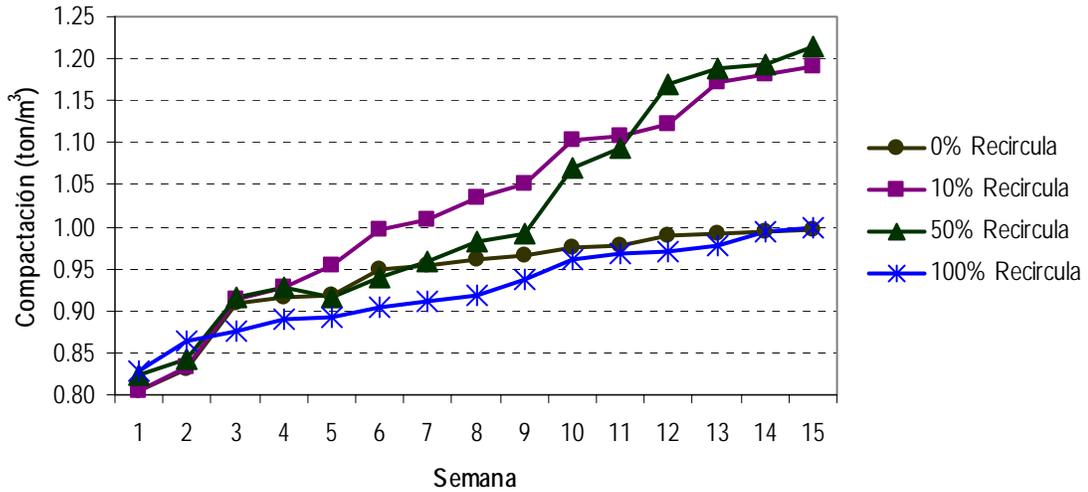
Tabla IV.2. Valores de compactación en los lisímetros de Bordo Poniente, DF

<b>Lisímetro</b>  <b>(Recirculación n)</b>	<b>Valor de compactación (ton/m<sup>3</sup>) con recirculación</b>							
	<b>1<sup>a</sup> Semana</b>	<b>2<sup>a</sup> Semana</b>	<b>3<sup>a</sup> Semana</b>	<b>4<sup>a</sup> Semana</b>	<b>5<sup>a</sup> Semana</b>	<b>6<sup>a</sup> Semana</b>	<b>7<sup>a</sup> Semana</b>	<b>8<sup>a</sup> Semana</b>
1 (0%)	0.829	0.864	0.876	0.889	0.893	0.905	0.911	0.918
2 (10%)	0.804	0.833	0.915	0.928	0.953	0.997	1.009	1.034
3 (50%)	0.824	0.843	0.916	0.929	0.916	0.940	0.960	0.982
4 (100%)	0.804	0.830	0.909	0.916	0.918	0.949	0.955	0.961

Tabla IV.3. Valores de compactación en los lisímetros de Bordo Poniente, DF (2<sup>a</sup> Parte)

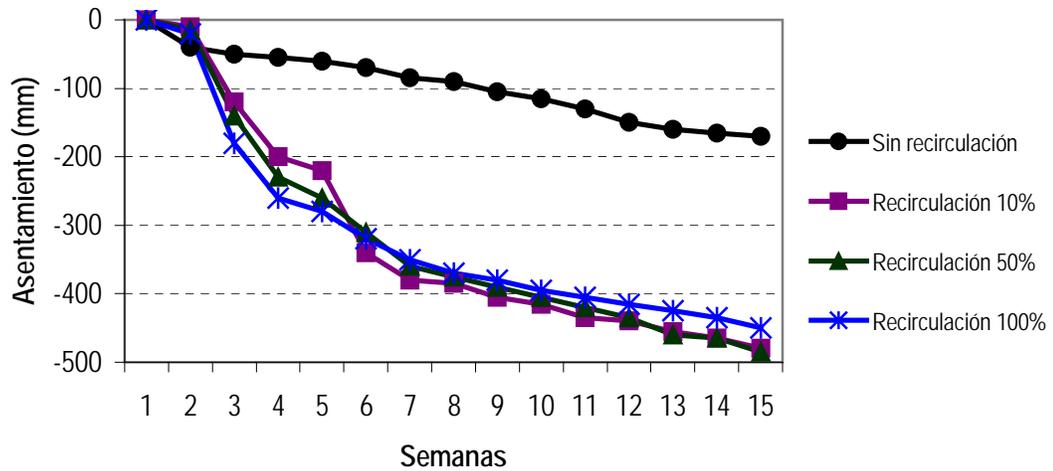
<b>Lisímetro</b>  <b>(Recirculación n)</b>	<b>Valor de compactación (ton/m<sup>3</sup>) con recirculación</b>						
	<b>9<sup>a</sup> Semana</b>	<b>10<sup>a</sup> Semana</b>	<b>11<sup>a</sup> Semana</b>	<b>12<sup>a</sup> Semana</b>	<b>13<sup>a</sup> Semana</b>	<b>14<sup>a</sup> Semana</b>	<b>15<sup>a</sup> Semana</b>
1 (0%)	0.937	0.962	0.969	0.971	0.978	0.994	0.999
2 (10%)	1.052	1.104	1.108	1.121	1.171	1.182	1.191
3 (50%)	0.993	1.069	1.095	1.168	1.189	1.194	1.213
4 (100%)	0.966	0.976	0.977	0.990	0.991	0.994	0.996

En la gráfica IV.1. se muestra el comportamiento de los valores de compactación, para cada uno de los lisímetros en operación.



Gráfica IV.1. Comportamiento de compactación en los lisímetros de Bordo Poniente, DF

En la gráfica IV.2. se muestra el asentamiento que se observo en cada uno de los lisímetros.



Gráfica IV.2. Comportamiento del asentamiento en los lisímetros de Bordo Poniente, DF

En la tabla IV.5. se presenta el promedio presentado de asentamiento en cada lisímetro estudiado.

*Tabla IV.5. Promedio de asentamiento en lisímetros de Bordo Poniente, DF*

<b><i>Lisímetro (Recirculación)</i></b>	<b><i>Promedio de asentamiento (mm.)</i></b>
<i>1 (0%)</i>	<i>-96.33</i>
<i>2 (10%)</i>	<i>-316.67</i>
<i>3 (50%)</i>	<i>-316.67</i>
<i>4 (100%)</i>	<i>-312.33</i>

## **IV.2. EFECTOS DE LA RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS**

### **IV.2.1. En la compactación de residuos sólidos**

De acuerdo a lo observado en el estudio, los valores de compactación son mayores en los lisímetros que tienen una tasa de recirculación de lixiviados en comparación con los valores presentados en el lisímetro testigo (recirculación nula).

Los valores de compactación se incrementan paulatinamente conforme transcurre el tiempo, presentando un mayor crecimiento en las tasas de recirculación de lixiviados de 10 y 50%. En el lisímetro con porcentaje de recirculación del 100% tiende a presentar (después de la semana 10) valores de compactación similares a los presentados en el lisímetro testigo y sin recirculación.

Tomando el lisímetro sin recirculación como comparativo, la compactación de residuos al final del muestreo (semana 15) es mayor en un 19.26 por ciento para el lisímetro 2 y 21.47% en el lisímetro 3, mientras que en el lisímetro 4 es menor en un 0.25%.

## **IV.2.2 Asentamientos**

De acuerdo a la gráfica IV.2. y tabla IV.5., se puede observar que los mayores asentamientos se dieron en el lisímetro que tiene la recirculación del 50% y 10% de la producción de lixiviado, en forma muy parecida. Mientras que en el lisímetro con recirculación del 100% de lixiviado el asentamiento presentado fue menor, aunque mayor al valor presentado en el lisímetro testigo y que operó sin recirculación de lixiviados.

## **IV.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS**

### **IV.3.1. Ventajas y beneficios de la recirculación de lixiviados**

De acuerdo a la literatura correspondiente en este tema (Frederick, 1996; McCreanor and Reinhart, 1996; Dress, 2001; San and Okay, 2001; Chan et al., 2002), algunos de los beneficios de recircular el lixiviado dentro de un relleno sanitario son:

- producción de lixiviado con baja carga orgánica en periodo de tiempo más corto al normal
- aceleración de la degradación y estabilización de los residuos orgánicos
- aceleración abundante de los contaminantes solubles
- intensificación de la producción de biogás
- aprovechamiento del volumen de residuos en un reducido tiempo

### **IV.3.2. Desventajas e inconvenientes de la recirculación de lixiviados**

Las desventajas más significativas de la recirculación de lixiviados son:

- dificultades para lograr una distribución homogénea dentro de la superficie del relleno sanitario
- aunque la fracción orgánica de lixiviados puede ser reducida en gran medida al efectuar la recirculación, otros constituyentes del lixiviado no son removidos o por lo menos no en forma significativa, tales como: nitrógeno amoniacal, cloro y metales.

- problemas como saturación, encharcamiento y condiciones de acidez pueden ocurrir al recircular en gran cantidad el lixiviado.

### **IV.3.3. Análisis de las ventajas y desventajas de la recirculación de lixiviados**

Considerando un relleno sanitario de vida útil 10 años y los valores de compactación logrados con la recirculación de lixiviados, se puede calcular el aumento de la vida útil de cada uno de los sitios de disposición final acuerdo a la compactación lograda. En caso de aplicar una recirculación del 10% se puede lograr un aumento de vida útil de hasta 11.3 años, para una recirculación del 50% de hasta 11.1 años y para una recirculación del 100% del 10.3 años.

La vida útil se puede expresar en toneladas a disponer, para lo cual se consideró la misma compactación lograda en los residuos sólidos que se mostró en la tabla IV.4., logrando disponer 12.61%, 11.29% y 3.29 % de toneladas adicionales para recirculación de 10%, 50% y 100% de lixiviados.

Comparando los costos requeridos para la recirculación de lixiviados que aumentan US\$ 11 por mes (Civil Infraestructure, 2004) y los costos de inversión requeridos para construir un relleno sanitario de US\$ 5,000 – 15,000 por tonelada instalada y un costo de operación de US\$ 6.00 por tonelada (BID-OPS, 1998).

Mientras que el aumento en los costos de operación es 18.33%, 91.67 y 183.33%, respectivamente.

## **IV.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **IV.4.1. Composición de residuos en disposición final**

Al realizar una comparación entre la tabla IV.1. y los porcentajes que se muestran en el estudio de JICA<sup>1</sup>, se puede observar que estos valores se modifican en gran medida (ver

---

<sup>1</sup> Estudios sobre el Manejo de Residuos Sólidos para la ciudad de México, Informe Final. JICA. Volumen 1 Mayo 1999.

tabla IV.6). Dentro del estudio de JICA se menciona que la composición de residuos sólidos para la Ciudad de México no tendrá cambios significativos para los años siguientes (2000-2020), aunque cabe aclarar que para que esta nota tenga validez deberán permanecer las mismas condiciones en las que se realizó dicho estudio, lo cual ya no es posible en su totalidad debido a la entrada en vigor de la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (publicada en la Gaceta Oficial del DF el 22 de abril de 2003) y los programas subsecuentes del manejo de residuos sólidos (reuso, reciclaje y separación entre otros). Así como la existencia de cambios hábitos de consumo y mayor prepepena que existe en los camiones de recolección.

*Tabla IV.6. Comparación de la composición en los residuos sólidos en Bordo Poniente, DF*

<i>Subproductos</i>	<i>Composición (%)</i>		<i>Variación con respecto al estudio de JICA, 1999 (%)</i>
	<i>Muestreo actual, 2004</i>	<i>JICA, 2004</i>	
<i>Papel y cartón</i>	<i>17.83</i>	<i>21.94</i>	<i>-18.76</i>
<i>Orgánicos</i>	<i>43.94</i>	<i>43.11</i>	<i>1.94</i>
<i>Vidrio</i>	<i>8.79</i>	<i>7.23</i>	<i>21.65</i>
<i>Metal</i>	<i>2.67</i>	<i>4.29</i>	<i>-37.76</i>
<i>Madera</i>	<i>0.00</i>	<i>1.24</i>	<i>100.00</i>
<i>Textil</i>	<i>1.51</i>	<i>2.55</i>	<i>-40.98</i>
<i>Plástico</i>	<i>10.39</i>	<i>8.02</i>	<i>29.55</i>
<i>Otros</i>	<i>14.87</i>	<i>11.62</i>	<i>27.97</i>

#### **IV.4.2. Compactación de residuos sólidos en disposición final**

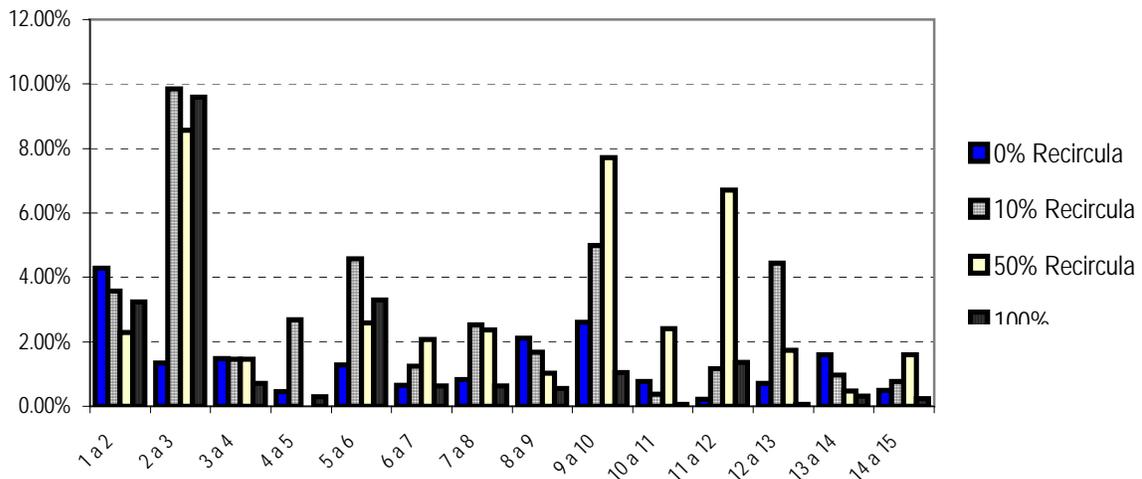
De acuerdo a los valores finales de compactación logrados en cada uno de los lisímetros, la mejor tasa de recirculación de las tres estudiadas es la del 10% de recirculación de la producción del lixiviado inicial, seguida por el 50% y 0%, para finalmente quedar la del 100%. Tal como se puede apreciar en la tabla IV.7. donde de acuerdo al valor final de

compactación se presenta un mayor porcentaje de variación con respecto valor inicial de compactación.

Tabla IV.7. Variación de la compactación inicial y final de los residuos sólidos en los lisímetros

<b>Lisímetro (Recirculación)</b>	<b>Valor de compactación inicial (ton/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Valor de compactación final (ton/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Variación en la compactación inicial a final (%)</b>
1 (0%)	0.829	0.999	20.51
2 (10%)	0.804	1.191	48.16
3 (50%)	0.824	1.213	47.16
4 (100%)	0.804	0.996	23.96

En la gráfica IV.3., se presenta la transición por semana de los valores de compactación durante el tiempo que perduró el estudio. De dicha gráfica, se puede observar que el mayor incremento se presentó en el transcurso de la semana 2 a la 3 para los tres lisímetros con recirculación, mientras que para el lisímetro sin recirculación el mayor crecimiento en los valores de compactación se presentó en el periodo de la primera semana y segunda.



Gráfica IV.3. Variación en los valores de compactación de los lisímetros de Bordo Poniente, DF

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### V.1. CONCLUSIONES

En nuestro país solo dos de los rellenos sanitarios cuentan con la infraestructura necesaria y adecuada para realizar la recirculación de lixiviados (Monterrey, Nuevo León y Querétaro, Querétaro), mientras que en el caso de Latinoamérica ninguno de los rellenos sanitarios cuentan con sistema de recirculación de lixiviados apropiado, actualmente se encuentran en proyecto rellenos sanitarios en Latinoamérica (Chile y Brasil) que contemplan la recirculación de lixiviados.

El sistema de manejo de lixiviados que se aplica comúnmente en los rellenos sanitarios del país y en Latinoamérica es la evaporación de lixiviados, mediante lagunas y cuando se tiene un excedente de lixiviados, se aplica en forma de riego sobre las celdas de residuos sólidos de los rellenos o se inyecta en los pozos de ventilación de biogás.

De los métodos existentes para calcular la generación de lixiviados, el más usual y apropiado a las condiciones mexicanas sigue siendo el balance hídrico desarrollado por C. W. Thornthwaite, con el cual se calculó la generación de lixiviados para el relleno de Bordo Poniente. El valor correspondiente de lixiviados fue de 127.9 mm, que equivalen a 1,279 m<sup>3</sup> por hectárea.

Considerando la vida útil de un relleno sanitario y los valores de compactación logrados con la recirculación de lixiviados, el aumento de la vida útil de los sitios de disposición final puede ser de 1.3 años para una recirculación del 10%, 1.1 años para una recirculación del 50% y de 0.3 años para recirculación del 100%, resultado ventajoso realizar la recirculación de lixiviados.

De acuerdo a las pruebas realizadas se puede concluir que los valores de compactación son mayores en los lisímetros con recirculación de lixiviados, dando por aceptada la hipótesis

inicial de este trabajo. Los valores de compactación en lisímetros con recirculación son mayores a los que presentan sin recirculación de lixiviados hasta en un 22%.

Los resultados obtenidos de la operación de lisímetros con recirculación de lixiviados sin tratar indican que los asentamientos son mayores que en los lisímetros que no tienen recirculación de lixiviados.

No se determinó el aumento de la producción de biogás, se observó que éste se incrementó debido al olor y mayor presencia de movimiento al destapar el lisímetro.

Se observó que en el lisímetro sin recirculación se produjo más biogás (el pH del lixiviado varió entre 8.0 y 8.8) comparado con los lisímetros con recirculación de lixiviados, en los cuales se notó muy poco biogás, lo cual se atribuye al pH del relleno, ya que el pH del lixiviado generado varió entre 5.0 y 6.0 valores que son inhibitorios para el desarrollo de las bacterias metanogénicas.

## **V.2. RECOMENDACIONES**

Realizar experimentos con recirculación de lixiviados a diferentes tasas que las establecidas en este estudio, para implantar la tasa de recirculación adecuada para el manejo de lixiviados.

Es necesario realizar más investigaciones en este rubro y los diversos efectos causados por la recirculación de lixiviados, tales como:

- degradación de residuos sólidos,
- calidad de los lixiviados,
- producción de biogás,
- y asentamientos.

Implementar nuevas experiencias con recirculación de lixiviados tratados para determinar los parámetros y los efectos que se producen en los procesos de degradación de los residuos sólidos, así como su influencia en la compactación, calidad de lixiviados, producción de biogás y asentamientos, entre otros.

**ANEXO A. VALORES DIARIOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN**

TEMPERATURA – OCTUBRE

HORA DE LECTURA	DIAS				PROMEDIO MENSUAL
	28	29	30	31	
2	11.5	13	14.5	11	
4	10	11	12	10	
6	10	11	11.5	10	
8	7	10	13.5	12	
10	10	12	18	15	
12	15	17.5	22.5	19	
14	20	22.5	25	21.5	
16	22	25	23	21	
18	22	29	23	18	
20	19	16.5	12.5	16	
22	16	15.5	12	15	
24	14.5	15	12	14	
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>14.75</b>	<b>16.50</b>	<b>16.63</b>	<b>15.21</b>	<b>15.77</b>

TEMPERATURA – NOVIEMBRE (1ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS												
	1	2	3	4	5	6	12	13	14	15	16	17	18
2	13.0	12.5	12.0	13.5	13.5	13.0		6.5	6.0	10.5	11.0	6.5	2.5
4	12.0	12.5	12.0	12.0	12.0	13.0		6.0	5.0	10.0	9.5	2.5	0.5
6	11.0	12.0	11.0	12.0	12.0	11.5		6.0	5.0	9.0	9.0	0.5	-0.5
8	14.0	12.5	11.0	11.0	11.0	11.0		6.0	4.5	9.5	9.0	-0.5	-2.0
10	17.0	16.0	15.0	17.0	17.0	11.0		8.0	10.0	12.5	10.0	4.0	2.5
12	20.5	19.5	16.0	18.5	18.5	11.0		12.0	15.0	17.0	14.0	9.0	11.0
14	22.0	21.5	15.0	21.0	21.0	12.0		15.0	20.0	17.5	17.0	14.0	17.0
16	21.0	22.5	15.0	19.0	19.0	12.5	17.0	18.0	21.0	17.0	20.0	19.0	22.0
18	17.0	16.5	13.5	16.5	16.5		13.0	16.5	13.0	12.5	19.5	19.5	23.5
20	15.0	14.5	13.0	15.5	15.5		11.0	12.5	12.0	11.5	15.0	16.0	19.5
22	14.0	15.0	12.0	14.0	14.0		9.5	9.5	11.5	11.0	7.5	13.5	15.0
24	13.5	13.0	12.5	13.5	13.5		7.5	7.0	11.0	10.5	7.0	9.0	10.0
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>15.83</b>	<b>15.67</b>	<b>13.17</b>	<b>15.29</b>	<b>15.29</b>	<b>11.88</b>	<b>11.60</b>	<b>10.25</b>	<b>11.17</b>	<b>12.38</b>	<b>12.38</b>	<b>9.42</b>	<b>10.08</b>

TEMPERATURA – NOVIEMBRE (2ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS												PROMEDIO MENSUAL
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
2	6.0	2.0	6.5	0.0	0.0	2.0	3.0	9.0	6.5	11.5	7.0	7.0	
4	3.5	0.0	1.5	-4.5	-4.0	-1.0	3.0	4.0	5.0	10.0	6.0	4.0	
6	2.5	-1.0	-0.5	-5.5	-4.5	-1.5	1.0	2.0	3.5	6.5	3.0	3.5	
8	1.5	0.0	0.5	-4.0	-4.0	-3.0	0.0	2.0	5.5	6.5	4.0	10.0	
10	4.0	7.5	8.0	5.0	4.0	5.0	6.0	7.5	13.0	12.0	15.5	17.5	
12	14.0	15.0	11.0	10.5	9.5	11.5	13.0	18.0	18.5	17.0	21.0	22.0	
14	20.0	20.0	15.0	13.5	15.0	17.0	18.5	23.0	21.5	21.0	25.0	25.0	
16	20.0	19.5	15.0	15.5	18.0	20.0	20.0	22.5	22.0	23.0	23.5	22.5	
18	18.0	17.0	12.5	14.5	17.0	19.5	18.5	17.5	20.0	18.5	20.0	16.0	
20	14.0	11.5	9.0	9.0	12.0	12.0	14.0	15.0	15.5	17.0	17.0	11.5	
22	9.0	9.0	4.5	7.0	7.0	9.5	11.0	11.0	15.0	14.0	10.0	10.5	
24	3.5	8.0	3.5	5.0	4.0	7.0	10.0	8.5	13.0	9.0	7.0	7.0	
PROMEDIO DIARIO	9.67	9.04	7.21	5.50	6.17	8.17	9.83	11.67	13.25	13.83	13.25	13.04	11.40

TEMPERATURA – DICIEMBRE

HORA DE LECTURA	DIAS														PROMEDIO MENSUAL
	1	2	3	4	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
2	6.0	7.0	5.5	5.0		4.0	9.0	2.5	5.5	1.0	3.0	2.0	1.5	5.0	
4	6.5	7.0	3.5	3.0		3.0	7.0	0.0	3.0	-1.0	1.5	1.5	1.5	0.0	
6	3.0	5.0	4.0	2.0		2.0	6.0	0.5	6.0	2.5	2.0	1.5	1.0		
8	10.0	7.5	4.0	5.0		8.0	11.0	5.0	12.5	11.5	10.5	6.0	8.0		
10	16.5	15.0	7.5	12.5		12.0	15.0	12.0	17.0	19.0	17.5	10.5	15.0		
12	21.5	20.0	15.0	17.0	19.0	17.0	18.0	19.0	19.0	21.0	21.5	16.0	21.0		
14	24.5	21.5	20.0	19.0	18.5	18.0	20.0	16.5	19.0	22.5	22.5	18.5	22.5		
16	21.5	21.0	20.0	18.5	15.5	16.0	18.5	13.5	14.0	16.0	19.0	16.0	17.0		
18	16.0	15.5	15.5		12.5	13.0	16.0	12.0	10.0	13.0	11.0	12.0	12.5		
20	13.0	13.5	12.0		12.0	12.0	11.0	10.5	9.0	10.5	10.5	11.0	10.5		
22	11.0	10.0	9.0		8.5	12.5	6.0	10.0	6.0	8.0	5.0	6.0	8.5		
24	7.5	7.0	7.0		6.0	9.0	4.0	7.0	2.5	6.0	4.0	3.5	7.0		
PROMEDIO DIARIO	13.08	12.50	10.25	10.25	13.14	10.54	11.79	9.04	10.29	10.83	10.67	8.71	10.50	2.50	10.29

TEMPERATURA – ENERO

HORA DE LECTURA	DIAS								PROMEDIO MENSUAL
	7	8	9	10	11	12	13	14	
2		7.0	6.0	8.5	6.0	8.5	8.0	5.5	
4		4.0	3.5	6.0	6.0	7.0	7.0	5.0	
6		2.5	2.0	7.0	5.0	6.0	7.0	5.0	
8		5.5	4.0	8.0	7.0	6.5	7.0	6.0	
10		10.0	10.0	15.0	12.0	12.5	9.5	10.0	
12	13.0	14.0	11.0	19.0	19.0	13.0	12.0	14.0	
14	13.0	18.5	20.0	22.0	23.0	13.0	14.0	17.5	
16	12.0	20.0	20.0	23.0	21.0	11.0	14.0	17.5	
18	9.5	15.5	17.0	17.0	18.0	10.5	12.0	13.0	
20	8.0	12.0	15.0	13.0	14.5	10.0	10.0	10.0	
22	8.0	9.5	13.0	11.0	11.5	9.5	9.0	8.0	
24	7.0	7.0	11.0	7.0	9.0	9.0	7.0	4.0	
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>10.07</b>	<b>10.46</b>	<b>11.04</b>	<b>13.04</b>	<b>12.67</b>	<b>9.71</b>	<b>9.71</b>	<b>9.63</b>	<b>11.72</b>

TEMPERATURA – FEBRERO

HORA DE LECTURA	DIAS								PROMEDIO MENSUAL
	1	2	3	4	5	26	27	28	
2	12.5	9	12	10	10		12	7.5	
4	12	6	10.5	8	6		11.5	6	
6	6.5	4	8	6	4.5		10	5	
8	3	3.5	4	4	4		14.5	13	
10	5.5	6	10.5	12	10		23.5	20	
12	13	13	16.5	17	19		27	26	
14	17.5	20	23	21	25.5	30	29	28	
16	20	24	24	24	26	26	27	27.5	
18	21	25	20	23	23	20.5	21	22	
20	19	20	17	18.5	18	18.5	16	19	
22	17	15.5	13	16		16	16	16	
24	14	13.5	13	13		13	11	14.5	
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>13.42</b>	<b>13.29</b>	<b>14.29</b>	<b>14.38</b>	<b>14.60</b>	<b>20.67</b>	<b>18.21</b>	<b>17.04</b>	<b>15.74</b>

TEMPERATURA – MARZO (1ª PARTE)

	DIAS									
HORA DE LECTURA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	13.0	11.5	13.0	11.5	8.0	12.0	11.0	10.5	11.0	8.0
4	11.0	10.0	12.0	8.0	6.0	7.5	9.5	9.0	10.0	6.5
6	7.0	5.0	10.0	7.0	8.0	5.5	6.0	10.0	7.5	5.0
8	12.0	10.5	11.5	10.0	16.5	16.0	16.0	15.5	13.0	7.0
10	21.0	19.0	21.0	19.5	25.0	23.0	22.0	23.0	23.0	16.0
12	25.0	24.0	26.0	24.5	29.0	28.0	26.5	27.0	28.5	25.0
14	28.5	28.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	31.0	28.0
16	28.0	29.0	28.0	27.0	26.0	26.0	28.5	30.0	28.0	29.0
18	22.5	23.5	24.0	21.0	21.5	21.0	22.0	24.0	23.0	24.0
20	19.5	20.0	20.5	18.0	18.0	19.0	20.0	20.0	19.0	20.0
22	16.5	17.0	18.0	16.0	15.0	17.0	19.0	16.0	15.5	18.0
24	16.5	15.0	17.0	12.0	14.0	14.0	13.0	14.0	13.0	16.5
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>18.38</b>	<b>17.71</b>	<b>19.17</b>	<b>16.96</b>	<b>18.00</b>	<b>18.17</b>	<b>18.54</b>	<b>19.00</b>	<b>18.54</b>	<b>16.92</b>

TEMPERATURA – MARZO (2ª PARTE)

	DIAS									
HORA DE LECTURA	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	11.5	15.5	10.0	14.5	13.0	12.0	12.0	13.0	11.0	9.0
4	10.0	11.0	8.0	11.0	13.0	9.0	8.5	11.5	8.5	7.0
6	10.0	9.0	6.0	10.0	12.0	7.0	8.0	8.0	8.0	5.0
8	13.0	8.5	9.0	10.0	11.0	10.0	9.0	9.0	16.5	13.0
10	19.5	17.5	17.0	15.5	17.5	17.5	16.0	15.5	23.0	23.0
12	23.0	23.0	22.5	20.0	21.5	22.0	21.0	20.5	26.5	26.0
14	28.0	26.5	25.5	22.0	23.0	25.0	25.0	25.0	27.5	29.0
16	25.5	26.0	26.0	18.5	24.0	26.0	27.0	27.0	26.0	26.0
18	24.0	19.5	24.5	19.0	23.0	24.0	24.5	25.5	21.0	21.0
20	19.0	15.0	19.5	17.5	20.0	20.0	19.0	20.5	16.0	16.5
22	16.4	15.0	18.0	17.0	17.0	17.0	17.5	16.0	13.0	14.0
24	15.5	12.0	17.5	14.5	14.5	15.0	15.5	12.0	10.0	10.0
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>17.95</b>	<b>16.54</b>	<b>16.96</b>	<b>15.79</b>	<b>17.46</b>	<b>17.04</b>	<b>16.92</b>	<b>16.96</b>	<b>17.25</b>	<b>16.63</b>

TEMPERATURA – MARZO (3ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS											PROMEDIO MENSUAL
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
2	7.0	7.0	11.0	7.0	13.0	12.5	12.0		9.0	10.0	3.0	
4	4.0	5.0	8.5	6.0	12.0	10.0	7.0		9.0	7.0	3.0	
6	1.0	2.0	4.0	5.5	10.5	5.0	7.0		8.0	6.5	3.0	
8	9.0	9.5	10.0	11.5	13.5	6.5			10.0	5.5	3.0	
10	20.0	18.5	15.0	18.5	19.0	16.0			18.0	5.0	6.0	
12	27.0	24.0	21.0	24.0	23.0	21.0			23.0	5.0	10.0	
14	28.0	27.5	24.0	26.5	26.0	23.0		25.5	24.0	9.0	15.0	
16	28.0	27.0	25.0	27.0	25.5	24.5		25.0	25.0	3.5	17.0	
18	22.5	22.5	22.0	23.0	23.0	23.0		23.5	21.0	3.5	17.5	
20	18.5	16.0	19.0	20.0	21.0	19.0		18.5	19.0	3.5	14.0	
22	15.5	15.0	14.5	17.0	18.5	16.0		15.5	15.0	3.5	12.0	
24	13.0	13.0	11.0	15.0	13.5	14.0		14.0	12.5	3.5	9.0	
PROMEDIO DIARIO	16.13	15.58	15.42	16.75	18.21	15.88	8.67	20.33	16.13	5.46	9.38	16.41

TEMPERATURA – ABRIL (1ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	4.5	10.0	13.0	15.5	16.0	14.0		13.0	13.0	10.0
4	4.0	8.0	9.5	12.0	14.0	13.0		11.0	12.0	9.0
6	2.5	7.0	8.0	11.0	11.0			10.5	11.0	8.0
8	2.0	7.0	6.0	9.0	10.0			9.0	10.0	7.0
10	9.5	13.0	13.0	14.0	14.5			13.0	12.0	11.0
12	17.0	20.0	18.0	22.0	16.5			19.0	14.5	16.0
14	22.0	23.0	23.0	27.0	27.0		31.5	25.0	17.0	21.5
16	24.0	23.0	27.0	29.0	29.0		29.0	26.0	19.0	21.5
18	23.0	22.0	25.0	26.5	27.5		29.0	23.0	19.0	15.0
20	19.5	18.5	23.0	22.5	18.5		16.0	20.0	16.0	13.0
22	17.0	16.0	21.0	19.0	17.5		15.5	13.0	16.0	13.0
24	15.5	14.5	18.0	19.0	16.5		16.5	13.0	13.0	12.0
PROMEDIO DIARIO	13.38	15.17	17.04	18.88	18.17	13.50	22.92	16.29	14.38	13.08

TEMPERATURA – ABRIL (2ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	12.0	16.0	15.5	17.5	16.0	16.5	17.0	21.0	18.5	18.5
4	11.0	13.5	13.5	14.0	13.0	15.5	17.0	19.0	17.5	15.0
6	11.0	11.0	11.5	13.0	13.0	14.0	11.5	15.0	17.0	13.0
8	11.0	10.5	8.0	12.0	11.0	13.0	10.5	14.0	14.0	11.0
10	12.0	13.0	12.0	12.0	16.0	18.0	16.5	19.5	16.0	16.5
12	17.0	19.0	18.0	17.0	21.5	23.0	22.5	25.0	22.0	21.5
14	22.0	22.5	23.0	25.0	26.0	26.0	27.0	27.5	26.5	26.0
16	24.0	25.0	26.0	27.5	28.0	29.0	29.5	29.0	29.5	29.0
18	22.0	25.0	26.0	26.0	28.0	29.0	30.0	29.0	24.0	27.5
20	21.0	23.0	24.0	24.0	25.0	27.5	27.0	25.5	24.0	19.5
22	20.0	17.0	22.0	20.0	21.0	22.0	21.0	23.0	20.0	17.5
24	18.0	16.0	18.0	17.0	19.0	20.0	21.0	21.5	19.0	15.0
PROMEDIO DIARIO	16.75	17.63	18.13	18.75	19.79	21.13	20.88	22.42	20.67	19.17

TEMPERATURA – ABRIL (3ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS										PROMEDIO MENSUAL
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
2	14.5	14.0	16.0	16.0	17.0	18.0	19.0	19.0	14.0	22.0	
4	14.0	12.5	13.0	12.0	15.5	15.0	18.5	17.5	14.0	20.0	
6	12.0	12.0	11.0	11.0	15.0	13.0	13.5	16.0	11.5	17.0	
8	10.0	11.0	9.5	10.0	10.0	10.0	9.5	15.0	9.5	17.0	
10	12.0	14.0	15.0	15.0	15.0	15.0	14.0	18.0	17.0	19.5	
12	17.5	18.0	21.0	22.0	22.0	22.0	21.0	23.5	24.0	26.0	
14	26.0	24.0	25.0	26.0	27.0	26.0	26.0	30.0	28.0	28.5	
16	27.0	23.5	28.0	29.0	30.0	29.0	30.0	29.0	30.0	30.0	
18	28.0	22.0	25.0	29.5	28.5	29.0	30.0	18.0	28.0	28.5	
20	15.0	20.0	22.0	25.5	23.5	26.0	29.0	20.0	27.0	25.5	
22	15.0	17.0	18.0	23.0	21.0	24.0	25.0	18.0	23.0	22.0	
24	15.0	17.0	18.0	20.5	19.5	22.0	22.0	17.0	18.0	19.5	
PROMEDIO DIARIO	17.17	17.08	18.46	19.96	20.33	20.75	21.46	20.08	20.33	22.96	18.56

TEMPERATURA – MAYO (1ª PARTE)

	DIAS									
HORA DE LECTURA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	17	15	18	18	19.5	20.5	19	18.5	19	16
4	16	13	16.5	15	16.5	18	17	17	17	14
6	14	10	13	13	13	16.5	15	15	16	14
8	12	11	12	12	13	15	14	18	18	16
10	17	18	18	18	15.5	17.5	23.5	23	23	21.5
12	23.5	24	25	25	20	22	28.5	26	27.5	26
14	27.5	28	29	29	23.5	24.5	31	30	30	28.5
16	30	30	31	30.5	27	28	32	31	31.5	28
18	29	31	30	29	29	30	27	27.8	27	24
20	26	29	27.5	27.5	27	27	23	24	23	22
22	22	23	21	24	24.5	22	21	23	16.5	20
24	18.5	20	22	21.5	23	20	21	21	16	18
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>21.04</b>	<b>21.00</b>	<b>21.92</b>	<b>21.88</b>	<b>20.96</b>	<b>21.75</b>	<b>22.67</b>	<b>22.86</b>	<b>22.04</b>	<b>20.67</b>

TEMPERATURA – MAYO (2ª PARTE)

	DIAS									
HORA DE LECTURA	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	16	17	15.8	13	17	18	17	16	14.5	18.5
4	16	16	14	10	16	17	16	15	12	13
6	11	14	12	9	14	15	14	9	11	10.5
8	14	15	12	11.5	15	17	14	11	12.5	11
10	20	19	17	18	20	21.5	19.5	17.5	19	19
12	25	22	21.5	24	24	25	24	23.5	24.5	24
14	28.5	27	26	27	27	28	27	28	28	27.5
16	29	28	28.5	28.5	29	29	30	29.5	29.5	29.5
18	29	26	27	28	28	25.5	28	29	29	27.5
20	22	21	22	20	22.5	22.5	22.5	24	24	22
22	20	18	18	19	18	20	18.5	18.5	19	18
24	18	17	17	18	18	18	17	19	19	17
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>20.71</b>	<b>20.00</b>	<b>19.23</b>	<b>18.83</b>	<b>20.71</b>	<b>21.38</b>	<b>20.63</b>	<b>20.00</b>	<b>20.17</b>	<b>19.79</b>

TEMPERATURA – MAYO (3ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS											PROMEDIO MENSUAL
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
2	15	15.5	15.5	15.5	15	12	13	15.5	14	15	16	
4	14.5	14.5	12	14.5	14	10.5	12.5	14.5	13	13	14	
6	13	12.5	13	10	12.5	10	13	14	12	11.5	12	
8	13	13	13	9	11	11	12	13	10	10	12.5	
10	17	16.5	17	14	15	13	14	14	16	17	17	
12	21.5	20.5	20	19	20.5	19	18	18.5	19	21	22	
14	24	26	23	22	24.5	23	21	21.5	22.5	25	26	
16	27	27.5	24.5	25	24.5	24.5	24	22	23.5	25.5	28.5	
18	25	25.5	25	26	23	23.5	22.5	21	24	24.5	27	
20	21	22	23	23	20.5	21	22.5	18.5	17.5	20.5	22.5	
22	19	18	18	20	13.5	18	16.5	16	17	19	16.5	
24	12	16	16	17	12	17	15.5	15	16	18	17	
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>18.50</b>	<b>18.96</b>	<b>18.33</b>	<b>17.92</b>	<b>17.17</b>	<b>16.88</b>	<b>17.04</b>	<b>16.96</b>	<b>17.04</b>	<b>18.33</b>	<b>19.25</b>	<b>19.83</b>

TEMPERATURA – JUNIO (1ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	17	13	13	12.5	14	15	16.5	16	14	14
4	15	13	12.5	13	13	14	16	15.5	13	13
6	13	13	12.5	12	13	13.5	14.5	15	13	13
8	11	13	12.5	11.5	13	13	14	13	13	13
10	18	16	14	13.5	14	17	17	16	14	16
12	22	19	17	17	18	21	21	20	19	20
14	27.5	23	15	21	22	24	23.5	22	21	22.5
16	28.5	22	20	24	24.5	25.5	26	25	23	24
18	25	19	19	23	24	24.5	18.5	18	16.5	22
20	22	16.5	14	19	18	19	18	15.5	14.5	20
22	17.5	14	13	15.5	16	18	17	15	14	18
24	16	13	12.5	15	15	17	17	14	14	17
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>19.38</b>	<b>16.21</b>	<b>14.58</b>	<b>16.42</b>	<b>17.04</b>	<b>18.46</b>	<b>18.25</b>	<b>17.08</b>	<b>15.75</b>	<b>17.71</b>

TEMPERATURA – JUNIO (2ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	16	16.5	17	16	14	15	13	13	15	16
4	16	15.5	15	15	14	13.5	13	13	14.5	15.5
6	15	14	14.5	13	13	13	13	13	13	15
8	13.5	14	14	13	11.5	13	12.5	13	13	15
10	16	19	17.5	16	14.5	15	13	14.5	16	16
12	20.5	21.5	21	20	19	17	15.5	18	19	18
14	23.5	25	25	24	22	21	18	21	22	20
16	22.5	27	28	20.5	25	21	18	22	24.5	22
18	22	26	25	23	23	21.5	15.5	19	22.5	21.5
20	20	20	19	19.5	18.5	17	14	17	20	22
22	19	19	18.5	19	16	14	14	16	18.5	16
24	17	18	17	16	16	13	13.5	16	17	16
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>18.42</b>	<b>19.63</b>	<b>19.29</b>	<b>17.92</b>	<b>17.21</b>	<b>16.17</b>	<b>14.42</b>	<b>16.29</b>	<b>17.92</b>	<b>17.75</b>

TEMPERATURA – JUNIO (3ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS										PROMEDIO MENSUAL
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
2	15.5	14.5	16	17	15	14.5	14	14	13	14	
4	15	14	15	15.5	14	14	13	13.5	13	14	
6	15	13.5	14	14	13	13	12	13	13	13	
8	15	13	13.5	13	12	13	12	13	12.5	12.5	
10	16	13.5	17	17	14.5	16	15	15.5	14	15	
12	19	17	19.5	20	19	19	19	19	18	19.5	
14	22	19.5	22.5	23	22	22.5	21.5	21	19	23	
16	24	22	25	26	23	24	22.5	22	19	20	
18	24	23	24.5	23	23	21	23	17	20	14.5	
20	14	22	22	16	18	19	19	15.5	17.5	14	
22	14.5	17	20	17	16	16.5	16	15	17	14	
24	14.5	16	18	15	15	15	15	13.5	14.5	13	
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>17.38</b>	<b>17.08</b>	<b>18.92</b>	<b>18.04</b>	<b>17.04</b>	<b>17.29</b>	<b>16.83</b>	<b>16.00</b>	<b>15.88</b>	<b>15.54</b>	<b>17.20</b>

TEMPERATURA – JULIO (1ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	12.5	13	17	14	14	14	13	14	14	15	13
4	12	13	15	13.5	13	13	12.5	14	13	14.5	12
6	12	12.5	13	12	13	12.5	11.5	13	12.5	10.5	11
8	12	11.5	12	11	12.5	11.5	11.5	12.5	11	10	9
10	13	13.5	14	14	13	13	13	13.5	12.5	15	13
12	16	18	18	19	16.5	17.5	18	16	19	19	17
14	20	22	20.5	21.5	19.5	21.5	21	19	21	21	20
16	22	24	23	23.5	21	23	22	17	21.5	21.5	24
18	19	20	22.5	21	22	17	25	20	21	21	23
20	15.5	18	20	16	15	17.5	16	14	19	19	19.5
22	14	18	17.5	15	14.5	16.5	15	14	17.5	15	16.5
24	14	17.5	15.5	14	14	14.5	15	14	16	13	15.5
PROMEDIO DIARIO	15.17	16.75	17.33	16.21	15.67	15.96	16.13	15.08	16.50	16.21	16.13

TEMPERATURA – JULIO (2ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
2	14	14	12.5	16	13	14	14.5	13	12	13.5	12
4	12.5	13	11	15	12.5	14	13.5	12	12	12	10.5
6	10	11	8.5	14	12.5	13.5	11.5	10	10	10	10
8	8	8	8	14	12	13	11	8	9	10	10
10	13	13	12.5	16	13.5	15.5	14	12	12	15	14
12	17	17.5	17	18	20	20	17.5	15	15.5	17	17
14	20.5	20.5	21	21	22	23	22	19.5	19	20.5	22
16	24	24	23	24	24	24	24	23	22	24	24
18	24	25	24	19	20	23	21.5	17	22	21	23.5
20	20.5	21	21	18.5	19.5	20	16	15.5	16	16.5	21
22	17	16	18	15	17	16	14.5	13	15.5	16	19
24	16	14	17	13.5	16	14.5	13.5	12.5	15	14	17.5
PROMEDIO DIARIO	16.38	16.42	16.13	17.00	16.83	17.54	16.13	14.21	15.00	15.79	16.71

TEMPERATURA – JULIO (3ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS									PROMEDIO MENSUAL
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
2	15	15	12	16	13.5	13.5	15.5	14	16	
4	12.5	12	12	15	13	12.5	15	14	14.5	
6	11.5	10.5	10	14	12.5	12	13.5	13.5	14	
8	10.5	10.5	11	14	11.5	11.5	13	12	14	
10	11.5	13	13	14	13	12	13	13.5	18	
12	21	16.5	17	17	17	15	17	20	21.5	
14	23.5	21	21	20.5	20	19.5	20	23	23.5	
16	24	24	24.5	22.5	22	22	23	20	25	
18	21	24	25	16.5	16	23	18	21	17	
20	15	16.4	22	14	13	20	16	19	18	
22	15	17	18.5	14	13.5	18	16	16.5	17.5	
24	15	14.5	16	14	14	16.5	15	16	15.5	
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>16.29</b>	<b>16.20</b>	<b>16.83</b>	<b>15.96</b>	<b>14.92</b>	<b>16.29</b>	<b>16.25</b>	<b>16.88</b>	<b>17.88</b>	<b>16.22</b>

TEMPERATURA – AGOSTO (1ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	14.0	12.5	11.0	12.0	10.5	11.5	13.0	13.0	15.0
4	12.5	11.0	9.0	10.0	10.0	11.0	11.0	12.0	13.0
6	12.0	10.5	8.0	8.0	8.5	11.0	11.0	11.0	12.0
8	12.0	11.0	10.0	10.0	9.0	10.5	10.0	9.0	8.5
10	12.5	13.0	15.0	15.5	13.0	13.0	13.0	13.5	13.0
12	18.0	17.0	19.0	19.5	18.0	18.0	17.5	18.0	17.5
14	20.0	21.0	22.0	24.0	22.0	21.0	21.0	22.0	21.0
16	21.0	22.0	24.5	22.5	24.0	23.0	24.0	25.0	25.0
18	13.5	18.5	22.0	16.5	18.0	23.0	25.0	22.0	23.0
20	14.0	17.0	20.0	13.0	14.0	15.0	22.0	19.0	18.0
22	14.0	15.5	17.0	14.0	13.5	15.0	18.5	17.5	17.0
24	13.5	12.0	15.0	11.5	13.0	13.5	17.5	15.0	15.0
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>14.75</b>	<b>15.08</b>	<b>16.04</b>	<b>14.71</b>	<b>14.46</b>	<b>15.46</b>	<b>16.96</b>	<b>16.42</b>	<b>16.50</b>

TEMPERATURA – AGOSTO (2ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS									
	10	11	12	13	14	15	20	21	22	23
2	15.0	12.0	16.5	16.0	16.5	15.0		13.0	12.5	12.5
4	13.0	10.0	14.0	15.0	16.0	14.0		13.0	12.5	11.5
6	11.0	10.0	12.0	14.0	13.5	12.5		12.5	12.0	10.0
8	10.0	8.5	10.0	12.5	13.5	12.0		12.5	12.0	9.0
10	13.5	12.5	13.0	13.0	13.5	11.5		14.0	14.0	13.0
12	18.5	17.0	17.0	15.5	14.5	15.5	18.0	15.0	19.0	17.5
14	20.5	20.5	21.0	18.0	19.5	18.0	22.0	16.0	21.0	22.0
16	23.5	23.0	25.0	19.0	20.5		17.0	18.0	18.5	22.0
18	26.0	25.0	25.0	22.5	21.5		16.5	16.0	18.0	19.0
20	17.0	24.0	22.0	21.0	18.5		14.0	16.0	14.0	16.0
22	17.0	17.5	17.5	19.5	16.5		14.5	14.5	13.5	15.5
24	13.0	17.5	17.5	18.5	15.0		13.0	13.0	13.0	14.0
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>16.50</b>	<b>16.46</b>	<b>17.54</b>	<b>17.04</b>	<b>16.58</b>	<b>14.07</b>	<b>16.43</b>	<b>14.46</b>	<b>15.00</b>	<b>15.17</b>

TEMPERATURA – AGOSTO (3ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS								PROMEDIO MENSUAL
	24	25	26	27	28	29	30	31	
2	13.0	14.0	14.5	13.0	13.0	13.0	15.0	14.5	
4	13.0	13.0	14.0	13.0	13.0	12.0	14.5	13.0	
6	12.0	12.0	12.0	13.0	12.0	11.0	14.0	12.0	
8	11.5	10.0	12.0	13.0	12.0	11.0	14.0	12.5	
10	14.0	14.0	14.0	17.0	16.5	15.0	17.0	16.0	
12	17.0	18.0	17.0	20.5	19.5	19.5	20.0	19.5	
14	21.0	21.0	21.0	22.0	22.0	22.0	23.0	23.0	
16	22.0	23.0	23.5	19.0	24.0	24.0	25.0	24.0	
18	20.0	22.0	24.0	16.5	24.0	21.5	21.5	17.0	
20	16.5	18.0	15.0	16.0	18.0	18.5	17.5	15.0	
22	16.0	15.0	14.0	14.5	17.0	17.0	17.0	14.5	
24	14.0	15.5	14.0	14.5	15.0	16.0	15.5	14.0	
<b>PROMEDIO DIARIO</b>	<b>15.83</b>	<b>16.29</b>	<b>16.25</b>	<b>16.00</b>	<b>17.17</b>	<b>16.71</b>	<b>17.83</b>	<b>16.25</b>	<b>16.00</b>

TEMPERATURA – SEPTIEMBRE (1ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS													
	1	2	3	4	5	10	11	12	13	14	15	16	17	18
2	13.0	14.0	14.0	14.0	14.0		14.5	12.5	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	15.0
4	13.0	13.0	14.0	13.5	14.0		14.0	12.5	14.0	13.0	13.0	13.0	14.0	13.5
6	12.5	13.0	13.5	12.5	12.0		13.0	12.0	13.0	12.0	12.0	12.0	14.0	13.0
8	13.0	13.0	12.5	12.5			13.0	11.0	11.5	12.0	12.0	11.0	13.5	13.0
10	16.0	16.5	17.0	13.5			17.0	15.0	14.0	15.0	14.0	14.0	15.0	14.0
12	19.5	20.0	21.0	17.0		19.5	19.5	19.0	19.0	18.5	16.0	17.0	19.0	18.0
14	22.0	22.5	22.5	20.5		22.0	22.0	22.0	21.0	20.0	16.5	21.0	22.0	21.0
16	22.5	24.0	23.0	23.0		24.0	23.0	24.0	23.0	21.5	19.0	22.0	23.5	23.0
18	16.5	21.0	15.5	20.0		24.0	24.0	22.5	19.0	20.5	16.0	22.0	20.0	22.0
20	16.0	18.0	16.0	15.0		19.0	12.5	16.5	15.5	17.5	16.5	18.0	16.0	17.0
22	15.0	16.0	16.0	15.0		16.0	13.0	15.0	15.0	16.0	16.0	15.0	15.5	16.0
24	15.0	14.0	15.5	14.5		15.5	12.0	14.0	14.0	14.5	14.5	15.0	16.0	15.0
PROMEDIO DIARIO	16.17	17.08	16.71	15.92	13.33	20.00	16.46	16.33	16.08	16.21	14.96	16.17	16.88	16.71

TEMPERATURA – SEPTIEMBRE (2ª PARTE)

HORA DE LECTURA	DIAS												PROMEDIO MENSUAL
	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
2	13.0	15.0	15.0	15.0	16.0	15.0	14.0	15.0	13.0	12.5	12.0	10.0	
4	14.0	13.0	14.0	14.0	14.0	15.0	13.0	15.0	12.5	12.5	12.0	10.0	
6	12.5	12.0	13.0	12.0	13.0	14.0	12.0	13.0	11.5	12.5	12.0	10.0	
8	12.0	12.0	13.0	11.0	13.0	13.0	12.0	12.0	12.0	12.5	12.0	9.5	
10	13.0	13.0	14.0	11.0	13.5	13.5	15.0	15.5	15.0	13.5	15.0	11.0	
12	17.5	18.0	18.0	16.5	17.0	22.0	20.0	20.0	19.0	17.0	16.0	12.0	
14	22.0	22.5	22.0	21.5	20.5	24.0	23.0	23.5	20.0	17.5	18.0	14.0	
16	25.0	24.0	24.5	24.0	23.0	24.0	24.0	24.5	15.5	17.0	15.0	16.0	
18	25.0	23.0	24.0	25.0	23.0	23.0	23.0	20.0	14.5	17.0	13.0	15.0	
20	20.5	19.0	21.5	19.0	22.0	18.0	19.0	17.0	14.5	15.0	12.5	15.0	
22	18.5	18.0	17.0	18.0	19.0	16.0	17.5	16.0	13.5	12.5	12.0	13.0	
24	16.0	16.0	15.0	17.0	16.0	15.5	16.0	13.5	12.5	12.5	11.0	12.5	
PROMEDIO DIARIO	17.42	17.13	17.58	17.00	17.50	17.75	17.38	17.08	14.46	14.33	13.38	12.33	16.24

TEMPERATURA – OCTUBRE (1ª PARTE)

	DIAS							
HORA DE LECTURA	1	2	3	4	5	6	7	8
2	12.0	11.0	11.0	12.5	13.5	14.5	13.0	13.0
4	11.0	9.0	11.0	12.5	10.0	14.0	13.0	13.0
6	10.5	7.5	11.0	11.5	11.0	14.0	12.0	13.0
8	9.5	8.0	11.0	11.0	8.5	13.5	12.0	13.0
10	10.5	10.0	12.0	13.0	14.0	15.0	13.0	14.0
12	16.0	15.0	16.0	17.0	18.0	18.0	16.0	17.5
14	17.0	18.0	17.5	20.0	21.0	21.0	19.5	21.5
16	20.0	20.0	19.0	22.5	22.0	21.0	22.0	22.0
18	20.0	19.5	18.5	21.5	22.0	16.0	15.0	18.0
20	17.5	16.0	16.5	18.0	19.0	15.5	14.0	16.0
22	13.5	14.5	15.0	15.0	17.0	14.0	14.5	16.0
24	13.0	12.0	13.5	14.0	15.5	13.0	14.0	15.0
PROMEDIO DIARIO	14.21	13.38	14.33	15.71	15.96	15.79	14.83	16.00

TEMPERATURA – OCTUBRE (2ª PARTE)

	DIAS							PROMEDIO MENSUAL
HORA DE LECTURA	9	10	15	16	17	18	19	
2	14.0	15.0		13.0	13.5	13.0	11.0	
4	13.5	14.0		11.5	12.5	12.0	11.0	
6	12.5	13.0		11.5	11.0	11.5	11.0	
8	12.5	13.0		11.5	11.0	12.0	10.0	
10	15.0	15.5		14.0	15.5	13.0	13.5	
12	20.0			19.0	20.0	17.0	16.0	
14	23.0			22.0	22.0	19.0	19.0	
16	25.0		23.0	19.0	22.0	20.0	21.0	
18	22.0		18.0	15.5	19.0	18.0	18.0	
20	18.5		15.0	15.5	15.0	14.5	14.0	
22	16.0		14.0	15.5	13.5	13.0	13.0	
24	15.0		13.0	14.5	13.0	12.0	11.5	
PROMEDIO DIARIO	17.25	14.10	16.60	15.21	15.67	14.58	14.08	15.18

**ANEXO B. APLICACIÓN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO PARA LIXIVIADOS**

Como ya se mencionó los procesos de tratamientos para lixiviados provenientes de rellenos sanitarios urbanos dependerán de las características del lixiviado y de la localización del relleno en menor grado.

En la tabla B.1., se mencionan la aplicación de los procesos de tratamiento y algunas observaciones a estos mismos.

Tabla B.1. Proceso y operaciones biológicas, químicos y físicos utilizados para el tratamiento de lixiviados.

<b>Proceso de tratamiento</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Observaciones</b>
Procesos biológicos		
Lodos activados	Degradación de orgánicos	Pueden ser necesarios aditivos de desespumamiento, necesario clarificador separador
Reactores de lotes secuenciados	Degradación de orgánicos	Similar a lodos activados, pero no requiere de un clarificador; solamente aplicable con tasas de flujo relativamente bajas
Estanques aireados de estabilización	Degradación de orgánicos	Requiere una gran superficie de terreno
Procesos de película fija (filtros rociadores, discos biológicos)	Degradación de orgánicos	Frecuentemente utilizado con efluentes industriales similares a los lixiviados, pero no probado con lixiviados de rellenos
Lagunas anaerobias	Degradación de orgánicos	Requisitos de energía y producción de lodos menores que en los sistemas aerobio,

Proceso de tratamiento	Aplicación	Observaciones
		mayor potencial para la inestabilidad del proceso, más lento que los sistemas aerobios.
<b>Reactores anaerobios</b>		
Nitrificación /desnitrificación	Remoción de nitrógeno	Puede llevarse a cabo simultáneamente con la separación de orgánicos
Proceso químicos		
Neutralización	Control del pH	De aplicación limitada para la mayoría de los lixiviados
Precipitación	Remoción de Sólidos suspendidos, metales y algunos aniones	Produce lodos que posiblemente requiera evacuación como residuo peligroso
Oxidación	Remoción de orgánicos; detoxificación de algunas especies inorgánicas	Funciona mejor como flujos de residuos diluidos, el uso de cloro puede provocar la formación de hidrocarburos clorados
Oxidación por aire húmero	Remoción de orgánicos	Costos, 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 de afinación
Arrastre por aire	Separación de amoníaco u orgánicos volátiles	Puede requerir equipamiento de control de la

Proceso de tratamiento	Aplicación	Observaciones
		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 la composición del lixiviados
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 inorgánicos	Costoso, necesita de un pretratamiento importante
Evaporación	Cuando no se permite la descarga de lixiviados	Los lodos resultantes pueden ser peligroso, pueden ser costos excepto en zona áridas.

**ANEXO C. SELECCIÓN ALEATORIA DEL TRACTOCAMION**

De acuerdo a los datos de cada camión se procedió a enumerarlos en orden ascendente y consecutivamente, por lo que quedaron del 1 al 194.

Para elegir aleatoriamente el camión requerido, se partió de la tabla C.1 que presenta números aleatorios. Cabe mencionar que en esta tabla aparecen 500 números de 5 dígitos y debido a que el universo de trabajo esta formado por 194 elementos (tres dígitos), se fijaron los siguientes criterios para seleccionarlos:

1. Los tres primeros dígitos
2. De arriba hacia abajo
3. De izquierda a derecha

Los números de la tabla C. 1 que cumplieron con los tres criterios de selección se muestran en el tabla C.2 y se destacan los que son menores al número de elementos existentes en el universo de trabajo (194), esto se hace para no seleccionar un número mayor, por ejemplo 198, que cumpliendo con los tres criterios de selección, no podría ser uno de los tractocamiones a utilizarse.

Tabla C.1. Números aleatorios

85967	73152	14511	85285	36009	95892	36962	67835	63314	50162
07483	51453	11649	86348	76431	81594	95858	36738	25014	15460
96283	01898	61414	83525	04231	13604	75339	11730	85423	60698
49174	12074	98551	37895	93547	24769	09404	76548	05393	96770
97366	39941	21225	93629	19574	71565	33413	56087	40875	13351
90474	41469	16812	81542	81652	45554	27931	93994	22375	00953
28599	64109	09497	76235	41383	31555	12639	00619	22909	29563
25254	16210	89717	65997	82667	74624	36348	44018	64732	93589
28785	02760	24359	99410	77319	73408	58993	61098	04393	48245
84725	86576	86944	93296	10081	82454	76810	52975	10324	15457
41059	65456	47679	65810	15941	84602	14493	65515	19251	41642

Tabla C.1. Números aleatorios

67434	41045	82830	47617	36932	46728	71183	36345	41404	81110
72766	68816	37643	19959	57550	49620	98480	25640	67257	18671
92079	46784	66125	94932	64451	29275	57669	66658	30818	58353
29187	40350	62533	73603	34075	16451	42885	03448	37390	96328
74220	17612	65522	80607	19184	64164	66962	82310	18163	63495
03786	02407	06098	92917	40434	60502	82175	04470	78754	90775
75085	55558	15520	27038	25471	76107	90832	10819	56797	33751
09161	33015	19155	11715	00551	24909	31894	37774	37953	78837
75707	48992	64998	87080	39333	00767	45637	12538	67439	94914
21333	48660	31288	00086	79889	75532	28704	62844	92337	99695
65626	50061	42539	14812	48895	11195	34335	60492	70650	51108
84380	07389	87891	76255	89604	41372	10837	66992	93183	56920
46479	32072	80083	63868	70930	89654	05359	47196	12452	38234
59847	97197	55147	76639	76971	55928	36441	95141	42333	67483
31416	11231	27904	57383	31852	69137	96667	14315	01007	31929
82065	83436	67914	21465	99605	83114	97885	74440	99622	87912
01850	42782	39202	18582	46214	99228	79541	78298	75404	63648
32315	89276	89582	87138	16165	15984	21466	63830	30475	74729
59383	42703	55198	80380	67067	97155	34160	85019	03257	78140
58089	27632	50987	91373	07736	20436	96130	73483	85332	24384
31705	57285	30392	23660	75841	21931	04295	00875	09114	32101
18914	98982	60199	99275	41967	35208	30357	76772	92656	62318
11965	94089	34803	48941	69709	16784	44642	89761	66864	62803
85251	48111	80936	81781	93248	67877	16498	31924	51315	79921
65121	95986	84844	93873	46352	92183	51152	85878	30490	15974
53972	96642	24199	58080	35450	03482	65953	49521	63719	57615
34509	16594	78883	43222	23093	58645	60257	89250	63266	90858
37700	07688	65533	72126	23611	93993	01848	03910	38552	17472
85466	59392	72722	15473	73295	49759	56157	60477	83284	56367
52969	55863	42312	67842	05673	91878	82736	36563	79540	61940
42744	68315	17514	02878	97291	74851	42725	57894	81434	62041

Tabla C.1. Números aleatorios

26140	13336	67726	61876	29971	99294	96664	52817	90039	53211
95589	56319	14563	24071	06916	59555	18195	32280	79367	04224
39118	13217	59999	49952	83021	47709	53105	19295	88318	41626
41392	17622	18994	98283	07249	52289	24209	91139	30715	06604
54684	53645	79246	70183	87731	19185	08541	33519	07223	97413
89442	61001	36658	57444	95388	36682	38052	46719	09428	94012
36751	16778	54588	15357	68003	43564	90976	58904	40512	07725
06159	02564	21416	74944	53049	88749	02865	25772	89853	88714

Tabla C.2. Números aleatorios seleccionados

85967	73152	14511	85285	36009	95892	36962	67835	63314	50162
07483	51453	11649	86348	76431	81594	95858	36738	25014	15460
96283	01898	61414	83525	04231	13604	75339	11730	85423	60698
49174	12074	98551	37895	93547	24769	09404	76548	05393	96770
97366	39941	21225	93629	19574	71565	33413	56087	40875	13351
90474	41469	16812	81542	81652	45554	27931	93994	22375	00953
28599	64109	09497	76235	41383	31555	12639	00619	22909	29563
25254	16210	89717	65997	82667	74624	36348	44018	64732	93589
28785	02760	24359	99410	77319	73408	58993	61098	04393	48245
84725	86576	86944	93296	10081	82454	76810	52975	10324	15457
41059	65456	47679	65810	15941	84602	14493	65515	19251	41642
67434	41045	82830	47617	36932	46728	71183	36345	41404	81110
72766	68816	37643	19959	57550	49620	98480	25640	67257	18671
92079	46784	66125	94932	64451	29275	57669	66658	30818	58353
29187	40350	62533	73603	34075	16451	42885	03448	37390	96328
74220	17612	65522	80607	19184	64164	66962	82310	18163	63495
03786	02407	06098	92917	40434	60502	82175	04470	78754	90775
75085	55558	15520	27038	25471	76107	90832	10819	56797	33751
09161	33015	19155	11715	00551	24909	31894	37774	37953	78837
75707	48992	64998	87080	39333	00767	45637	12538	67439	94914

Tabla C.2. Números aleatorios seleccionados

21333	48660	31288	00086	79889	75532	28704	62844	92337	99695
65626	50061	42539	14812	48895	11195	34335	60492	70650	51108
84380	07389	87891	76255	89604	41372	10837	66992	93183	56920
46479	32072	80083	63868	70930	89654	05359	47196	12452	38234
59847	97197	55147	76639	76971	55928	36441	95141	42333	67483
31416	11231	27904	57383	31852	69137	96667	14315	01007	31929
82065	83436	67914	21465	99605	83114	97885	74440	99622	87912
01850	42782	39202	18582	46214	99228	79541	78298	75404	63648
32315	89276	89582	87138	16165	15984	21466	63830	30475	74729
59383	42703	55198	80380	67067	97155	34160	85019	03257	78140
58089	27632	50987	91373	07736	20436	96130	73483	85332	24384
31705	57285	30392	23660	75841	21931	04295	00875	09114	32101
18914	98982	60199	99275	41967	35208	30357	76772	92656	62318
11965	94089	34803	48941	69709	16784	44642	89761	66864	62803
85251	48111	80936	81781	93248	67877	16498	31924	51315	79921
65121	95986	84844	93873	46352	92183	51152	85878	30490	15974
53972	96642	24199	58080	35450	03482	65953	49521	63719	57615
34509	16594	78883	43222	23093	58645	60257	89250	63266	90858
37700	07688	65533	72126	23611	93993	01848	03910	38552	17472
85466	59392	72722	15473	73295	49759	56157	60477	83284	56367
52969	55863	42312	67842	05673	91878	82736	36563	79540	61940
42744	68315	17514	02878	97291	74851	42725	57894	81434	62041
26140	13336	67726	61876	29971	99294	96664	52817	90039	53211
95589	56319	14563	24071	06916	59555	18195	32280	79367	04224
39118	13217	59999	49952	83021	47709	53105	19295	88318	41626
41392	17622	18994	98283	07249	52289	24209	91139	30715	06604
54684	53645	79246	70183	87731	19185	08541	33519	07223	97413
89442	61001	36658	57444	95388	36682	38052	46719	09428	94012
36751	16778	54588	15357	68003	43564	90976	58904	40512	07725
06159	02564	21416	74944	53049	88749	02865	25772	89853	88714

Una vez obtenido todos los números que representan los tractocamiones dentro del universo de los números aleatorios, se contabilizó la frecuencia de la presencia de dichos camiones dentro de los números aleatorios, tal como se muestra en la tabla C.3.

Tabla C.3. Frecuencia del número de tractocamión en los números aleatorios

# de tractocamión	frecuencia en los números aleatorios	# de tractocamión	frecuencia en los números aleatorios	# de tractocamión	frecuencia en los números aleatorios
5	1	72	2	144	1
6	1	73	1	145	2
7	1	74	1	148	1
8	1	76	1	153	1
9	1	77	2	154	3
10	1	85	1	155	1
18	3	91	2	159	3
24	1	94	3	161	1
25	1	100	1	164	2
27	1	103	1	165	1
28	2	108	2	167	2
32	1	111	1	168	1
34	2	112	1	174	1
37	1	116	1	175	1
39	1	117	2	176	2
42	3	119	1	181	2
43	1	120	1	185	1
44	1	124	1	186	1
53	2	125	1	189	2
56	1	126	1	191	3
60	1	132	1	192	2
61	1	133	2		
66	1	136	1		
69	1	143	1		

De la tabla C.3. se extrajeron los números que mayor frecuencia tuvieron, presentándose los siguientes con igual número de veces (3):

18	94	42
154	159	191

De estos seis posibles se seleccionó el primer tractocamión que se presentara en las instalaciones de Bordo Poniente, debido al tiempo disponible para realizar el muestreo y llenado de los lisímetros. Del cual resultó que el tractocamión seleccionado es perteneciente a la Delegación Coyoacán.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

1. **Amokrane et al, 1997.** A. Amokrane, C. Comel and J. Veron, Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation. *Water Res* **31** 11 (1997), pp. 2775–2782. SummaryPlus | Full Text + Links | PDF (673 K) | Abstract + References in Scopus | Cited By in Scopus
2. **Aparicio M., 1998.** Fundamentos de hidrología de superficie. Edit. Limusa. México, D.F.
3. **ASCE, 2004.** Disponible en: [www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/curso/aseourba/aseourba.html](http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/curso/aseourba/aseourba.html) - 101k
4. **Bertanza G., 2002.** Landfill Leachate recirculation: technical-economic evaluation of intermediate nitrification. Department of Civil Engineering. Faculty of Engineering. University of Brescia Via Branze, 38, 25123 Brescia, Italy.
5. **Castany, F., 1971.** Tratado práctico de las aguas subterráneas. México.
6. **Caterpillar, 2003.** Articulated Trucks, MEXTRAC - Catálogos técnicos.
7. **Chian and De Walle, 1976.** Sanitary landfill leachates and their treatment, *JSED* 102, (EE2) 411.
8. **Chugh et. al, 1997.** Chugh, S.; Clarke, W.; Pullammanappallil, P.; Rudolph, V. Effect of recirculated leachate volume on MSW degradation. The Univ of Queensland, St Lucia, Australia
9. **Chun Man Lee et al, 2002.** Chun Man Lee, Xue Rui Lin, Chong Yu Lan, Samuel Chun Lap Lo, and Gilbert Yuk Sing Chan. Evaluation of Leachate Recirculation on Nitrous Oxide Production in the Likang Landfill, China. *J. Environmental*, Vol. 31, September–October 2002
10. **Civil Infrastructure, 2004.** Leachate Recirculation System Pays for itself. Leachator Pumping systems, Inc. Cumming, GA. USA. Disponible en [www.leachator.com](http://www.leachator.com)
11. **Cossu et al, 1989.** Cossu Raffaello, Stegmann Rainer and Christensen Thomas H., "Landfilling of waste: leachate". Cossu-Stegmann-Christensen, Edit. Academic Press
12. **Cossu et al, 1989.** Cossu Raffaello, Stegmann Rainer and Christensen Thomas H, "Sanitary landfilling: process, technology and environmental impact", Edit. Academic Press.

13. **Cossu et al, 1989a.** Cossu R., Stegmann R., Andreottola G and Cannas P., "Biological Treatment, landfilling: process, technology and environmental impact". Edit. Academic Press
14. **D. Reinhart and A.B. Al-Yousfi, 1996.** The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics. Waste Manage. Res. 14, pp. 337–346.
15. **El Fadel M, 1997.** Leachate Recirculation effects on settlement and biodegradation rates in msw landfills. American University of Beirut, Department of Civil and environmental Engineering 850. Third Avenue, New York 10022.
16. **Espinace et. al, 1997:** Espinace A., J. Palma G., M. Szanto N, C. Schiappacasse D., R. Chamy M. Asentamientos en un vertedero controlado a escala con recirculación de líquidos lixiviados. Chile
17. **Espinace et. al, 1996:** Espinace .A.C., Palma G.J.H. y Padilla L.L.P. Aplicación de líquidos lixiviados tratados a residuos sólidos urbanos, evaluación del efecto en la velocidad de los procesos de degradación y en los asientos. Chile
18. **Espinoza et al, 2002.** Espinoza Carlos, Carola Olivares y Ana María Sancha. Estudio experimental y numérico de la generación de líquidos percolados en un relleno sanitario. Universidad de Chile Departamento de Ingeniería Civil.
19. **FEMISCA, 1996.** Manual de diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios
20. **Juárez et al, 1998.** Juárez Badillo y Rico Rodríguez. Mecánica de Suelos. Tomo 1. Fundamentos de mecánica de suelos. Edit. Limusa.
21. **Hans Jurgen –Ehrig, 1989.** Physicochemical Treatment. ITW Ingenieurberatung GMBH, Erich – Norrenberg Strasse 5. D-5860 Iserlohn, West Germany.
22. **Hernández, 2001.** Recirculación de lixiviados en Rellenos Sanitarios. Una alternativa viable. Publicación 79. Universidad Tecnológica de Panamá.  
  
Disponible en: <http://www.utp.ac.pa/universal/79.htm>
23. **INE, 2002.** Periférico 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco, C.P. 04530, Delegación Coyoacán, México D.F. Última Actualización: 27/08/2002.

Disponible

en:

[http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/133/sistemas.html?id\\_pub=133](http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/133/sistemas.html?id_pub=133)

24. **INTI, 2005.** Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Edición Número 3, Marzo 2005. Iniciativa energética en Olavaria. Proyecto de Recuperación de Biogás del Relleno Sanitario. Buenos Aires, Argentina. Disponible en: <http://www.inti.gov.ar/sabercomo/sc26/inti4.php>
25. **IVEX, 2004.** Instituto Valenciano de la Exportación. México 2003 Disponible en: [http://www.ivex.es/NuevaWeb/webIvex.nsf/0/B496B92DF6536CDCC1256D56002840C3/\\$File/Mexico.MedioAmbienteResiduos.pdf?OpenElement](http://www.ivex.es/NuevaWeb/webIvex.nsf/0/B496B92DF6536CDCC1256D56002840C3/$File/Mexico.MedioAmbienteResiduos.pdf?OpenElement)
26. **Khanbilvardi et al, 1996.** Khanbilvardi, R., Ahmed, S., Gleason, P. Flow Investigation for Landfill Leachate (FILL). Journal of Environmental Engineering, Vol 121.
27. **Monge I. and Orta de Velásquez, 2004.** Removal and transformation of recalcitrant organic mater from stabilized landfill leachates by coagulation ozonation coupling process” Water Research.
28. **Mongomery 1991.** Diseño y Análisis de Experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica. 1991.
29. **Orta L. de V. T. et al 2003.** Orta L. de V. Ma. Teresa, Cruz Rivera Reynaldo, Rojas Valencia Neftali y Sánchez Gómez Jorge. “Serial water balance method for predicting leachate generation in landfills”. Waste Management & Research. Official Journal of ISWA. The International Solid Waste Association.
30. **Palma, et. al, 1999.** Palma J., Espinace R., Valenzuela P., Szanto M. Reducción de los tiempos de estabilización en rellenos sanitarios operados con recirculación de lixiviados tratados, Universidad Católica de Valparaíso. XII Congreso de Ingeniería sanitaria y ambiental, AIDIS – Chile, Antofagasta.
31. **Peck, et al 1957.** Peck R.B., Hanson, W.E. y Thornburn, T.H. Foundation Engineering. Capítulo 14. John Wiley and Sons.
32. **Qasim RS et al, 1994.** Qasim RS, Chiang W. Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment. Lancaster, Pennsylvania, Technomic Publ.
33. **Sánchez, 1995.** Lineamientos Técnicos para el diseño racional y confiable de rellenos sanitarios, Dirección Técnica de Desechos Sólidos, XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria. México, D.F.
34. **Schroeder et al, 1994.** Schroeder, P.R., Dozier, T.S., Zappi, P.A., Mc Enroe, B.M. Sjostrom, J.M. and Peyton, R.L. The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP)

- model: engineering documentation for version 3. EPA/600/9-94/168b. U.S. Environmental Protection Risk Reduction Engrg. Lab. Cincinnati, Ohio.
35. **Sotelo, 2000.** Apuntes de Hidráulica II. Facultad de Ingeniería. UNAM
36. **Sponza D. T. y Nuri Un Da O, 2003.** El impacto de la recirculación de lixiviados y recirculación de volumen en la estabilización de residuos sólidos municipales en simulaciones de bioreactores anaerobios. Sección de la Ingeniería Ambiental, La Dokuz Eylül Universidad, Buca Kaynaklar Campus.
37. **SSA, 2002.** Primer diagnostico Nacional de Salud Ambiental y ocupacional. Comisión Federal para la protección contra riesgos sanitarios. Dirección General de Salud Ambiental. Secretaría de Salud
38. **Suna A. E. and Onay T.T., 2003.** Accelerated landfill waste decomposition by external leachate recirculation from an old landfill cell. Water Science and Technology. Vol 47 No. 12 pp 215 – 222. IWA.
39. **Tchobanoglous et. al, 1982.** Tchobanoglous George, Theisen Hilary, "Integrated Solid Waste Management", Engineering Principles and Management Issues, Mc. Graw-Hill International Editions
40. **Thorntwaite, C.W., et al 1943-44.** "Report of the Comitee on transpiration and evaporation", Trans. Am. Geooh, Union, V 25, part V, pp 683-693.
41. **Zepeda, 1993.** Descripción de la legislación estadounidense sobre rellenos sanitarios. División de salud y ambiente. OPS/OMS
42. **Visvanathan C. et al, 2002.** C. Visvanathan, J. Trankler, P. Kuruparan and Q. Xiaoning. Effects of monsoon conditions on generation and composition of landfill leachate – lysimeter experiments with various input and design features. Asian Institute of Technology, EEM SERD, Pathumthani 12120. Thailand.
43. PAGINAS WEB
- <http://www.epa.gov/>>
  - <http://www.ecoweb-la.com/notas/gen/635.htm>>
  - <http://ing.unlp.edu.ar/bibcent/hiprog/hi101.htm>>
  - <http://mexico.web.com.mx/Ecología>>

- <http://www.amcrespac.org.mx/>
- <http://www.municipalidadcuenca.gov.ec/EMAC/RellenosSanitarios.htm>>

#### 44. Normas oficiales

- **NOM-015-1985.** Protección al ambiente - contaminación del suelo - residuos sólidos municipales - muestreo - método de cuarteo.
- **NOM-SEMARNAT-083-2003.** Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo y clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
- **PROY-NOM-ECOL-084-1994.** Que establece los requisitos para el diseño de un relleno sanitario y la construcción de sus obras complementarias.
- **PROY-NOM-140-SEMARNAT-2003.** Que establece los requisitos ambientales generales para campos de golf y desarrollos inmobiliarios que los incluyan. Apéndice A y B. Descripción del Método del Balance de Agua de C. W. Thorntwaite para el Cálculo del Índice de Infiltración. Publicada en el diario oficial el 23 de julio de 2003.