



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**GUÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS PARA
RELLENOS SANITARIOS DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES**

Smaily Enrique Hernández Gil

Asesorado por el MSc. Ing. Joram Matías Gil Larroj

Guatemala, octubre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GUÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS PARA
RELLENOS SANITARIOS DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

SMAILY ENRIQUE HERNÁNDEZ GIL

ASESORADO POR EL MSC. ING. JORAM MATÍAS GIL LAROJ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

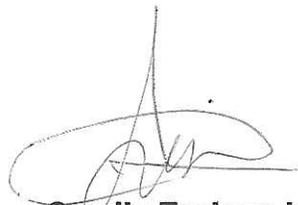
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Gordillo García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

GUÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS PARA RELLENOS SANITARIOS DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 19 de septiembre de 2016.



Smaily Enrique Hernández Gil



FACULTAD DE INGENIERIA



Guatemala, 18 de agosto del año 2017

Ingeniero
Luis Manuel Sandoval Mendoza
Coordinador del Área de Hidráulica.
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos
Presente:

Estimado Ingeniero Sandoval

Por este medio manifiesto que he revisado el trabajo de graduación del estudiante universitario de la carrera de Ingeniería Civil Smaily Enrique Hernández Gil con carné 2012-13112 titulado **"GUÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE OBRAS HIDRAULICAS PARA RELLENOS SANITARIOS DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES"**. Tema que fue aprobado por la Escuela de Ingeniería Civil el 19 de septiembre de 2016.

Después de haber hecho las respectivas correcciones de dicho trabajo doy mi aprobación y asumo toda responsabilidad de lo descrito en este documento por ser coautor del mismo. Por lo tanto, solicito que se continúe con los trámites respectivos para su aprobación por parte de las autoridades de la Facultad de Ingeniería.

Atentamente:

MSc. Ing. Joram Gil Laroj.
Cátedra UNESCO para la Sostenibilidad
de los Recursos Hídricos
ERIS-USAC
Asesor.

Joram Matías Gil Laroj
INGENIERO CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA SANITARIA
MAESTRÍA EN LIDERAZGO ORGANIZACIONAL
Colegiado 2318



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala, 04 de septiembre de 2017

Ingeniero

Hugo Leonel Montenegro Franco

Director Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero

Le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado "GUIA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS PARA RELLENOS SANITARIOS DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES", desarrollado por el estudiante de ingeniería civil Smaily Enrique Hernández Gil, quien contó con la asesoría del ingeniero Joram Matías Gil Laroj.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y habiendo cumplido con los objetivos doy mi aprobación al mismo, solicitando darle el tramite respectivo.

Sin otro particular, me despido atentamente.

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
Jefe del Departamento de Hidráulica



Mas de 136 años de Trabajo y Mejora Continua



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Joram Matías Gil Laroj y de la Coordinadora de E.P.S. Inga. Christa del Rosario Classon de Pinto, al trabajo de graduación del estudiante Smaily Enrique Hernández Gil titulado **GUIA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS PARA RELLENOS SANITARIOS DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES** da por éste medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Monteregro Franco



Guatemala, octubre 2017

/mrrm.



Universidad de San Carlos
de Guatemala

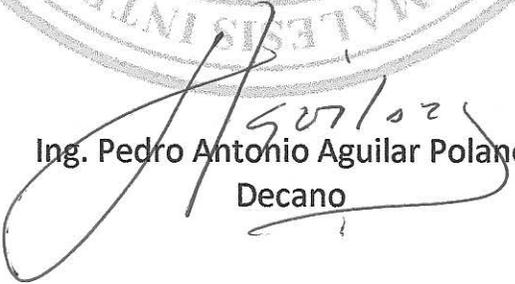


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 460.2017

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **GUÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE OBRAS HIDRÁULICAS PARA RELLENOS SANITARIOS DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES**, presentado por el estudiante universitario: **Smaily Enrique Hernández Gil**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por brindarme la sabiduría, la dedicación y la fortaleza.
Mis padres	Enrique Hernández y Gloria Gil, por ser un gran apoyo, por comprenderme y brindarme su amor incondicional
Mi hermana	Madelyn Hernández, por ser parte importante en mi vida, estar siempre pendiente de mí, y brindarme su cariño
Mis amigos	Por cada momento compartido.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por haberme permitido realizar mis estudios y formado profesionalmente
Mi asesor	Joram Gil, por ser una guía, y por compartir sus conocimientos.
A todas las personas	Que de una u otra forma contribuyeron para la realización de este logro. Gracias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. PARÁMETROS SANITARIOS E HIDROLÓGICOS PARA UN RELLENO SANITARIO	1
1.1. Saneamiento	1
1.2. Residuos y desechos sólidos	3
1.2.1. Residuos sólidos.....	3
1.2.2. Desechos sólidos.....	3
1.2.3. Clasificación de los residuos y desechos sólidos por su origen.....	4
1.2.3.1. Residuos sólidos municipales.....	4
1.2.3.2. Residuos sólidos industriales.....	4
1.2.3.3. Residuos sólidos mineros.....	5
1.2.3.4. Desechos sólidos hospitalarios.....	5
1.2.3.5. Desechos sólidos peligrosos	5
1.2.4. Impacto de los residuos y desechos sólidos.....	6
1.3. Caracterización de los residuos sólidos municipales.....	7
1.3.1. Composición.....	7
1.3.2. Producción per cápita.....	7
1.3.3. Producción Total.....	8

1.4.	Rellenos sanitarios	9
1.4.1.	Definición.....	9
1.4.2.	Clasificación de rellenos sanitarios	9
1.4.2.1.	Relleno sanitario mecanizado	9
1.4.2.2.	Relleno sanitario semi mecanizado	10
1.4.2.3.	Relleno sanitario manual	10
1.4.3.	Métodos de construcción de rellenos sanitarios	11
1.4.3.1.	Método de trinchera o zanja	11
1.4.3.2.	Método de área	12
1.4.3.3.	Método de cañón o terraza.....	14
1.4.4.	Componentes de un relleno sanitario	15
1.4.4.1.	Deposito del relleno.....	15
1.4.4.2.	Base impermeable	15
1.4.4.3.	Drenaje de lixiviados	15
1.4.4.4.	Tratamiento de lixiviados.....	16
1.4.4.5.	Celdas diarias.....	16
1.4.4.6.	Chimenea para ventilación de biogás ..	16
1.4.4.7.	Cobertura superior	16
2.	HIDROLOGÍA EN RELLENOS SANITARIOS.....	19
2.1.	Balance hídrico	19
2.1.1.	Lixiviados.....	20
2.2.	Caudales de diseño.....	21
2.3.	Parámetros a considerar en obras hidráulicas en un relleno sanitario (residuos sólidos municipales).....	23
2.3.1.	Sistema de captación y extracción de lixiviados.....	23
2.3.2.	Sistema de tratamiento de lixiviados	23
2.3.3.	Sistema de captación de agua pluvial	24

2.4.	Características que influyen en el diseño de obras hidráulicas	25
2.4.1.	Características climatológicas	25
2.4.2.	Características geológicas.....	25
2.4.3.	Características hidrogeológicas.....	25
3.	PARÁMETROS HIDROLÓGICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES EN UN RELLENO SANITARIO	27
3.1.	Cálculo del balance hídrico.....	27
3.2.	Cálculo de caudales del drenaje de lixiviados	29
3.3.	Cálculo de caudales para el tratamiento en zanjas de oxidación	30
3.4.	Cálculo de caudales para obras perimetrales.....	31
4.	DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DE OBRAS PARA LOS LIXIVIADOS	33
4.1.	Dimensionamiento de tuberías de lixiviados.....	33
4.2.	Descripción del sistema de drenaje para lixiviados	34
4.2.1.	Colocación del drenaje del relleno sanitario	35
5.	DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS	37
5.1.	Cálculo de pileta de oxidación de lixiviados (tratamiento)	37
6.	DISEÑO DEL CANAL PLUVIAL PERIMETRAL DEL RELLENO SANITARIO.....	39
6.1.	Cálculo del drenaje pluvial externo	39

7.	ESPECIFICACIONES DE MATERIALES Y OBRAS COMPLEMENTARIAS PARA OBRAS HIDRÁULICAS.....	41
7.1.	Obras complementarias recomendadas.....	41
7.1.1.	Sistema de impermeabilización del relleno	41
7.1.2.	Sistema de captación y extracción de biogás.....	42
7.2.	Especificaciones de materiales	43
7.2.1.	Geomembrana	43
7.2.2.	Drenaje de gases	43
7.2.3.	Cubierta de zanja de relleno de desechos comunes.....	44
7.3.	Requerimientos del manual de operación y mantenimiento del relleno sanitario	44
8.	EJEMPLO DE DIMENSIONAMIENTO COMO PROPUESTA PARA MUNICIPIO DE SAN LUCAS.....	47
8.1.	Información general del área del relleno sanitario.....	47
8.2.	Información del diseño del relleno sanitario	48
8.3.	Producción per cápita.....	49
8.4.	Proyección de la producción total	49
8.5.	Producción total	50
8.6.	Cálculo de volumen de residuos sólidos	51
8.6.1.	Volumen diario compactado	51
8.6.2.	Volumen anual compactado	52
8.6.3.	Volumen anual estabilizado.....	52
8.7.	Volumen requerido para el relleno sanitario durante su vida útil.....	52
8.8.	Dimensionamiento y cálculo de las áreas requeridas en el terreno.....	55
8.9.	Personal operativo del relleno sanitario	56

8.10.	Tiempo de excavación de plataformas con maquinaria.....	60
8.11.	Hidrología para determinación de caudales	61
8.11.1.	Cálculo del caudal para tuberías de lixiviados	61
8.11.2.	Cálculo del caudal para planta de tratamiento.....	64
8.11.3.	Cálculo del caudal para canales perimetrales	65
8.12.	Dimensionamiento de obras hidráulicas	69
8.12.1.	Dimensionamiento de las tuberías de drenaje para lixiviados	69
8.12.2.	Dimensionamiento de la planta de tratamiento de lixiviados	71
8.12.3.	Cálculo y diseño de los canales perimetrales en el relleno sanitario.....	72
CONCLUSIONES		77
RECOMENDACIONES.....		81
BIBLIOGRAFÍA.....		83
APÉNDICES		87
ANEXOS		113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Método de trinchera o zanja.....	12
2.	Método de área.....	13
3.	Método de cañón.....	14
4.	Diagrama de un relleno sanitario.....	17
5.	Producción de lixiviados.....	21
6.	Ubicación del terreno, San Lucas Sacatepéquez, Sacatepéquez.....	48
7.	Curvas de intensidad, duración & frecuencia IDF, estación Alameda ICTA.....	66
8.	Hietograma para discretización a cada 5 minutos.....	69
9.	Ejemplo de cálculo para el canal 1, tramo 1.1.....	74

TABLAS

I.	Producción de residuos sólidos en ciudades de América Latina y el Caribe de acuerdo a su población.....	8
II.	Valores del coeficiente de escurrimiento, <i>CE</i> , para suelos cubiertos con pasto.....	28
III.	Capacidad de campo de varios suelos y residuos sólidos.....	29
IV.	Volumen total ocupado durante la vida útil del relleno sanitario.....	54
V.	Áreas y tiempo de llenado de cada plataforma.....	56
VI.	Operación y rendimiento de mano de obra del relleno sanitario.....	57
VII.	Días de trabajo en excavación de plataformas.....	60

VIII.	Precipitación y evotranspiración mensual, estación Florencia	62
IX.	Balance hídrico para determinar los lixiviados, estación Florencia	65
X.	Hietograma para la discretización a cada 5 min de un período de retorno de 100 años, tiempo de concentración de 100 minutos	68
XI.	Cotas y caudal de tubería de drenaje de lixiviados.....	70
XII.	Relación entre de tuberías a sección llena y a sección parcial.....	70
XIII.	Velocidades, diámetros y numero de Froude de cada nivel del relleno sanitario	71
XIV.	Volumen y área mensual de lixiviados, estación Florencia.....	72
XV.	Caudales, longitudes y altura de los canales del relleno sanitario.....	73
XVI.	Cálculo de dimensiones, velocidades y núm. Froude para los tramos del canal 1	75
XVII.	Cálculo de dimensiones, velocidades y núm. Froude para los tramos del canal 2	75
XVIII.	Cálculo de dimensiones, velocidades y núm. Froude para los tramos del canal 3	75
XIX.	Cálculo de dimensiones, velocidades y núm. Froude para los tramos del canal 4	76

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
d	Diámetro
ETo	Evotranspiración
gr/m²	Gramos por metro cuadrado
<i>i</i>	Intensidad de precipitación
Kg/cm²	Kilogramo por centímetro cuadrado
Kg/año	Kilogramo por año
Kg/día	Kilogramo por día
Kg/hab/día	Kilogramo por habitante por día
Lb/plg²	Libra por pulgada cuadrada
psi	Libra por pulgada cuadrada
lt/seg	Litro por segundo
m	Metro
m³/m²	Metro
m/s	Metro por segundo
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cubico

m³/año	Metro cubico por año
m³/día	Metro cubico por día
m³/s	Metro cubico por segundo
mm	Milímetro
mm/h	Milímetros por hora
mm/mes	Milímetros por mes
mm/año	Milímetros por año
min	Minuto
T_r	Período de retorno
PPC	Persona por día
PVC	Policloruro de vinilo
%	Porcentaje
p	Precipitación
μ	Prefijo Micro que indica el factor de 10 ⁻⁶
”	Pulgada
q	Caudal
Σ	Sumatoria
UV	Radiación ultravioleta

GLOSARIO

CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
ERIS	Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos.
Escorrentía	Corriente de agua que se vierte al rebasar su depósito o cauce naturales o artificiales
Evapotranspiración	Cantidad de agua del suelo que vuelve a la atmosfera como consecuencia de la evaporación y la transpiración de las plantas
IDF	Intensidad-duración-frecuencia.
Celda	Unidad básica de construcción del relleno sanitario, está constituida por la cantidad de basura que se entierra.

RESUMEN

Comprendiendo la problemática de salud nacional, se pretende que la guía desarrollada sea útil para instituciones públicas y privadas que deseen planificar proyectos de saneamiento en rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales, incluyendo conceptos y ampliando definiciones sobre los componentes de un relleno sanitario y sus obras hidráulicas.

Se toma en consideración la precipitación, evapotranspiración y la capacidad de infiltración de los suelos en los estudios para determinar caudales que servirán en el cálculo de diseño y dimensionamiento de obras hidráulicas en un relleno sanitario de residuos sólidos municipales. De esta manera se evita la manipulación inadecuada de residuos, su colocación en lugares donde tengan contacto con ríos o con el manto freático y afecten la salud de la población.

Tomando en cuenta que no hay normas para disponer los líquidos que emanan de los rellenos sanitarios, también se desarrollan criterios y parámetros para su debido tratamiento y control.

Las obras hidráulicas que se diseñarán y dimensionarán en la siguiente guía son: tuberías de recolección ubicadas en la base de las celdas o plataformas para conducir el lixiviado producido por la descomposición de los residuos sólidos y el agua que infiltra sobre ellas; zanjas de oxidación o pileta de oxidación de lixiviados para dar tratamiento a los líquidos evacuados desde el relleno; y canales perimetrales de desvío de agua de escurrimiento pluvial.

Esta guía da un ejemplo sobre un proyecto de relleno sanitario. En ella, se calcula las obras hidráulicas para un relleno sanitario semi mecanizado, con el método tipo cañón para una región en San Lucas. El lugar elegido carece de servicio de tratamiento de residuos sólidos producidos y su terreno presenta grandes pendientes.

OBJETIVOS

General

Desarrollar una guía para realizar estudios hidrológicos para el dimensionamiento de obras hidráulicas en los diseños de rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales.

Específicos

1. Proponer parámetros técnicos para la elaboración del balance hídrico en un relleno sanitario.
2. Determinar los caudales de diseño a través de la hidrología del lugar.
3. Determinar y evaluar las obras hidráulicas más usadas en rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales.
4. Calcular y dimensionar obras hidráulicas de un relleno sanitario que sirvan para coleccionar, aislar y tratar líquidos lixiviados producidos por los procesos de confinamiento.
5. Calcular obras hidráulicas para el drenaje pluvial de los rellenos sanitarios
6. Proporcionar un ejemplo guía con los estudios hidrológicos que conlleven a dimensionar obras hidráulicas en un relleno sanitario.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo aborda los componentes hidráulicos de un relleno sanitario de residuos sólidos municipales, sus componentes hidráulicos y la importancia de su tratamiento. Se explicaron las ecuaciones para calcular los caudales para diseñar las obras hidráulicas: tubería de lixiviados, pileta de oxidación de lixiviados, y canales perimetrales para agua pluvial.

El cálculo del caudal de las tuberías de lixiviados y el volumen que se tratará en la pileta de oxidación de lixiviados se realiza con base en el balance hídrico del lugar donde se encuentra el relleno sanitario, tomando en consideración el área crítica de las plataformas formadas por la compactación de los residuos sólidos y tomando en consideración un terreno que fuera crítico para el diseño de las obras hidráulicas

Entre los factores que influyen en el diseño de obras hidráulica en rellenos esta la intensidad de lluvia. Por esta razón se utiliza la estación más cercana para determinar la intensidad de lluvia con el cual se calcula el caudal que tendrán que drenar los canales perimetrales.

Se elaboró un ejemplo demostrativo del diseño de las obras hidráulicas de un relleno sanitario de residuos sólidos municipales donde se usa el método tipo cañón. Este es el método más crítico para el dimensionamiento de los drenajes de lixiviados y canales pluviales. Para ello, se tomaron cuenta todos los factores que influyen en su diseño y los elementos que lo conforman, como la topografía, hidrología del lugar y área disponible.

1. PARÁMETROS SANITARIOS E HIDROLÓGICOS PARA UN RELLENO SANITARIO

Se empieza definiendo los parámetros de saneamiento, las características y clasificación de los residuos y desechos que intervienen en el diseño de un relleno sanitario. También se describen los tipos de relleno sanitarios de residuos sólidos municipales y sus componentes.

1.1. Saneamiento

Son acciones que aseguran las condiciones sanitarias básicas para la preservación, recuperación y desarrollo de la salubridad en una comunidad. El saneamiento contribuye al correcto manejo del agua potable, aguas residuales, residuos sólidos y el comportamiento higiénico que reduce riesgos en la salud y previene la contaminación.

El saneamiento también comprende el conjunto de obras, técnicas y especificaciones de salud para mitigar la contaminación, manteniendo o mejorando las condiciones sanitarias de una población. Estas condiciones sanitarias son un buen manejo del agua potable (cuerpos de agua), aguas no tratadas (aguas residuales y lixiviados), residuos y desechos sólidos (orgánicos e inorgánicos) y el comportamiento de higiene que reduce los riesgos de la salud mejorando la calidad vida de las personas.

Entre las obras de saneamiento, cuya función es el tratamiento de los residuos sólidos, y su aislamiento en un sitio de disposición final, el más común es el relleno sanitario, que utiliza la metodología de enterrar y cubrir los

residuos para que se descompongan. Este método brinda tratamiento antes de su confinamiento y después de él. Con ello, mitiga los riesgos de contaminación al medio ambiente.

Existen rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales, industriales, mineros y desechos hospitalarios, entre otros. Cada residuo o desecho requiere de un tratamiento específico. Sin embargo, el método de confinamiento por medio del enterramiento, en general, es parecido para los diferentes tratamientos.

Las obras de saneamiento construidas en un relleno sanitario consisten en trincheras, celdas o plataformas de 2 a 6 metros de profundidad (dependiendo de la topografía donde se ubique). Estas trincheras, celdas o plataformas tienen en su infraestructura tuberías colocadas de forma que puedan drenar lo lixiviados (líquido producido por la descomposición y compactación de los residuos). Los lixiviados son drenados hacia una tubería principal que envía el líquido hacia una planta de tratamiento u otro método de tratamiento especializado para este líquido, que es altamente contaminante. En el perímetro de las trincheras, celdas o plataformas se colocan canales que captan el agua pluvial proveniente de áreas ubicadas a una altura superior al del relleno sanitario y estos evitan la inundación de las obras de saneamiento (aumenta el volumen de los lixiviados producidos).

Otra obra de saneamiento son las tuberías horizontales y verticales para conducir el biogás que es producido a causa de la descomposición de los residuos sólidos el cual también debe ser tratado para prevenir su expansión y contaminación al ambiente.

Un relleno sanitario previene malos olores, vectores, alimañas y contaminación del medio ambiente si se opera correctamente. Para procurar un buen saneamiento, cada relleno sanitario debe contar con infraestructura y diseños adecuados.

1.2. Residuos y desechos sólidos

1.2.1. Residuos sólidos

Según la Política Nacional para la Gestión Integral de Desechos y Residuos Sólidos “Constituyen materiales y/o productos post consumo así como excretas humanas o animales y restos vegetales, que se sujetan a sistemas de gestión regulados en los que se predominan los esquemas de comando y control una vez que han sido generados, los cuales cada vez más incluyen programas de separación, recolección selectiva y reciclaje de materiales, pero que de no lograrse esto, manejan a los residuos como desechos destinándolos a tratamiento o disposición final mediante su incineración o depósito en celdas de confinamiento”¹.

1.2.2. Desechos sólidos

Según la Política Nacional para la Gestión Integral de Desechos y Residuos Sólidos “Corresponden a aquellos materiales y/o productos post consumo, así como excreta humanas o animales y restos vegetales, no deseados por quien los genera o posee y que se tienen a eliminar, frecuentemente de manera ambientalmente inadecuada, aun cuando puedan

¹ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos*. p. 69.

ser susceptibles de aprovechamiento, reintegración a la naturaleza o reincorporación a las cadenas productivas, por limitaciones técnicas, económicas, sociales, legales, políticas y/o administrativas”².

1.2.3. Clasificación de los residuos y desechos sólidos por su origen

Según su origen podemos clasificar los residuos y desechos sólidos de la siguiente manera:

1.2.3.1. Residuos sólidos municipales

Los residuos sólidos municipales son generados, principalmente, por residenciales, pequeños comercios, institucionalidades, pequeñas industrias, desechos mínimos de construcciones o demoliciones, y residuos de basura de calles o áreas públicas.

Estos residuos pueden variar en función de aspectos económicos, culturales, sociales, hábitos, desarrollo y estándares de la calidad de vida de los habitantes. Al aumentar el nivel económico en una población, esta puede aumentar considerablemente la generación de residuos sólidos, y estos residuos tienen un mayor valor incorporado que los provenientes de sectores más pobres en la población.

1.2.3.2. Residuos sólidos industriales

² Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos*. p. 69.

La calidad y el volumen generado de residuos sólidos en una industria dependen de la tecnología del proceso productivo, la calidad de los materiales o productos intermedios, propiedades físicas y químicas de las materias auxiliares empleadas, recipientes y contenedores del proceso.

1.2.3.3. Residuos sólidos mineros

Entre los residuos sólidos mineros se encuentran los materiales removidos para la extracción de los minerales y residuos de sustancias o accesorios de los procesos mineros.

1.2.3.4. Desechos sólidos hospitalarios

Los desechos sólidos hospitalarios también llamados residuos médicos se generan como resultado de:

- Tratamiento, diagnóstico o inmunización de humanos o animales.
- Investigación conducente a la producción o prueba de preparaciones médicas hechas de organismos vivos y productos.

1.2.3.5. Desechos sólidos peligrosos

Los desechos sólidos peligrosos son aquellos que, debido a sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamable o biológico-infecciosa, sin importar el estado físico en el que se encuentren, representan un peligro para el medio ambiente. Estos residuos suelen ser muy contaminantes y el método de tratamiento, muy caro. La mejor manera de tratarlos es transportarlos por medio de una empresa especializada a un sitio de tratamiento o disposición final fuera de la zona urbana.

1.2.4. Impacto de los residuos y desechos sólidos

El rápido crecimiento poblacional ha influido, en gran manera, en el aumento de generación de residuos sólidos. Esto dificulta cada vez más su adecuada y segura disposición. Como consecuencia se provocan impactos negativos en el medio ambiente, como la contaminación de los recursos hídricos, la degradación de zonas habitables, emanación de malos olores, emisión de polvos irritantes, deterioración de suelos, facilitan la existencia de incendios entre otros. Todos ellos afectan directamente al medio ambiente y la salud de quienes lo habitan.

Los impactos producidos por los residuos sólidos municipales al medio ambiente son la contaminación de suelos, contaminación de acuíferos por lixiviados y aguas superficiales, emisión de gases de efecto invernadero por la combustión incontrolada de los materiales vertidos, ocupación incontrolada de territorios, creación de focos infecciosos y producción de malos olores. El reglamento establecido, actualmente, para el correcto manejo y disposición de los residuos y desechos sólidos es la Política Nacional para la Gestión Integral de los Residuos y Desechos Sólidos, según Acuerdo Gubernativo 281-2015.

Los residuos y desecho sólidos industriales, mineros, hospitalarios y peligrosos generan un impacto igual de dañino en los recursos naturales y en la salud de las personas que los residuos sólidos municipales. Sin embargo, la amenaza de los primeros es mayor debido a que estos residuos y desechos tienen una alta carga contaminante y arriesgan significativamente el ambiente. Los químicos que utilizan o producen los entes generadores en sus actividades generan desechos de alto valor contaminante y difícil de degradar, por lo que afectan el ambiente a largo plazo. El reglamento establecido actualmente para el manejo correcto, disposición y confinamientos de estos residuos y desechos

sólidos es el Reglamento de Manejo de Desechos Sólidos Hospitalarios, según Acuerdo Gubernativo No.509-2001.

1.3. Caracterización de los residuos sólidos municipales

1.3.1. Composición

Los componentes que conforman una determinada cantidad de residuos sólidos se puede definir por medio de estudios realizados por profesionales competentes.

La composición de los residuos sólidos se caracteriza por su producción *per cápita*, su utilización en bacterias, producción de llantas, aceite de residuo convencional, residuos de pintura, residuos de solvente, entre otros.

1.3.2. Producción per cápita

Un dato importante para calcular el volumen de un relleno sanitario es la producción *per cápita* de la población a la que se atenderá. A continuación, se presentan criterios tomados de diversos estudios realizados en América Latina, incluida Guatemala y el Caribe.

La generación de residuos sólidos *per cápita* en América Latina y el Caribe oscila entre 0,22 – 1,35 kg/cápita-día³. En la siguiente tabla se muestra la producción per cápita de acuerdo a la población generadora.

³ GIL, Joram. *Memoria descriptiva del cálculo del relleno sanitario para la disposición final de los desechos sólidos de la empresa CGN S.A.* p. 17.

Tabla I. **Producción de residuos sólidos en ciudades de América Latina y el Caribe de acuerdo a su población**

Población	Generación per cápita kg/hab/día	
	Rango	Promedio
> 2 000 000	0,54-1,35	0,97
500 000-2 000 000	0,50-1,20	0,74
< 500 000	0,22-1,20	0,55

Fuente: GIL, Joram. *Memoria descriptiva del cálculo del relleno sanitario para la disposición final de los desechos sólidos de la empresa CGN S.A.* p. 14.

De acuerdo con estudios realizados en las municipales y en la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria (ERIS) de la USAC, Raduales y Gradiz 2012. La generación de residuos sólidos en las ciudades del interior de Guatemala varía entre 0,4 y 0,7 Kg por persona por día (PPC)⁴.

1.3.3. Producción Total

La producción de residuos sólidos que genera una población al día, está dada por la relación entre población y producción *per cápita*⁵. La ecuación de la producción total es la siguiente:

$$RS_p = población \cdot PPC$$

(Ecuación núm. 1)

⁴ RAUDALES OSORTO, Rommel Josué; GRÁDIZ CÁCERES, Marvin Ovidio. *Modelo de gestión de residuos sólidos en el área urbana del municipio de Santa Catarina Pínula.* p. 33.

⁵ JARAMILLO, Jorge. *Construcción y operación de rellenos sanitarios manuales.* p. 34.

Donde RS_P es la cantidad de residuos sólidos producidos por día (kg/día), y PPC es la producción per cápita.

1.4. Rellenos sanitarios

1.4.1. Definición

Un relleno sanitario es una técnica para la disposición final de residuos sólidos en el suelo sin perjudicar al medio ambiente y sin causar molestia o peligro para la salud y seguridad pública. Utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en la menor área posible y reduce su volumen al mínimo practicable. Para cubrir los residuos sólidos se depositan bajo una capa de tierra o material de cubierta con la frecuencia necesaria, por lo menos al final de cada jornada

1.4.2. Clasificación de rellenos sanitarios

Según la disposición final de residuos sólidos, se podrían indicar tres tipos de rellenos sanitarios: relleno sanitario mecanizado, semi mecanizado y manual

1.4.2.1. Relleno sanitario mecanizado

Este relleno sanitario está diseñado para grandes ciudades y poblaciones que generen más de 40 toneladas diarias de residuos sólidos. Por la gran cantidad de residuos que se compactan al día, es un proyecto complejo de ingeniería, que requiere el uso de equipo pesado. Según su cantidad de residuos sólidos se puede relacionar con el tipo de residuo, planificación, tipo de equipo, y la infraestructura requerida, tanto para recibir y confinar los residuos,

como para el control de las operaciones, el monto y el manejo de las inversiones, los gastos de operación y mantenimiento.

Para este tipo de relleno sanitario se requiere de un compactador de residuos sólidos y equipo especializado para el movimiento de tierra, como tractor de oruga, retroexcavadora, cargador, volquete, entre otros.

1.4.2.2. Relleno sanitario semi mecanizado

Este relleno sanitario puede atender una población que genere entre 16 y 40 toneladas diarias de residuos sólidos. Para compactar adecuadamente los residuos, estabilizar los terraplenes y dar mayor vida útil al relleno, se necesita maquinaria pesada como apoyo al trabajo manual. Un equipo apropiado para operar este relleno es el tractor agrícola con una hoja topadora o cuchilla y con un cucharón o rodillo para la compactación. Este trabajo se denomina semi mecanizado.

1.4.2.3. Relleno sanitario manual

Es una adaptación del concepto de relleno sanitario para las pequeñas poblaciones que producen cantidades menores a 15 toneladas al día y sus condiciones económicas les impide adquirir el equipo pesado dados sus altos costos de operación y mantenimiento. Sin embargo, es necesario realizar un análisis de las condiciones de la región, debido a que las características del sitio, como la disponibilidad del material de cobertura, el clima, costo de mano de obras, entre otros, podría resultar más económica la construcción y operación del relleno, parcial o permanentemente, con equipo pesado.

El término manual se refiere a que la operación de compactación y confinamiento de los residuos puede ser ejecutado con el apoyo de una cuadrilla de hombres, el empleo de algunas herramientas y utilizar equipo pesado solo para la adecuación del sitio (vías internas, preparación de la base o excavación de celdas).

1.4.3. Métodos de construcción de rellenos sanitarios

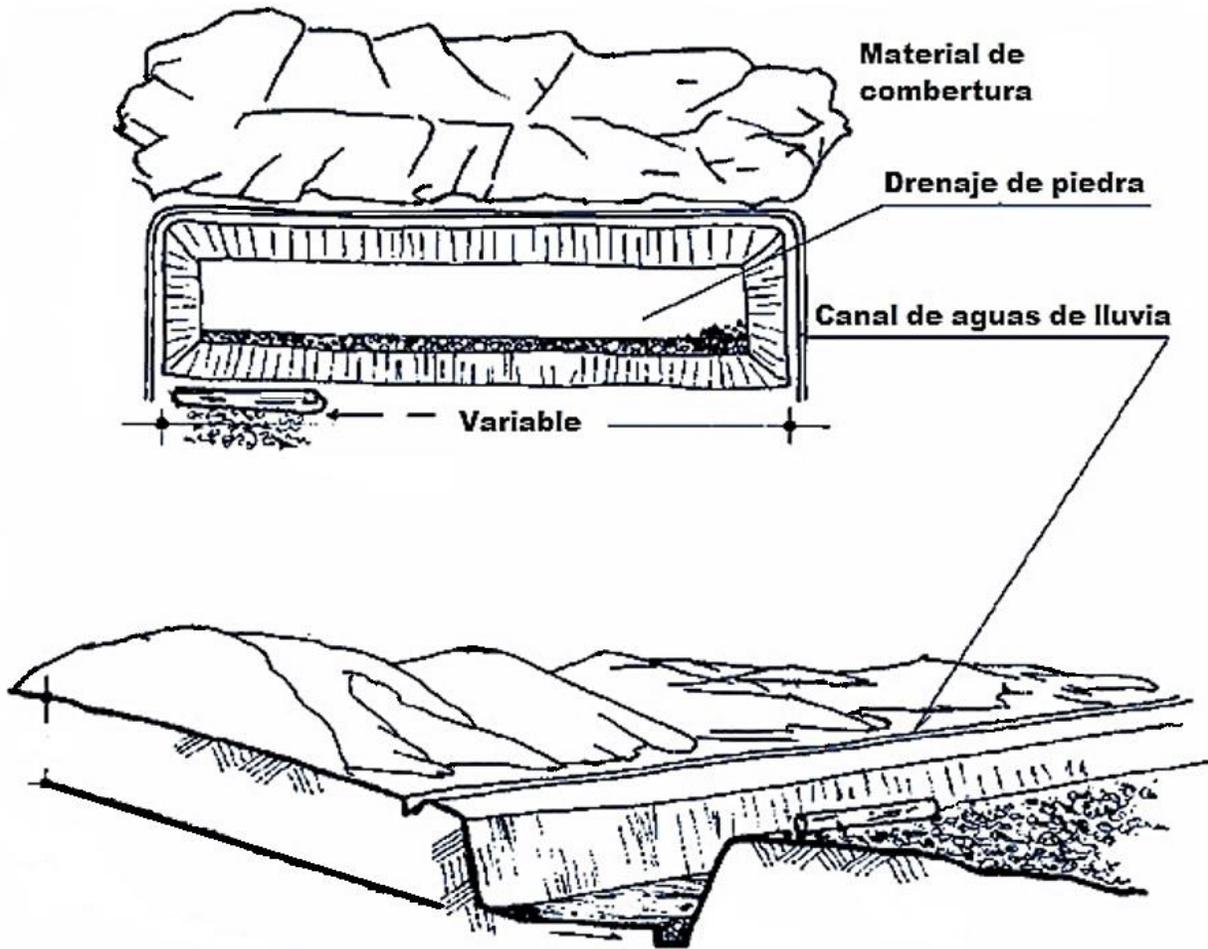
El parámetro básico de diseño en un relleno sanitario es el volumen. Este depende del área cubierta, la profundidad a la cual los residuos son depositados y el radio de material de cobertura y residuo.

1.4.3.1. Método de trinchera o zanja

Este método se utiliza en regiones planas y consiste en excavar periódicamente zanjas de dos a tres metros de profundidad, con el apoyo de una retroexcavadora o tractor oruga. La tierra se extrae y se coloca a un lado de la zanja para utilizarla como material de cobertura. Los residuos sólidos se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con tierra.

La excavación de zanjas exige condiciones favorables relacionadas con la profundidad del nivel freático y el tipo de suelo. Los terrenos con nivel freático alto o muy próximo a la superficie no son apropiados por el riesgo de contaminar el acuífero. Los terrenos rocosos tampoco lo son debido a las dificultades de excavación.

Figura 1. **Método de trinchera o zanja**



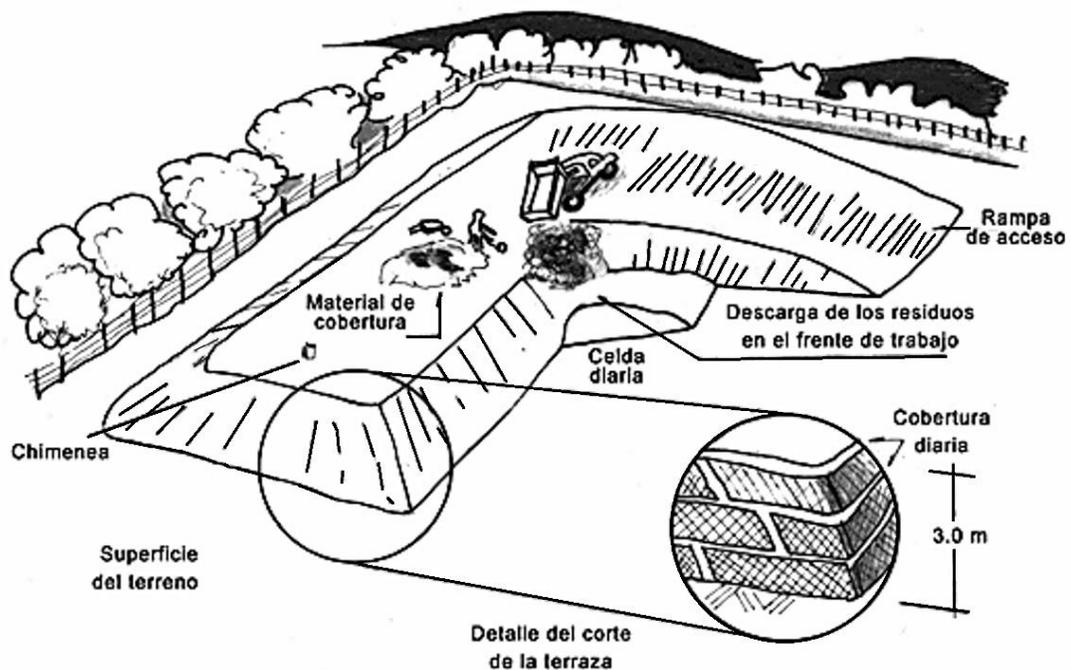
Fuente: JARAMILLO, Jorge. *Construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. p. 12.

1.4.3.2. **Método de área**

En áreas relativamente planas, donde no sea posible excavar fosas o trincheras, los residuos sólidos, pueden depositarse directamente sobre el suelo original, elevando el nivel algunos metros. En estos casos, el material de cobertura deberá ser importado de otros sitios o, de ser posible, extraído de la capa superficial. En ambas condiciones, las primeras celdas se construyen estableciendo una pendiente suave para evitar deslizamientos y lograr una mayor estabilidad a medida que se eleva el terreno.

Se adapta también para rellenar depresiones naturales o canteras abandonadas de algunos metros de profundidad. El material de cobertura se excava en las laderas del terreno o, en su defecto, se debe procurar lo más cerca posible para evitar el encarecimiento de los costos de transporte. La operación de descarga y la construcción de las celdas deben iniciarse desde el fondo hacia arriba.

Figura 2. Método de área

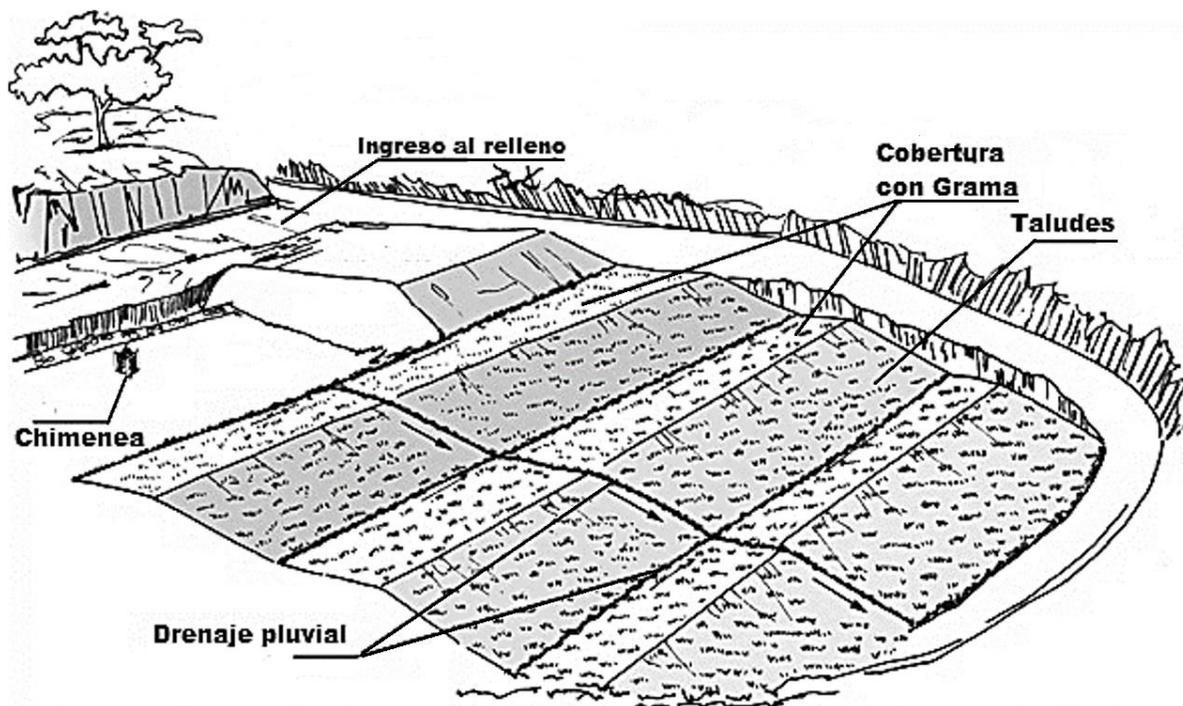


Fuente: JARAMILLO, Jorge. *Construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. p. 12.

1.4.3.3. Método de cañón o terraza

Este método se emplea, principalmente, cuando el área donde se depositarán los residuos sólidos tiene pendientes muy altas, o presenta una topografía discontinua. Se considera como una variable del método de área. Consiste, primordialmente, en dividir el talud original de los residuos en dos o más secciones, dependiendo de la altura y longitud del talud. Esta división se marca dejando una superficie horizontal, de modo que entre talud y talud existe un ancho de corona. De igual manera que en otros métodos, es necesario mover, conformar y cubrir los residuos sólidos con material de cobertura.

Figura 3. Método de cañón



Fuente: JARAMILLO, Jorge. *Construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. p. 13.

1.4.4. Componentes de un relleno sanitario

1.4.4.1. Deposito del relleno

El depósito es el lugar excavado destinado para confinar los residuos y desechos sólidos. Debe presentar condiciones adecuadas para evitar la propagación de los contaminantes producidos por la operación del relleno. Las consideraciones para su ubicación son la topografía, tipo de suelo, alejado de comunidades, alejado de cuerpos de agua, y espacio suficiente para colocar los residuos.

1.4.4.2. Base impermeable

También llamado impermeabilización, el relleno debe estar aislado para evitar que la filtración de líquidos contamine el manto freático, y cuerpos de aguas cercanos. La base se cubre con polietileno de alta densidad.

1.4.4.3. Drenaje de lixiviados

Los sistemas de recolección y conducción de lixiviados transportan a la planta de tratamiento los líquidos producidos por la descomposición y compactación de los residuos sólidos. El tratamiento de los líquidos lixiviados no elimina las sustancias tóxicas, que igualmente pueden llegar a contaminar las aguas subterráneas, los ríos y el suelo.

1.4.4.4. Tratamiento de lixiviados

Basándose en las cantidades estimadas de lixiviados y en las condiciones ambientales locales, se debe seleccionar los procesos de tratamientos apropiados.

1.4.4.5. Celdas diarias

Los residuos diarios deberán formar una celda, cubrirse al final del día con suelo y otro material apto para su confinamiento. Estas celdas pueden tomar otras formas, como trincheras, plataformas, etc., para confinar los residuos de manera más eficiente, dependiendo del lugar donde se construyan.

1.4.4.6. Chimenea para ventilación de biogás

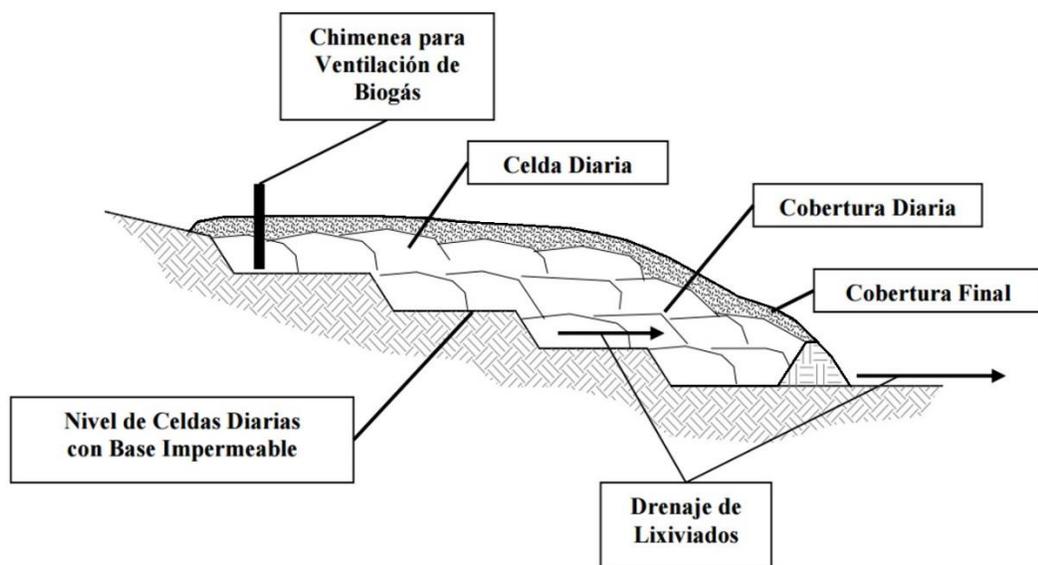
La descomposición de los residuos sólidos produce gases, como metano, dióxido de carbono, tolueno, benceno, cloruro de vinilo, etc. Entre los gases producidos se encuentran sustancias que pueden ser tóxicas, cancerígenas o provocar el efecto invernadero. Algunas de estas se pueden eliminar por venteo.

1.4.4.7. Cobertura superior

Cuando una celda, modulo o relleno se completa, se lo cubre con un sistema de multicapa en forma de cúpula, para evitar la acumulación de agua de lluvia y el filtrado de la misma. El material de cobertura puede ser extraído del mismo terreno sobre el cual se colocará el relleno sanitario, o puede ser un material transportado de otro lugar, pero este debe ser altamente impermeable.

Los componentes de un relleno sanitario, con las celdas diarias de los residuos compactados, cobertura diaria, niveles de celdas diarias, la chimenea para ventilación de biogás, salida de lixiviados y la cobertura final, se pueden ver en la siguiente figura:

Figura 4. **Diagrama de un relleno sanitario**



Fuente: JARAMILLO, Jorge. *Construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. p. 14.

2. HIDROLOGÍA EN RELLENOS SANITARIOS

La hidrología es parte fundamental para el diseño y cálculo de las obras hidráulicas. Por ello, es importante describir los métodos y criterios que se utilizan para conocer el caudal de diseño con el que se dimensionarán las obras hidráulicas en un relleno sanitario

2.1. Balance hídrico

El balance hídrico es importante en el diseño de un relleno sanitario, debido que es un método empleado para conocer los factores que influyen en la determinación de un caudal basado en la sumatoria de los ingresos de cuerpos de agua menos las salidas o pérdidas de agua que hay un lugar específico. La relación entre el balance hídrico y el diseño de un relleno sanitario es la determinación del caudal resultante de los ingresos (precipitación y escorrentía) y egresos (infiltración o evapotranspiración) que puede ocurrir en los estratos del relleno sanitario y de las áreas aledañas del proyecto.

Con el balance hídrico se puede determinar la cantidad de lixiviado que podría generarse en un relleno sanitario. El balance hídrico incluye el recuento de todos los flujos de líquidos que ingresan y egresan al relleno sanitario.

El mayor componente de la fase líquida en los rellenos sanitarios es el agua.

Los flujos más significativos que ingresan a la mayoría de los rellenos sanitarios son la precipitación y el agua contenida en los residuos sólidos

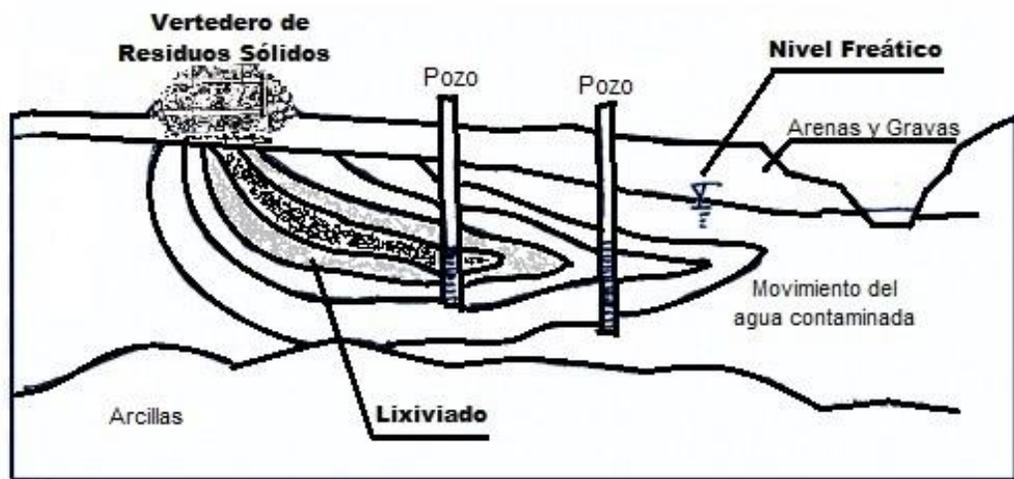
cuando llegan al relleno sanitario. El flujo más importante que egresa en un relleno sanitario es el lixiviado. En ocasiones especiales, la cantidad de agua producida durante la descomposición de los residuos sólidos y el agua que se pierde por evaporación podrían ser significativas en el balance hídrico.

El balance hídrico es relevante para la clasificación y la selección de sitios con potencial para desarrollo de un relleno sanitario.

2.1.1. Lixiviados

Los lixiviados son fluidos que, para el estudio es el caudal resultante del balance hídrico en combinación de los procesos que suceden en un relleno sanitario, tal el caso de la descomposición anaerobia que produce cambios químicos de sólido a líquido, y de líquido a gaseoso en los residuos. También los estratos del relleno sanitario, al ser compactados por maquinaria pesada, expulsan líquidos acumulados en los desechos. Parte de este líquido permanece en la base del relleno sanitario. En el momento del compactado se puede considerar que los residuos sólidos están completamente saturados y cualquier agua, subterránea o superficial, que se infiltre en el relleno, se infiltrará a través de los residuos arrastrando consigo sólidos en suspensión, y compuestos orgánicos en solución. La mezcla heterogénea resultante de estos procesos, de un elevado potencial contaminante, es lo que se denomina lixiviado.

Figura 5. Producción de lixiviados



Fuente: JARAMILLO, Jorge. *Construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. p. 23.

2.2. Caudales de diseño

Para calcular los caudales de diseño que se utilizarán en las obras hidráulicas se deben hacer estudios hidrológicos sobre la región o área donde se construirá el relleno sanitario. Los caudales que se utilizarán, principalmente, se basan en el análisis de las precipitaciones, evaporación e intensidades de lluvia.

El caudal de diseño para el drenaje de recolección, conducción de lixiviados y su tratamiento, se diseña con base en la precipitación pluvial que cae sobre el área útil del relleno sanitario, la infiltración de agua de escurrimiento, la evapotranspiración, y la capacidad de la cobertura para retener agua que se infiltra. Este caudal se calcula con la ecuación del balance hídrico descrito anteriormente.

El agua pluvial que precipita en la región donde se construye el relleno sanitario, cuando se convierte en escorrentía superficial, puede dañar los taludes por la erosión y corrimientos de residuos depositados. También el escurrimiento superficial, o el agua pluvial, se infiltra por la superficie del relleno, produciendo los lixiviados. Esto puede solucionarse con la construcción de canales de desvío con una ubicación adecuada a la topografía donde se origina el escurrimiento.

El caudal máximo del escurrimiento para diseñar los canales se calcula por el área expuesta a escurrir, sea fuera o dentro del sitio, y la intensidad de la lluvia durante una tormenta de diseño para un período específico, usando la ecuación del método racional para agua pluvial⁶:

$$Q_E = \frac{C \cdot i \cdot A_d}{3.6 \times 10^6}$$

(Ecuación núm. 2)

Donde Q_E es el caudal de diseño (m^3/s), C el coeficiente de escurrimiento, i es intensidad promedio de lluvia para un período igual al tiempo de concentración ($mm/hora$), y A_d es el área de drenaje (m^2).

Los criterios de caudales de diseño que se considerarán, tratan de disminuir la mayor cantidad de lixiviados posibles para evitar grandes cantidades de contaminación que pongan en riesgo el medio ambiente y la salud de las personas que puedan ser expuestas a este líquido.

⁶ STEWAR, Oakley. *Manual de diseño y operación de rellenos sanitarios en Honduras*. p. 101.

2.3. Parámetros a considerar en obras hidráulicas en un relleno sanitario (residuos sólidos municipales)

2.3.1. Sistema de captación y extracción de lixiviados

La infraestructura necesaria para su captación incluye sistemas de impermeabilización colocados con cierta pendiente para conducir por gravedad el lixiviado a los tubos colectores. Este sistema colector extrae el lixiviado del cuerpo de los residuos sólidos compactados, lo lleva directamente al tratamiento o a sitios de bombeo para su extracción y traslado a su tratamiento.

El sistema de captación de lixiviados requerido para los sitios de disposición final deberá instalarse inmediatamente por encima del sistema de impermeabilización en todas las celdas en preparación. Estos sistemas deberán ser capas drenantes, ubicadas en la base del sitio de disposición y sobre cualquier capa superior donde se espere tener acumulación de líquido. El sistema de captación y extracción de lixiviados consiste en una red horizontal de zanjas de piedra, interrumpidas con pantalla del mismo terreno o de tapia y madera.

2.3.2. Sistema de tratamiento de lixiviados

Es importante tener un suelo impermeable o impermeabilizarlo artificialmente para que se pueda construir la red de zanja de almacenamiento que retendrá el lixiviado en el relleno sanitario.

Otra práctica que minimiza el problema del lixiviado, al clausurarse algunas áreas del relleno sanitario o cuando esté acabada su vida útil, es la siembra de pasto, grama y pequeños arbustos de raíces cortas que se adaptan

a las condiciones de la obra. Se deben sembrar tanto sobre la superficie ya clausurada como en los alrededores del sector relleno; la evapotranspiración puede ser efectiva en algunos casos hasta evitar la producción de lixiviado.

En casos extremos en que no se controla su producción y dado que el lixiviado de los residuos sólidos municipales presenta características semejantes a las aguas residuales domésticas (con gran porcentaje de materia orgánica biodegradable de difícil decantación), se podrán aplicar tratamientos biológicos para mejorar en lo posible la calidad de este líquido. Ejemplos de estos métodos son los filtros percoladores y las lagunas de estabilización.

2.3.3. Sistema de captación de agua pluvial

Parte del agua de lluvia que cae en la superficie del terreno donde se construirá el relleno sanitario se evaporará, otra escurrirá a través de la superficie aprovechando las pendientes naturales del terreno hacia el nivel más bajo del terreno y el resto será absorbido por el suelo.

La obra hidráulica adecuada para la captación del agua pluvial son los drenajes pluviales. Su función es captar y conducir los escurrimientos pluviales externos e internos al área del relleno sanitario y dirigirlos hacia el cauce natural, reduciendo al máximo su volumen para evitar la formación de líquidos lixiviados. Para lograr lo anterior, se estiman los volúmenes, precipitados de lluvia y escurrimientos sobre el sitio para calcular el sistema de drenajes.

2.4. Características que influyen en el diseño de obras hidráulicas

2.4.1. Características climatológicas

Es importante conocer los aspectos climatológicos del lugar donde se situará el relleno sanitario, a través de la hidrología del sitio, para establecer los canales naturales del drenaje y escurrimiento. De esta manera se evitan corrimientos de residuos y la contaminación del agua superficial, y contaminación del agua subterránea, se incorpora la hidrología del sitio en el diseño y en la operación de rutina. Sería importante minimizar la necesidad de desviar significativamente el escurrimiento de manera que se aproveche el terreno natural.

2.4.2. Características geológicas

El nivel freático y el tipo de suelo deben ser adecuados para evitar el contacto del agua subterránea y terrenos cercanos con lixiviados y biogases ya que estos poseen un alto grado de contaminación. Se recomienda que cuando se tenga un suelo limo arcilloso, haya, por lo menos, una distancia de 1,00 m entre el nivel freático y los residuos sólidos en el relleno.

2.4.3. Características hidrogeológicas

Los datos pluviométricos, características de las rocas como su permeabilidad y su relación con las aguas subterráneas, análisis químico, del agua subterránea y la existencia de acuíferos cercanos a la superficie son factores que se deben tomar en cuenta en la ubicación del relleno y evaluación de la confinación de los componentes contaminantes durante la operación del mismo.

3. PARÁMETROS HIDROLÓGICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES EN UN RELLENO SANITARIO

El caudal que proviene de la precipitación pluvial, escorrentía superficial y la humedad del suelo influye en el incremento de los lixiviados a producirse en un relleno sanitario por lo que la consideración hidrológica es importante para un buen diseño y funcionamiento del relleno, sin que esto pueda representar un gran riesgo para el medio ambiente. A continuación, se describe el análisis de datos hidrológicos y el cálculo del caudal para las obras hidráulicas que se ubicarán en el relleno sanitario de residuos sólidos basado en la investigación realizada por el Ingeniero Stewar Oakley en su documento Manual de Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios en Honduras.

3.1. Cálculo del balance hídrico

La producción de lixiviados se determina en función de la precipitación pluvial que cae sobre el relleno, la infiltración del agua de escurrimiento desde la parte más alta del terreno que puede pasar por encima del relleno sanitario, la evapotranspiración, la humedad, densidad de los residuos sólidos depositados, la capacidad de campo de los residuos y la cobertura para retener el agua que se infiltra, como se ha indicado en el capítulo 1, inciso 1.4.1. La capacidad de campo es la habilidad de la materia de almacenar humedad.

Se estima la producción de lixiviados que se genera en un relleno sanitaria mensualmente por medio de la ecuación de balance hídrico⁷:

⁷ STEWAR, Oakley. *Manual de diseño y operación de rellenos sanitarios en Honduras*. p. 114.

$$q = P(1 - C_E) - C_{CC} - E$$

(Ecuación núm. 3)

Donde q es la infiltración de lixiviados por la superficie del relleno (mm/mes), P es la precipitación promedio mensual (mm/mes), C_E es el coeficiente de escurrimiento para la superficie del relleno, C_{CC} es la capacidad de campo mensual de cobertura y desechos (mm/mes), y E es la evapotranspiración promedio mensual (mm/mes).

En la siguiente tabla, se presentan valores de coeficiente de escurrimiento, C_E , para suelos cubiertos con pasto que puedan llegar a presentarse en el área del relleno. Estos valores pueden ser utilizados en la ecuación de balance hídrico.

Tabla II. **Valores del coeficiente de escurrimiento, C_E , para suelos cubiertos con pasto**

Tipo de superficie cubierta con pasto	Pendiente, %	Coficiente de Escurrimiento, C_E
Suelo arenoso	0 - 2	0,05 - 0,10
Suelo arenoso	2 - 7	0,10 - 0,15
Suelo arenoso	> 7	0,15 - 0,20
Suelo arcilloso	0 - 2	0,13 - 0,17
Suelo arcilloso	2 - 7	0,18 - 0,22
Suelo arcilloso	> 7	0,25 - 0,35

Fuente: ROBEN, Eva. *Manual de diseño y operación de rellenos sanitarios en Honduras*.

p. 15.

Se presentan en la tabla III las capacidades de campo, C_{CC} , de varios suelos y de residuos sólidos compactados. Los valores presentados en la tabla son los máximos valores posibles. Para obtener la capacidad de campo neto del sitio disponible para absorber humedad, se sustrae el valor de humedad que existe.

Tabla III. **Capacidad de campo de varios suelos y residuos sólidos**

Materia	Capacidad de Campo, C_{CC}	
	mm H ₂ O/m de profundidad	% por Volumen
Arena fina	120	12
Marga arenosa	200	20
Marga limosa	300	30
Arcilla margosa	375	37,5
Arcilla	450	45
RSM Compactados	200 - 350	20 - 35

Fuente: ROBEN, Eva. *Manual de diseño y operación de rellenos sanitarios en Honduras*.

p. 15.

Por la dificultad de estimar las capacidades de campo neto que existen en rellenos sanitarios, es mejor eliminar el término C_{CC} de la Ecuación para obtener la siguiente ecuación:

$$q = P(1 - C_E) - E$$

(Ecuación núm. 4)

La ecuación resultante del Balance Hídrico tiene un factor de seguridad, porque se asume que la humedad dentro del relleno excedió la capacidad de campo.

Para calcular el volumen de lixiviado producido, se utilizan datos históricos del promedio mensual de precipitación y evotranspiración, preferiblemente promediados durante un período de 10 o 20 años.

3.2. **Cálculo de caudales del drenaje de lixiviados**

La generación de lixiviados es un factor que siempre está presente durante la construcción y la operación de un relleno sanitario. En algunos casos, a pesar de poseer los drenajes pluviales perimetrales respectivos para

interceptar y desviar las aguas de escorrentía, la lluvia cae directamente sobre la superficie del relleno lo que aumenta la generación de lixiviados.

Para la construcción de una red de drenaje de lixiviados en las celdas de un relleno sanitario se calcula el caudal de diseño con la siguiente ecuación.

$$Q = P \cdot A \cdot K \cdot T^{-1}$$

(Ecuación núm. 5)

Donde Q es el caudal medio de lixiviados (lt/seg), P es la precipitación media anual (mm/año), A es el área del relleno sanitario (m^2), K es el coeficiente de compactación que depende del grado de compactación, y T es el número de segundos en un año (31 536 000 seg).

El cálculo del coeficiente de compactación se realiza por medio de la densidad de los residuos sólidos mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{\text{Densidad de residuos sólidos descargada en relleno sanitario}}{\text{Densidad de residuos sólidos en relleno sanitario}}$$

(Ecuación núm. 6)

3.3. Cálculo de caudales para el tratamiento en zanjas de oxidación

Utilizando la ecuación del balance hídrico, ecuación núm. 4, se determina el caudal que se ha producido de lixiviado con los dimensionales mm/mes.

$$q = P(1 - C_E) - E$$

Al tener q , se calcula el volumen mensual de lixiviados producidos por el relleno sanitario, utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_m = 0,001 \cdot q \cdot A_E$$

(Ecuación núm. 7)

Donde Q_m es el volumen mensual de lixiviados producidos (m^3), q es la infiltración mensual ($mm = 0,001 m^3 / m^2$), y A_E es el área superficial expuesta a la precipitación (m^2).

El volumen total del lixiviado producido por año sería

$$Q_T = \sum_i Q_{m i}$$

(Ecuación núm. 8)

Donde Q_T es el volumen anual de lixiviado producido (m^3), y $Q_{m i}$ es el volumen mensual de lixiviado en los meses, i , que lo produce (m^3)

3.4. Cálculo de caudales para obras perimetrales

El diseño de un sistema de evacuación de aguas pluviales permite que se desvíe la escorrentía superficial provocada por una alta precipitación, que pueda inundar el proyecto de relleno sanitario. Este sistema se construye en el perímetro, y otras obras hidráulicas de drenaje en el área requerida del terreno donde pueda infiltrarse; se determina el caudal por medio del método racional con intensidades calculadas con base en registros y estadísticas que proporcionan las estaciones hidrometeorológicas cercanas al lugar. El Método Racional calcula el caudal de escorrentía de la ecuación núm. 2.

$$Q_E = \frac{C \cdot i \cdot A_d}{3.6 \times 10^6}$$

4. DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DE OBRAS PARA LOS LIXIVIADOS

Los lixiviados constituyen uno de los principales problemas en la operación de un relleno sanitario. Por esta razón, es necesario recolectarlos y evacuarlos adecuadamente para darles el tratamiento correspondiente. El efecto que tiene un buen sistema de manejo de lixiviados es evitar daños severos en la salud de los operadores y la contaminación de los recursos naturales cercanos propensos a tener contacto con estos.

4.1. Dimensionamiento de tuberías de lixiviados

Utilizando el caudal de diseño de lixiviado calculado con la ecuación núm. 5; se utilizará en la ecuación de Manning para calcular el diámetro que debe tener la tubería para lixiviados. La ecuación de Manning es la siguiente:

$$Q = \frac{A \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n}$$

(Ecuación núm. 9)

Donde A es el área de la sección transversal de la tubería ($A = \frac{\pi d^2}{4}$), Rh es el radio hidráulico de la tubería ($Rh = \frac{d}{4}$), S es la pendiente de la línea de agua, y n es un parámetro que depende de la rugosidad del material contenedor (para un tubo de PVC es 0,009). Para el dimensionamiento del diámetro para la tubería de lixiviados por medio de esta ecuación, se debe calcular a sección llena y a sección parcial, de manera que cumpla los parámetros de velocidad,

número de Froude y tomar en cuenta que la tubería no debe trabajar a presión o sección llena.

Si el diámetro calculado es menor a 4", se aproxima a 4" en material de PVC. Se recomienda una tubería de este diámetro como mínimo para facilitar las labores de operación y mantenimiento, ya que permite introducir herramientas o equipos mecanizados para la limpieza o en caso de taponamiento.

4.2. Descripción del sistema de drenaje para lixiviados

De acuerdo a CEPIS se recomienda que durante la construcción se utilice una capa de drenaje de grava o piedra bola a lo largo de la tubería de PVC. Las piedras utilizadas en dicha capa deben de ser grandes, de 4" (con dimensiones más o menos homogéneas) y sin material fino. Con esto, se garantiza una adecuada permeabilidad hidráulica en el drenaje

El sistema general de drenaje consiste en una red horizontal de zanjas rellenas de piedra para captar el flujo del lixiviado entre los diferentes estratos de residuos sólidos dispuestos en la zanja.

Se recomienda la construcción de los drenajes de la siguiente manera:

- Se debe definir un trazo en el fondo y al centro de cada celda donde se ubicará el drenaje, el cual debe estar formado por un tubo de preferencia de 3" de diámetro el cual se conectará a un tubo principal recolector de 6" mínimo de diámetro.
- La tubería de captación y transporte de lixiviados, en el fondo de las celdas, se le debe dar una pendiente del 2 %.

- Se debe proteger la tubería de lixiviados con piedra de 4" y un geotextil no tejido con un gramaje igual o superior a 130 gramos/metro², para evitar el paso de finos y por consiguiente evitar que esta tubería se colme.

La tubería de drenaje de lixiviado debe estar ubicada de tal manera que pueda captar la mayor cantidad de lixiviados de cada celda y conectarse al tubo recolector principal sin que esta aumente su pendiente

4.2.1. Colocación del drenaje del relleno sanitario

La red de drenaje consiste en tubos perforados que se colocan en el fondo de las celdas bajo una capa de grava. Estos tubos deben colocarse al fondo de la zanja, para que los lixiviados se infiltren al interior del tubo y se conduzca a la pileta de evaporación de lixiviados.

Debido a la pequeña producción de lixiviados, la construcción más adecuada para un relleno sanitario es una pileta, la cual tiene un tratamiento biológico facultativo, además de la evaporación. Si el lixiviado no evaporado sobrara se regará encima de las celdas ya rellenas en operación con la ayuda de una bomba para evitar su contacto físico con el personal.

5. DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS

La planta de tratamiento de lixiviados que se diseñará es una laguna de secado o pileta de oxidación de lixiviado, que considera un área necesaria para la evaporación del agua contenida en el líquido y deja deshidratada la parte contaminante para su remoción y confinamiento, como residuo sólido dentro del relleno sanitario.

5.1. Cálculo de pileta de oxidación de lixiviados (tratamiento)

Para el dimensionamiento de esta pileta se debe considerar el área crítica de captación de lluvia para un período de retorno mayor que el tiempo para el cual estará diseñado el relleno sanitario. Estos datos se obtienen del dimensionamiento del relleno sanitario y del estudio hidrológico.

Para el dimensionamiento se utilizarán las siguientes ecuaciones:

Estimación mensual de lixiviados por medio del balance hídrico (ecuación núm. 4).

$$q = P(1 - C_E) - E$$

Volumen de lixiviados anual (ecuación núm. 8).

$$Q_T = \sum_i Q_{m i}$$

El área superficial de la laguna para evaporación se calcula con la siguiente ecuación:

$$A_L = \frac{Q_T}{0.001 * \sum_i^{12} (P_i - E_i)}$$

(Ecuación núm. 10)

Donde A_L es el área de la laguna de evaporación (m^2), y $0.001 * \sum_i^{12} (P_i - E_i)$ es la evaporación neta anual (m^3/m^2).

6. DISEÑO DEL CANAL PLUVIAL PERIMETRAL DEL RELLENO SANITARIO

El diseño de un relleno sanitario debe contemplar la construcción de un canal perimetral que se denomina canaleta, para evitar, principalmente, que en la temporada lluviosa, el agua entre e inunde el relleno sanitario.

6.1. Cálculo del drenaje pluvial externo

La determinación de los caudales se hará por el Método Racional con intensidades de lluvia de un período de retorno de las curvas IDF proporcionadas por un estudio hidrológico.

El agua pluvial que se precipita sobre los terrenos colindantes cercanos al sitio donde se construirá el relleno sanitario, y de acuerdo con la topografía del área, generalmente escurren hacia este, lo que puede causar problemas a la operación. El principal objetivo del drenaje perimetral es captar y conducir la escorrentía del agua de lluvia fuera del área del relleno sanitario. Esto favorece en buena medida la reducción de las cantidades del líquido lixiviado y, por consiguiente, favorece el trabajo de operación

Para realizar el cálculo y dimensionamiento de canaletas se utiliza las siguientes ecuaciones:

Caudal de escorrentía por el Método Racional (ecuación núm. 2):

$$q = \frac{C_e \cdot i \cdot A}{1000 \cdot 3600}$$

La intensidad que se utilizará está en función del período de retorno y su ecuación se describe a continuación:

$$i = \frac{A}{(t + B)^n}$$

(Ecuación núm. 11)

Donde “A”, “B” y “n” son parámetros adimensionales, e “i” es la intensidad de frecuencia (mm/hora).

La ecuación de Manning utilizada, en este caso, para calcular la velocidad de la escorrentía del agua pluvial captada y así dimensionar la sección del canal perimetral.

$$V = \frac{R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n}$$

(Ecuación núm. 12)

Donde R_h es el radio hidráulico del canal, S es la pendiente de la línea de agua, y n es un parámetro que depende de la rugosidad del material contenedor.

7. ESPECIFICACIONES DE MATERIALES Y OBRAS COMPLEMENTARIAS PARA OBRAS HIDRÁULICAS

En el diseño de un relleno sanitario existen obras que complementan la función de las obras hidráulicas, asegurando la correcta confinación y aislamiento de los componentes contaminantes. Dichas obras se describen en este capítulo con la consideración apropiada del material que se empleará en su construcción y diseño. De igual manera se describe los requerimientos para el Manual de Operación y Mantenimiento de un Relleno Sanitario de Residuos Sólidos Municipales.

7.1. Obras complementarias recomendadas

7.1.1. Sistema de impermeabilización del relleno

Para proteger los acuíferos de los lixiviados producidos en un relleno sanitario se puede emplear un sistema de impermeabilización natural o artificial. El sistema de impermeabilización se selecciona con base a las características hidrogeológicas de la región y lugar donde se construirá el relleno.

El método de impermeabilización natural consiste en aprovechar las propiedades fisicoquímicas del suelo y las características del material del subsuelo, para evitar la contaminación de las aguas subterráneas por la acción de los lixiviados.

El método de impermeabilización artificial, consiste en colocar materiales naturales con artificiales para evitar que los lixiviados penetren al acuífero. Los materiales que destacan son el hule, polietilenos, PVC y geomembranas de polietileno de alta densidad⁸.

7.1.2. Sistema de captación y extracción de biogás

Una vez que los residuos quedan compactados bajo capas de tierra, se crea un ambiente libre de oxígeno que permite el desarrollo de diversos tipos de organismos anaerobios, especialmente bacterias que biodegradan la materia orgánica contenida en los residuos sólidos. La descomposición progresiva de la materia orgánica implica la formación de compuestos intermedios que provocan los típicos malos olores de los residuos en descomposición.

Por ello, en el relleno sanitario deben colocarse sistemas de venteo para controlar la salida de gases. Debe cuidarse que las capas de residuos sólidos queden debidamente compactadas y perfectamente cubiertas con tierra para evitar que los gases nocivos salgan al medio ambiente, de manera desordenada, por sitios que no sean los sistemas de evacuación.

El drenaje de gases está constituido por un sistema de ventilación de piedra o tubería perforada de concreto (revestida con piedra) que funcionan como chimeneas o tubos de ventilación que atraviesan en sentido vertical todo el relleno. Estas se construyen conectándolas a los drenajes de lixiviado que se encuentran en el fondo y se la proyecta hasta la superficie para lograr una mejor eficiencia en el drenaje de líquidos y gases.

⁸ ROBESN, Eva. *Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales*. p. 15.

7.2. Especificaciones de materiales

7.2.1. Geomembrana

Se utiliza membrana flexible de polietileno de alta densidad. Debe tener un mínimo de 1 500 μ de espesor, fabricada con materia prima virgen 100 %, imputrescibles, químicamente inerte, con protección UVH, color negro. Los palos deberán tener un ancho mínimo de 6,00 metros. El material debe cumplir con los requisitos técnicos de la norma GM13 del Geosynthetic Research Institute y debe contar con protocolo de calidad emitidos por el fabricante, el que debe contar con certificación ISO 9001 para la producción.

Para la preparación del fondo del relleno y su correspondiente impermeabilización se deberá mantener el sector totalmente libre de agua. La superficie de apoyo de las membranas será de una capa de arcilla nivelada, rodillada y compactada para obtener una base uniforme donde se asiente la geomembrana.

7.2.2. Drenaje de gases

Para las celdas tipo trincheras se colocan las chimeneas de acuerdo con las recomendaciones del Manual de Rellenos Sanitarios⁹ para una emisión baja o media de biogás.

El biogás se ventila por las chimeneas de piedra las cuales están conectadas al fondo de las zanjas o celdas. Para la construcción de las chimeneas se utiliza el mismo tipo de piedra que para las zanjas de drenaje de

⁹ STEWAR, Oakley. *Manual de diseño y operación de rellenos sanitarios en Honduras*. p. 136.

los lixiviados y los diámetros recomendados oscilan entre 10 a 15 cm, de acuerdo con lo sugerido¹⁰.

Estas chimeneas deben atravesar en sentido vertical cada una de las trincheras, desde el fondo hasta la superficie. Se instalan de forma vertical a medida que avanza la operación del relleno sanitario, trabajando en la medida de lo posible una buena compactación a su alrededor. Estas pueden estar colocadas, preferiblemente, en el centro de masa de los residuos en las celdas o los niveles, o bien instalándolas en un intervalo de cada 20 a 50 metros.

La chimenea, además de su función de ventilación de biogás, también sirve como drenaje adecuado de lixiviados ya que estos están conectados a las zanjas de drenaje de lixiviados.

7.2.3. Cubierta de zanja de relleno de desechos comunes

Contará con tubo cuadrado de acero al carbón de 1", para sostener un plástico de color negro e impedir el ingreso del agua de lluvia. También se utiliza plástico negro de polietileno de baja densidad de 600 micrones, para cubrir la zanja.

7.3. Requerimientos del manual de operación y mantenimiento del relleno sanitario

Cualquier relleno sanitario fracasará si no existe el personal capacitado para su operación adecuada. Para efectuar las labores de operación de manera eficiente se debe contratar al personal calificado, entre ellos a un ingeniero

¹⁰ STEWAR, Oakley. *Manual de diseño y operación de rellenos sanitarios en Honduras*. p. 138.

supervisor de tiempo parcial con capacitación en la operación de rellenos. Los trabajadores y los operadores de equipo necesitan capacitación en la operación de rellenos, construcción de plataformas y niveles, y la construcción del drenaje para lixiviados. Los operadores de maquinaria, especialmente, requieren capacitación orientada en la construcción de plataformas diarias, compactación de desechos y aplicación de cobertura.

Lineamientos generales:

- Control de ingreso de los residuos sólidos. Se debe indicar el procedimiento para la documentación y monitoreo del volumen de residuos sólidos ingresados, para controlar y registrar el volumen de lixiviados; Información de cómo y cuándo reportar cualquier eventualidad que pueda afectar el desarrollo de las operaciones del relleno y la estructuración de un informe periódico de las actividades desarrolladas.
- Recolección, transporte, colocado y compactación de la ceniza. Se deben indicar las especificaciones de recolección, el tipo de transporte de recolección con capacidad de acuerdo con la producción diaria, indicar la forma en que el camión deba ingresar a las instalaciones del relleno; definir la metodología de construcción de cada plataforma y su confinamiento con base a la producción diaria que ingresa al relleno.
- Operación y Mantenimiento de rutina
 - Mantenimiento de herramientas: indicar procedimiento de limpieza, inspección y colocado de las herramientas una vez concluidas las labores diarias.
 - Infraestructura del relleno: indicar procedimiento de inspección y reparación de vías de acceso y camino interno para que estas se mantengan en condiciones adecuadas de operación.
 - Drenaje de lixiviado: los drenajes externos y las canales de desvío del agua pluvial deben ser limpiados con frecuencia y especificar

- su mantenimiento para evitar la acumulación de lixiviados o ineficiencia al conducir los líquidos.
- Instalaciones: la infraestructura y demás instalaciones, como la bodega de clasificación, garita de control, igual que las instalaciones sanitarias, deben ser objeto de mantenimiento a fin de poder continuar su uso durante el período de diseño del relleno.
 - Acabado final y asentamiento: indicar sobre el colocado de las capas de la cobertura final y siembra de pasto en los terraplenes terminados que ya no recibirán más residuos, clausurándolos y dejándolos con un aspecto natural.
 - Control Ambiental: las especificaciones que se realizarán en este inciso son necesaria para evitar la propagación de la contaminación por actividades humanas de operación del relleno sanitario, por ejemplo, controlar o evitar los residuos o desechos que caen de los camiones recolectores, polvo generado por los camiones al ingreso de las instalaciones, evitar la acumulación de lodo en época lluviosa por áreas de instalaciones del relleno, etc.
 - Monitoreo ambiental: se debe monitorear el agua subterránea y superficial que pasa por el relleno sanitario para estar seguro de que el lixiviado proveniente del relleno no está causando contaminación y, para esto, se debe contratar personal calificado para las muestras y análisis.
 - Medidas higiénicas y de seguridad
 - Seguridad ocupacional: se deben indicar los procedimientos de higiene y seguridad para laborar dentro de las instalaciones sin correr ningún peligro hacia la salud de los trabajadores. También se debe contar con un botiquín y elementos de enfermería para cubrir una emergencia producida por las operaciones diarias. Indicar asignación o lugar para las herramientas luego de ser lavadas.

8. EJEMPLO DE DIMENSIONAMIENTO COMO PROPUESTA PARA MUNICIPIO DE SAN LUCAS

Para explicar lo descrito teóricamente, se describe con un ejemplo práctico la guía para el dimensionamiento de obras hidráulicas para rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales, con sus obras hidráulicas respectivas. Se muestra el procedimiento, los cálculos y criterios explicados de los capítulos anteriores.

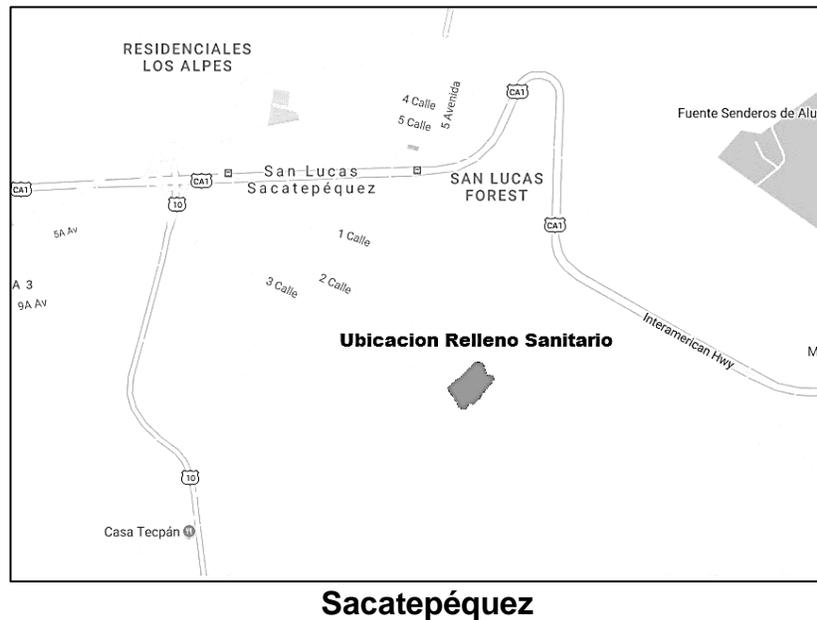
El relleno que se escogerá tiene un terreno con pendientes muy pronunciadas, para aplicar el método de diseño de rellenos sanitarios tipo cañón o terraza. Este método es el más crítico para el dimensionamiento de drenajes de lixiviados y canales pluviales los cuales se diseñarán y se detallara en planos en este capítulo.

Para la elaboración del diseño general del relleno sanitario se hará con base en un estudio de prefactibilidad en San Lucas Sacatepéquez y las obras hidráulicas se harán con base en este documento.

8.1. Información general del área del relleno sanitario

El área que se utilizará para el diseño del relleno sanitario se encuentra en Cantón Reforma (final Residencial Moctezuma), zona 2, San Lucas Sacatepéquez, departamento de Sacatepéquez. El terreno posee 7 303,84 m². Está situado en un área sin viviendas ni acceso de paso para los pobladores. Está disponible para almacenar los residuos sólidos de las comunidades vecinas.

Figura 6. **Ubicación del terreno, San Lucas Sacatepéquez,**



Fuente: Google Maps. Consulta: julio de 2017

La topografía del área donde se diseña el proyecto se puede observar en apéndice 1.

8.2. Información del diseño del relleno sanitario

Se eligió el método de cañón o terraza, ya que el terreno tiene una topografía u orografía con grandes pendientes e irregularidades. Por ello puede tomarse como guía para este trabajo de graduación. Este método consistirá en hacer plataformas de 4 o 6 metros de altura compactando unos sobre otro para luego colocar una plataforma en forma continua a este, compactándolo y recubriéndolo con una capa de material elegido, que puede ser el suelo retirado del sitio al construir la plataforma.

Según su disposición final, la cantidad de residuos sólidos producidos al día y la topografía que dificulta la compactación manual, el método de construcción y operación será de un relleno sanitario semi mecanizado.

Para este ejemplo se considera un nivel freático a una profundidad aproximada de 2 metros y un terreno donde prevalece una capa de limos con arcillas y arenas, y en la base se tiene roca de peridotita serpentizadas parcialmente alterada. El diseño del relleno sanitario se tendrá contemplado para 20 años de uso hasta su clausura.

8.3. Producción per cápita

De acuerdo con la información de la tabla I. del capítulo 1, inciso 1.2.2. se considera que la producción per cápita de la población es $PPC = 0,20$ kg/hab/día.

El dato se tomó con base en la tabla descrita en el capítulo 1, pero para realizar cálculos con mayor exactitud se debe llevar a cabo una caracterización de los residuos generados por la población.

8.4. Proyección de la producción total

Los residuos sólidos que se producen anualmente se deben estimar con base en las proyecciones de la población y la producción per cápita.

Por ser un ejemplo se proyecta el crecimiento poblacional de 2 %. El cálculo de la población a futuro se estima con la siguiente ecuación:

$$P = P_o(1 + r)^n$$

(Ecuación núm. 13)

Donde P es la población final, P_o es la población inicial, r es la tasa de crecimiento poblacional (anual), y n es el período de tiempo (años)

Calculando de la siguiente manera:

$$P = 9\,807 * (1 + 0,02)^{20}$$

$$P = 14\,537 \text{ habitantes aproximados}$$

Luego de obtener el resultado de la población a futuro que generara los residuos sólidos se calcula la producción total

8.5. Producción total

Para calcular la producción total generada por la población se utiliza la ecuación núm. 1 de la siguiente manera:

$$RS_p = \text{población} * ppc$$

$$RS_p = 14\,573 * 0,20$$

$$RS_p = 2\,914,60 \frac{kg}{dia}$$

Estimada la cobertura de recolección del 50 % de los residuos sólidos se calculará el volumen del relleno sanitario con base en esto.

$$RS_p = 2\,914,60 \times 0,5 = 1\,457,30 \frac{kg}{dia}$$

Para el diseño tipo cañón y el volumen del relleno, se consideró una densidad de residuos sólidos sin compactar de 200 kg/m^3 . Una densidad recién compactada de 450 kg/m^3 y para el volumen del relleno la densidad de los residuos sólidos estabilizados se consideró en 600 kg/m^3 .

8.6. Cálculo de volumen de residuos sólidos

El diseño se realizará con base en un área de $2604,04 \text{ m}^2$. Para determinar el volumen del relleno sanitario se estima una cobertura de recolección del 50%. Se estimará el material de cubierta o cobertura como el 20 %.

8.6.1. Volumen diario compactado

$$V_{diario} = \frac{RS_p}{DS_{rm}}$$

(Ecuación núm. 14)

Donde V_{diario} es el volumen diario ($\text{m}^3/\text{día}$), RS_p es la cantidad de residuos sólidos producidos en un día ($\text{kg}/\text{día}$), y DS_{rm} es la densidad de los residuos sólidos recién compactados (kg/m^3).

Procedemos a calcular el volumen diario:

$$V_{diario} = \frac{1\,457,30 \frac{kg}{dia}}{450,00 \frac{kg}{m^3}} = 3,24 \frac{m^3}{dia}$$

8.6.2. Volumen anual compactado

Se calcula el volumen anual compactado:

$$V_{anual} = V_{diario} * (365 \text{ dias})$$

(Ecuación núm. 15)

$$V_{anual} = \left(3,24 \frac{m^3}{dia}\right) (365 \text{ dias}) = 1\ 182,60 \frac{m^3}{año}$$

8.6.3. Volumen anual estabilizado

$$V_{anual} = \frac{RS_p}{DS_{sm}}$$

(Ecuación núm. 16)

Donde V_{anual} es el volumen anual ($m^3/año$), RS_p es la cantidad de residuos sólidos producidos en un año ($kg/año$) y DS_{sm} es la densidad de los residuos sólidos compactados estabilizados (kg/m^3).

Se calcula el volumen anual estabilizado:

$$V_{anual} = \frac{(1\ 457,30 \frac{kg}{dia} \times 365 \text{ dias})}{600 \frac{kg}{m^3}} = 886,52 \frac{m^3}{año}$$

8.7. Volumen requerido para el relleno sanitario durante su vida útil

$$VRS = V_{anual} \times MC$$

(Ecuación núm. 17)

Donde VRS es el volumen del relleno sanitario ($m^3/año$), y MC es el material de cobertura igual 1,2. Es decir que los residuos estabilizados se le agregan el 20 % de su volumen en material de cobertura compactado.

Se calcula el volumen requerido para el relleno sanitario durante su vida útil:

$$VRS = \left(\frac{980,7 \times 365}{450} \right) \times 1,2 = 795,46 \frac{m^3}{año}$$

El volumen compactado por año y el estabilizado por año se calculan según la ecuación núm. 16.

El volumen total ocupado durante la vida útil del relleno sanitario se calcula por medio de la sumatoria del volumen ocupado desde el año 1 hasta el año 20 como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla IV. Volumen total ocupado durante la vida útil del relleno sanitario

AÑO	HABITANTES	PRODUCCION	COMPATADOS DIARO	COMPATADOS ANUAL	ESTABILIZADOS ANUAL	MATERIAL COMPACTADO ANUAL	RESIDUO SOLIDOS + MATERIAL COMPACTADO	VOLUMEN ACUMULADO ANUAL
		Kg/día	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³	m ³
0	9807	980,70	2,18	795,46	596,59	119,32	715,91	715,91
1	10 004	1 000,40	2,22	811,44	608,58	121,72	730,29	1 446,20
2	10 204	1 020,40	2,27	827,66	620,74	124,15	744,89	2 191,10
3	10 408	1 040,80	2,31	844,20	633,15	126,63	759,78	2 950,88
4	10 616	1 061,60	2,36	861,08	645,81	129,16	774,97	3 725,85
5	10 828	1 082,80	2,41	878,27	658,70	131,74	790,44	4 516,29
6	11 045	1 104,50	2,45	895,87	671,90	134,38	806,29	5 322,58
7	11 266	1 126,60	2,50	913,80	685,35	137,07	822,42	6 144,99
8	11 491	1 149,10	2,55	932,05	699,04	139,81	838,84	6 983,84
9	11 721	1 172,10	2,60	950,70	713,03	142,61	855,63	7 839,47
10	11 955	1 195,50	2,66	969,68	727,26	145,45	872,72	8 712,19
11	12 194	1 219,40	2,71	989,07	741,80	148,36	890,16	9 602,35
12	12 438	1 243,80	2,76	1 008,86	756,65	151,33	907,97	10 510,32
13	12 687	1 268,70	2,82	1 029,06	771,79	154,36	926,15	11 436,47
14	12 941	1 294,10	2,88	1 049,66	787,24	157,45	944,69	12 381,17
15	13 199	1 319,90	2,93	1 070,59	802,94	160,59	963,53	13 344,69
16	13 463	1 346,30	2,99	1 092,00	819,00	163,80	982,80	14 327,49
17	13 733	1 373,30	3,05	1 113,90	835,42	167,08	1 002,51	15 330,00
18	14 007	1 400,70	3,11	1 136,12	852,09	170,42	1 022,51	16 352,51
19	14 287	1 428,70	3,17	1 158,83	869,13	173,83	1 042,95	17 395,46
20	14 573	1 457,30	3,24	1 182,03	886,52	177,30	1 063,83	18 459,29

Fuente: elaboración propia.

8.8. Dimensionamiento y cálculo de las áreas requeridas en el terreno

Una vez seleccionado el terreno, se determina el área necesaria para la construcción de cada plataforma dentro del relleno sanitario, con base en el método tipo cañón. Como se conoce la profundidad del nivel freático (2 metros), se propone que las plataformas vayan sobre el nivel del terreno, excavando la menor área posible, para evitar el contacto de los lixiviados con las aguas subterráneas.

El terreno seleccionado consta de un área de 7 303,84 m², que se distribuye en los diferentes elementos y obras que componen un relleno sanitario. El área que se utilizará, específicamente para la construcción de las plataformas de residuos sólidos, es de 2 604,04 m², y el área que se utilizará para el cálculo del caudal de diseño para la pileta es la cuarta plataforma que mide 941,64 m² es decir, la que tiene mayor área.

El criterio para el dimensionamiento de las plataformas se basa en la topografía, tomando una altura de 6 m. Se determina la construcción de 4 plataformas, puestas una sobre la otra, dejando un talud a cada una a 45° para mantener su estabilización. La construcción de la sección de las plataformas se puede observar en el apéndice 6.

Las áreas calculadas para cada plataforma y su tiempo de llenado se encuentran en la tabla V.

Tabla V. **Áreas y tiempo de llenado de cada plataforma**

	Área	Altura	Volumen	Volumen Acumulado	Tiempo llenado
No.	m ²	m	m ³	m ³	años
1	765,93	6,00	4 595,58	4 595,58	5,18
2	849,47	6,00	5 096,82	9 692,40	10,93
3	912,73	6,00	5 476,38	15 168,78	17,11
4	941,64	6,00	5 649,84	20 818,62	23,48

Fuente: elaboración propia.

El volumen y el peso por plataforma según su conformación se pueden observar en el apéndice 4.

8.9. Personal operativo del relleno sanitario

La mano de obra necesaria para operar este relleno sanitario semi mecanizado tipo cañón dependerá de:

- La cantidad de residuos y desechos sólidos no útiles que se debe disponer.
- La disponibilidad y el tipo de material de cobertura.
- Los días laborables en el relleno.
- La duración de la jornada diaria.
- Las condiciones del clima.
- La descarga de los desechos en el frente de trabajo según la distancia.
- El rendimiento de los trabajadores.

Por medio de la tabla VI, se estima el número de trabajadores necesarios para la operación del relleno sanitario, considerando una jornada de ocho horas diarias, con un tiempo efectivo de seis horas. Estos rendimientos se contemplan bajo condiciones normales de trabajo, con ayuda del equipo y herramientas

propuestas. En esta tabla T/día significa tonelada al día; Hr-hom, horas hombre y; Hr, horas. Las constantes 0,95, 5, y 0,35 denotan el rendimiento del trabajo Hr-hom y conforman parte de una fórmula empírica.

La ecuación para el cálculo del rendimiento de mano de obra en el relleno es la siguiente:

$$\text{Rendimiento} \left(\frac{\text{hombre}}{\text{día}} \right) = \frac{\text{Actividad necesaria al día}}{\text{Rendimiento de un hombre por hora}} \times \frac{1}{\text{Horas efectivas al día}}$$

(Ecuación núm. 18)

Los resultados de rendimiento se muestran en la siguiente tabla.

Tabla VI. Operación y rendimiento de mano de obra del relleno sanitario

Operación	Rendimientos	Hombre/día
Movimiento de residuos	$\frac{1,5 \frac{T}{\text{día}}}{0,95 \frac{T-\text{hom}}{\text{Hr}}} \times \frac{1 \text{ día}}{6 \text{ Hr}}$	0,26
Compactación de desechos	$\frac{6,48 \frac{m^2}{\text{día}}}{5 \frac{m^2-\text{hom}}{\text{Hr}}} \times \frac{1 \text{ día}}{6 \text{ Hr}}$	0,22
Movimiento de tierra	$\frac{0,65 \frac{m^3}{\text{día}}}{0,35 \frac{m^3-\text{hom}}{\text{Hr}}} \times \frac{1 \text{ día}}{6 \text{ Hr}}$	0,31
Compactación de la plataforma	$\frac{3,25 \frac{m^2}{\text{día}}}{5 \frac{m^2-\text{hom}}{\text{Hr}}} \times \frac{1 \text{ día}}{6 \text{ Hr}}$	0,11
Total		0,9

Fuente: elaboración propia.

Los resultados mostrados en la tabla VI, son los rendimientos por día calculados con las consideraciones siguientes:

- Los pesos y volúmenes máximos de sólidos recolectados, para determinar el personal máximo requerido para operar el relleno sanitario se toman de la tabla IV.
- Un hombre tiene un rendimiento de 0,95 T/hora, trabaja 6 horas efectivas y el peso máximo de residuos sólidos recolectados al día, según la tabla IV, es de 1 457,30 kg/día igual a 1,5 T/día. Da como resultado 0,26 hombre/día. Este es para los movimientos de todo el peso de todos los residuos que llegan al relleno y los que se clasifican en un día.
- El área de compactación y área de disposición de los desechos en la plataforma será igual a (volumen diario) / (profundidad estimada al día), es decir, según la tabla IV será de $3,24\text{m}^3 / 1,00\text{m}$. El área diaria sería de $3,24\text{ m}^2/\text{día}$. Pero la compactación se realizará cada 0,50 m para mejor ejecución y compactación, por lo tanto, el área será de $6,48\text{ m}^2/\text{día}$. Aplicando que un hombre puede compactar $5\text{ m}^2/\text{hora}$ mecánicamente y solo trabaja 6 horas efectivas esto dará 0,22 hombre/día.
- El movimiento de tierra para la cobertura se consideró como un 20% del volumen de desechos sólidos. Si un hombre tiene un rendimiento de $0,35\text{ m}^3/\text{hora}$, y si el volumen máximo a mover será el área a compactar por el espesor de cobertura que es igual a $3,24\text{m}^2 \times 0,2\text{m} = 0,65\text{ m}^3/\text{día}$ y se trabaja 6 horas efectivas, el rendimiento será de 0,31 hombre/día.
- El área de compactación de tierra en la plataforma será igual al (volumen diario) / (profundidad de material de cobertura), es decir, $0,65\text{ m}^3/\text{día} / 0,2\text{m} = 3,25\text{ m}^2/\text{día}$. Aplicando que un hombre puede compactar $5\text{ m}^2/\text{hora}$ mecánicamente y solo trabaja 6 horas efectivas obtenemos el resultado de 0,11 hombre/día.
- En total se necesita 0,9 hombre al día, se estima para un período de recolección de 3 días a la semana, es decir ($7/3$ igual a 2,33 días), los

hombres dedicados al relleno serán: 0,90 hombre/día por 2,33 días igual a 2,1 hombres. Por lo tanto, se consideran 3 hombres. El resto de días lo dedicaran a la clasificación de los residuos.

Para la operación de las actividades del relleno sanitario se requiere del siguiente personal:

- 1 encargado del relleno
- 3 acondicionadores para el relleno sanitario y clasificación de los residuos de acuerdo a la tabla VI.
- 2 guardias de la garita de ingreso

El encargado del relleno sanitario: registrará todas las actividades que se lleven a cabo, el volumen de desechos que ingresan y de la colocación de los mismos en los lugares correspondientes. Detallará en un libro el avance en las plataformas de desechos y dirigirá la colocación y compactación en las plataformas. Hará el traslado de los desechos a la bodega de reciclaje y a la de compost.

Los acondicionadores de desechos los seleccionarán, colocarán y compactarán en la plataforma. Además, trasladarán los desechos al lugar que les corresponde, los voltearán en las pilas de compost 2 veces por semana y otras actividades que el encargado les indique, como colocación de llantas en los bordillos y jardinería de las instalaciones.

Los guardias de la garita controlarán el ingreso de las personas y de los vehículos, por medio de un libro de ingresos, consultarán al encargado si se concede permiso de ingreso o se deniega.

El personal deberá contar con todas las herramientas de trabajo y del equipo de seguridad.

8.10. Tiempo de excavación de plataformas con maquinaria

El tiempo de maquinaria es lo que se necesita con retroexcavadora para realizar las excavaciones de la plataforma que se requiere cada año.

$$T_{exc} = \frac{V_z}{R * J}$$

(Ecuación núm. 19)

Donde T_{exc} es el tiempo de maquinaria (días), V_z el volumen de plataforma (m^3), R el rendimiento de excavación de la maquinaria ($m^3/hora$), y J la jornada de trabajo (horas/día). Considerando $R = 14 m^3/hora$; $J = 8$ horas/día efectivo.

Tabla VII. **Días de trabajo en excavación de plataformas**

No.	Área m^2	Volumen m^3	Tiempo de Maquinaria días
1	67,924	4543,029	54,08
2	40,514	2838,735	33,79
3	33,242	2450,667	29,17
4	59,318	3518,625	41,89

Fuente: elaboración propia.

Según el rendimiento y la jornada de trabajo especificadas anteriormente el tiempo de excavación requerido, por ejemplo, en la primera plataforma es de 54 días con 2 horas aproximadamente. Este es el tiempo que se tarda en remover $4\,543,029 m^3$ con esos parámetros. Sin embargo, la excavación de la plataforma para ese volumen se puede realizar según lo disponga el operador

del relleno y de acuerdo con los requerimientos, para no tener una plataforma abierta por largos períodos sin ser utilizada. Es mejor avanzar con la excavación según se avance el llenado.

8.11. Hidrología para determinación de caudales

A continuación, se muestra los cálculos por medio de los estudios hidrológicos para determinar el caudal de diseño de las obras hidráulicas.

8.11.1. Cálculo del caudal para tuberías de lixiviados

El cálculo del caudal para encontrar el diámetro de las tuberías de lixiviados se realiza con base a la ecuación núm. 5, que se muestra a continuación:

$$Q = P \cdot A \cdot K \cdot T^{-1}$$

El dato de precipitación anual para la ecuación se toma de la tabla VIII. La precipitación pluvial promedio anual para el departamento de Sacatepéquez es de 1182,00 mm.

Tabla VIII. Precipitación y evotranspiración mensual, estación Florencia

	Precipit.	ETo
Mes	mm	mm
Enero	2,00	113,08
Febrero	4,00	110,40
Marzo	4,00	138,15
Abril	30,00	145,85
Mayo	117,00	138,21
Junio	248,00	114,71
Julio	204,00	110,80
Agosto	169,00	115,78
Septiembre	228,00	97,92
Octubre	143,00	96,48
Noviembre	24,00	98,58
Diciembre	9,00	109,18
Total	1 182,0	1 389,1

Fuente: datos tomados de la estación Florencia, FAO CLIMWAT/INSIVUMEH.

El coeficiente de compactación se calcula por medio de la ecuación núm.

6:

$$K = \frac{\text{Densidad de residuos sólidos descargada en relleno sanitario}}{\text{Densidad de residuos sólidos en relleno sanitario}}$$

$$K = \frac{200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,33$$

El área para calcular el caudal es el proyectado para cada plataforma del relleno sanitario.

Luego se procede a calcular el caudal de lixiviados según la ecuación núm. 5. Se realizará el cálculo de la primera plataforma para ejemplificar el cálculo de diámetros y caudales a sección parcial y sección llena de tuberías realizado para cada plataforma:

El caudal a sección parcial que se calcula para las tuberías de lixiviados en las plataformas se representa con q y el caudal a sección llena se representa con Q .

$$q = P \cdot A \cdot K \cdot T^{-1}$$

$$q = (1\,182,00\text{ mm}) \cdot (765\,932\text{ m}^2) \cdot (0,33) \cdot (31\,536\,000,00\text{ seg})^{-1}$$

$$q = 0,0096 \frac{\text{lt}}{\text{seg}} = 0,0000096 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

El caudal para el diseño de las tuberías a sección parcial de lixiviados es $0,0000096\text{ m}^3/\text{seg}$ para la plataforma del primer nivel.

A continuación, se calcula el caudal a sección llena de una tubería de 4 pulgadas, según la recomendación planteada en el capítulo 4, para facilitar su mantenimiento. Se utiliza la ecuación núm. 9.

$$Q = \frac{A \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n}$$

Los valores para calcular el caudal a sección llena son:

$$A = \frac{\pi(d)^2}{4} \text{ Donde el diámetro es } 4'' \text{ o } 0,114\text{ m}$$

$$R_h = \frac{d}{4} \text{ Donde el diámetro es } 4'' \text{ o } 0,114\text{ m}$$

S es la pendiente de 0,005 en cada plataforma

n el coeficiente de Manning para PVC igual a 0,009

Al introducir datos la ecuación queda la siguiente manera:

$$Q = \frac{\left(\frac{\pi(0,114)^2}{4}\right) \cdot (0,0285)^{2/3} \cdot (0,005)^{1/2}}{0,009}$$

$$Q = 0,00075 \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal para el diseño de las tuberías a sección llena de lixiviados es 0,00075 m³/seg para la plataforma del primer nivel.

Luego de realizar los cálculos de caudales se realiza la relación que existe entre la sección parcial y la sección llena.

$$\text{relacion entre caudales} = \frac{q}{Q} \quad (\text{Ecuación núm. 20})$$

$$\text{relacion entre caudales} = \frac{0,0000096}{0,00075}$$

$$\text{relacion entre caudales} = 0,00128043$$

Estos datos se utilizan para el dimensionamiento y posición de las tuberías de lixiviados.

8.11.2. Cálculo del caudal para planta de tratamiento

Para el dimensionamiento de la pileta de oxidación de lixiviados se realiza con base al Balance Hídrico en la ecuación núm. 4. Tomando como coeficiente de escurrimiento para la superficie del terreno $C_E = 0,15$. La ecuación por utilizar para determinar cantidad de lixiviados es:

$$q = P(1 - C_E) - E$$

En la siguiente tabla se indican los valores de precipitación y la evapotranspiración por mes, de la estación más cercana al área del terreno.

Tabla IX. **Balance hídrico para determinar los lixiviados, estación Florencia**

	Precipit.	ETo	q (lixiviados)
Mes	mm	mm	m ³ /m ²
Enero	2,00	113,08	-111,38
Febrero	4,00	110,40	-107,00
Marzo	4,00	138,15	-134,75
Abril	30,00	145,85	-120,35
Mayo	117,00	138,21	-38,76
Junio	248,00	114,71	96,09
Julio	204,00	110,80	62,60
Agosto	169,00	115,78	27,87
Septiembre	228,00	97,92	95,88
Octubre	143,00	96,48	25,07
Noviembre	24,00	98,58	-78,18
Diciembre	9,00	109,18	-101,53

Fuente: datos tomados de la estación Florencia, FAO CLIMWAT/INSIVUMEH.

En la anterior tabla se calcula el valor de caudal de lixiviado producido para cada mes a utilizar en el diseño de la planta de tratamiento.

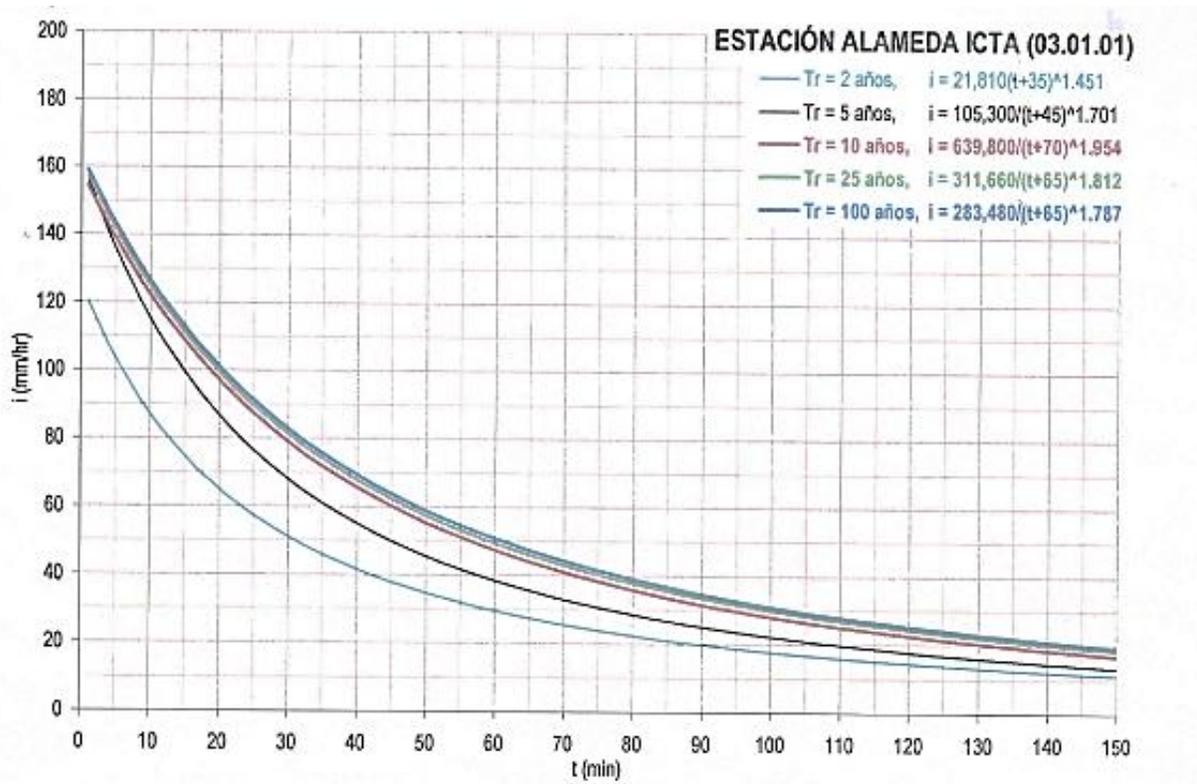
8.11.3. Cálculo del caudal para canales perimetrales

Para el cálculo de los canales perimetrales se utiliza principalmente el Método Racional para conocer el caudal probable por tratar de escorrentía, provocado por una probabilidad de ocurrencia de precipitación de un período de retorno de 100 años. Se utiliza este método porque es útil para determinar la cantidad de caudal o crecida de escurrimiento sobre una región específica o área pequeña para el diseño de obras civiles que se puedan ver afectadas por un gran caudal. Este método se recomienda no usarse en áreas mayores a 2 kilómetros cuadrado (200 Ha).

La estación utilizada para el cálculo de la intensidad de lluvia es la estación Alameda ICTA y su ubicación se puede observar en el anexo 1. Las

curvas de intensidad – duración – frecuencia de la estación se muestran a continuación.

Figura 7. **Curvas de intensidad, duración & frecuencia IDF, estación Alameda ICTA**



Fuente: INSIVUMEH.

Se toma la curva para un período de retorno de 100 años.

$$i = \frac{283\,480}{(t + 65)^{1,787}}$$

Donde i es la intensidad de lluvia (mm/hora) igual a **142,9987 mm/hora**, y T el tiempo de concentración en minutos igual a **5 min** por ser pequeño el área del proyecto.

El caudal calculado para cada canal perimetral se realiza con base en el área de influencia de escorrentía de cada uno, por lo tanto, para cada diseño se aplica la ecuación del Método Racional (ecuación núm. 2), Utilizando como Coeficiente de escorrentía $C = 0,4$.

$$Q_E = \frac{C \cdot i \cdot A_d}{3,6 \times 10^6}$$

Para conocer el comportamiento de la precipitación sobre la región analizada se elabora un hietograma para la discretización a cada 5 minutos de un período de retorno de 100 años con un tiempo de concentración de 100 minutos.

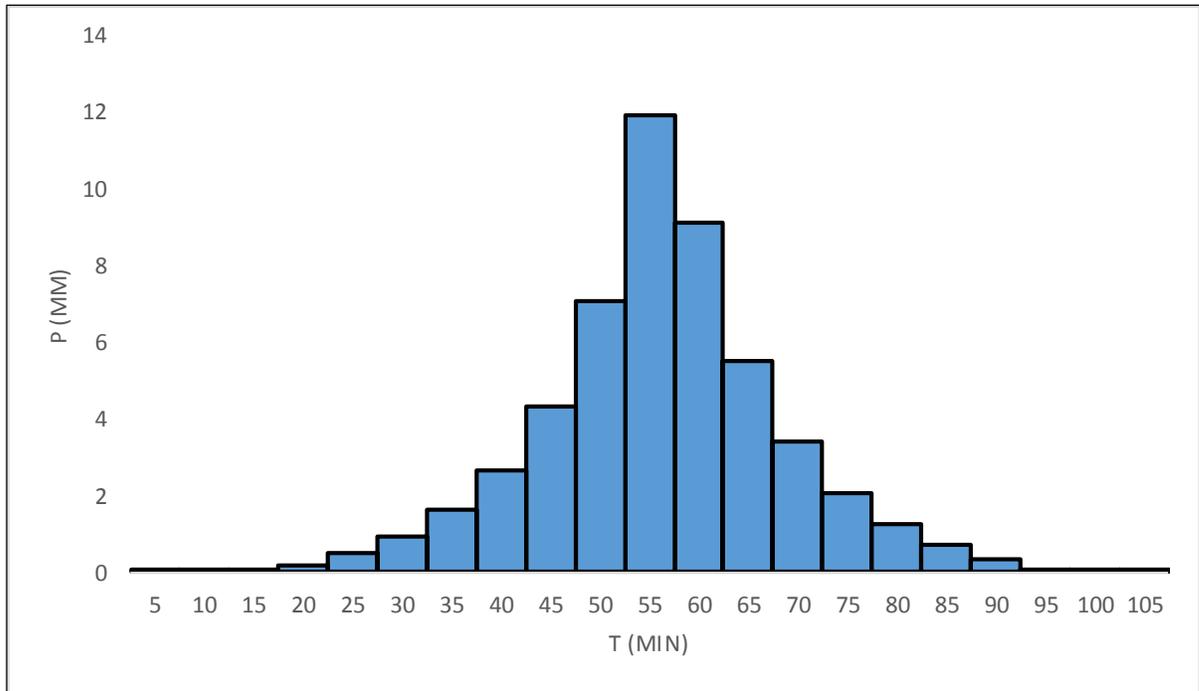
Tabla X. **Hietograma para la discretización a cada 5 min de un período de retorno de 100 años, tiempo de concentración de 100 minutos**

	Tiempo	Tiempo	Intensidad	P	ΔP	ΔP Ordenados
No. Intervalo	Hora	Minutos	mm/hora	mm	mm	mm
1	00:00-00:05	5	142,999	11,917	11,917	0,002
2	00:00-00:10	10	126,412	21,069	9,152	0,002
3	00:00-00:15	15	112,642	28,161	7,092	0,002
4	00:00-00:20	20	101,077	33,692	5,532	0,207
5	00:00-00:25	25	91,262	38,026	4,334	0,508
6	00:00-00:30	30	82,857	41,429	3,403	0,954
7	00:00-00:35	35	75,600	44,100	2,671	1,629
8	00:00-00:40	40	69,288	46,192	2,092	2,671
9	00:00-00:45	45	63,761	47,821	1,629	4,334
10	00:00-00:50	50	58,892	49,077	1,256	7,092
11	00:00-00:55	55	54,579	50,031	0,954	11,917
12	00:00-00:60	60	50,739	50,739	0,709	9,152
13	00:00-00:65	65	47,305	51,247	0,508	5,532
14	00:00-00:70	70	44,220	51,590	0,343	3,403
15	00:00-00:75	75	41,437	51,797	0,207	2,092
16	00:00-00:80	80	38,919	51,892	0,095	1,256
17	00:00-00:85	85	36,631	51,894	0,002	0,709
18	00:00-00:90	90	34,546	51,819	0,002	0,343
19	00:00-00:95	95	32,641	51,681	0,002	0,095
20	00:00-00:100	100	30,894	51,491	0,002	0,002
21	00:00-00:105	105	29,289	51,256	0,002	0,002

Fuente: elaboración propia.

El hietograma de diseño queda de la siguiente forma.

Figura 8. **Hietograma para discretización a cada 5 minutos**



Fuente: elaboración propia.

8.12. Dimensionamiento de obras hidráulicas

Con base en los caudales calculados anteriormente se dimensionan las obras hidráulicas para el relleno sanitario.

8.12.1. Dimensionamiento de las tuberías de drenaje para lixiviados

Para el dimensionamiento del diámetro de la tubería de drenaje de cada plataforma se calculan los diámetros y velocidades de las tuberías a sección parcial y a sección llena.

Los datos de las cotas que se excavarán para colocar las tuberías de drenaje de lixiviados y el caudal a sección parcial producido por plataforma (calculados en el capítulo 8, inciso 8.11.1.) se muestran a continuación.

Tabla XI. **Cotas y caudal de tubería de drenaje de lixiviados**

No.	Cota		Longitud (m)	Área (m ²)	Área Acumulada	q (m ³ /s)
	Inicial	Final				
1	1 956,223	1 956,114	21,878	765,932	765,932	0,0000096
2	1 962,258	1 962,114	28,772	849,472	1 615,404	0,0000202
3	1 968,273	1 968,114	31,724	912,732	2 528,136	0,0000316
4	1 974,288	1 974,114	34,725	941,644	3 469,78	0,0000434

Fuente: elaboración propia.

Para desarrollar las labores de operación y mantenimiento se utiliza el diámetro mínimo recomendado de 4 pulgadas (0,114 m) en los cálculos de la tubería de recolección de lixiviados.

Los resultados de los cálculos de los diámetros y su relación a sección parcial y sección llena de las tuberías se muestran en la tabla XII.

Tabla XII. **Relación entre de tuberías a sección llena y a sección parcial**

No.	q m ³ /s	S mm	Diámetro Propuesto 4" m	Radio Hidráulico m	V m/s	Q m ³ /s	q/Q	d/D	v/V
1	0,00000957	0,005	0,114	0,0285	0,7322	0,0075	0,00128	0,027	0,1716
2	0,00002018	0,005	0,114	0,0285	0,7322	0,0075	0,00270	0,038	0,2148
3	0,00003159	0,005	0,114	0,0285	0,7322	0,0075	0,0042	0,047	0,2467
4	0,00004335	0,005	0,114	0,0285	0,7322	0,0075	0,00580	0,055	0,2733

Fuente: elaboración propia.

Las velocidades, diámetros y cotas invert correspondientes a cada tubería por número de plataforma se muestran en la siguiente tabla.

Tabla XIII. **Velocidades, diámetros y numero de Froude de cada nivel del relleno sanitario**

No.	q	v	d	No. Froude	Cota Invert	
	m ³ /s	m/s	m		Inicial	Final
1	0,0000096	0,1257	0,0031	0,7231	1 956,109	1 956,000
2	0,0000202	0,1572	0,0043	0,7628	1 962,144	1 962,000
3	0,0000316	0,1807	0,0054	0,7880	1 968,159	1 968,000
4	0,0000434	0,2001	0,0063	0,8069	1 974,174	1 974,000

Fuente: elaboración propia.

La tubería principal de PVC que conduce el lixiviado de las tuberías se coloca de 6 pulgadas con una pendiente del 1 %. El sistema de drenaje para lixiviados se recomienda realizarlo con base al capítulo 4, inciso 4.2.

Las tuberías de recolección de drenaje entre plataformas se conectarán a través de pozos de visitas de 70 cm de diámetro, ubicados a un metro del perímetro de la plataforma inferior para cada nivel.

El detalle de la colocación de las tuberías de lixiviados se encuentra en el apéndice 6 y 7.

8.12.2. Dimensionamiento de la planta de tratamiento de lixiviados

Luego, se calcula el volumen y área de lixiviados con la ecuación núm. 7. Para el cálculo del área se asume 2 metros de altura, y el área crítica en las plataformas es de 941.64 m². La ecuación para encontrar el volumen es la siguiente:

$$Q_m = 0,001 \cdot q \cdot A_E$$

El cálculo del volumen y área están representados en la tabla XIV.

Tabla XIV. **Volumen y área mensual de lixiviados, estación Florencia**

Mes	Qm m ³	Área m ²
Enero	-104,88	
Febrero	-100,76	
Marzo	-126,89	
Abril	-113,33	
Mayo	-36,50	
Junio	90,48	45,24
Julio	58,95	29,47
Agosto	26,24	13,12
Septiembre	90,28	45,14
Octubre	23,61	11,80
Noviembre	-73,62	
Diciembre	-95,60	
Total	289,60	144,8

Fuente: datos tomados de la estación Florencia, FAO CLIMWAT/INSIVUMEH

Tomando el volumen anual igual a 289,60 m³/año mostrado en la tabla XIV, las dimensiones para la pileta propuestas son las siguientes: 10 m de ancho, 16 m de largo y 2 m de altura. Por lo tanto, el volumen considerado será suficiente para la producción de lixiviados producido en la totalidad del año.

Los detalles de las dimensiones de la pileta de oxidación de lixiviados se pueden observar en el apéndice 8.

8.12.3. Cálculo y diseño de los canales perimetrales en el relleno sanitario

Para el cálculo de las dimensiones de cada canal se utilizará la ecuación de Manning, usando como material de conformación de la sección el suelo que

se encuentra en el terreno, compactado, siendo el coeficiente de Manning a utilizar para suelo excavado y limpiado de $n = 0.04$ (ecuación núm. 12).

$$V = \frac{R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n}$$

En la siguiente tabla se muestra el caudal, la longitud y la altura de cada canal a calcular, ubicado en el perímetro del relleno sanitario. Los canales están ubicados a 3,00 m de las plataformas donde se depositan los residuos sólidos, evitando así que el lixiviado pueda tener contacto con el agua que pluvial captada en los canales.

Tabla XV. **Caudales, longitudes y altura de los canales del relleno sanitario**

	Área Tributaria	Q	Q acumulado	Longitud	h
Canal	m ²	m ³ /s	m ³ /s	m	m
1	2 515,26	0,0400	0,0400	68,096	1,85
2	842,11	0,0134	0,0533	20,716	24,00
3	160,72	0,0026	0,0559	20,447	16,00
4	50,00	0,0008	0,0567	14,390	11,00

Fuente: elaboración propia.

Cada canal especificado en la tabla XV tiene tramos calculados individualmente en relación a como mejor se acomode en la topografía respectiva del terreno. Así se evitan las altas velocidades que erosionen los taludes y por lo tanto puedan afectar en la operación y mantenimiento del relleno sanitario.

Los cálculos de todos los canales con sus tramos respectivos fueron realizados en el programa de canales abiertos especificado en la tesis

“Utilización de la hoja electrónica en computadoras personales para el diseño hidráulico y movimiento de tierras de canales abiertos”. En la figura 9 se muestra un ejemplo del cálculo realizado para el canal 1, en su tramo 1,1.

Figura 9. Ejemplo de cálculo para el canal 1, tramo 1.1

PROYECTO:		Residencial Moctezuma, zona 2, San Lucas Sacatepéquez						
DISEÑO HIDRÁULICO DE CANALES								
CANAL:		1, TRAMO 1.1						
EST INICIAL (Eo):	0	EST FINAL (Ef):	68.096	S =	25 0/00	CLA INI =	1981.7	msnm
Q* =	0.04	m ³ /s	y opt =	0.1637957	m	25% de y =	0.035	m
			b opt =	0.3275914	m			
Qd =	0.029	m ³ /s	T =	0.3	m	Vc =	3.26432	m ³
m1 =	0		A =	0.042	m ²	Vxcub =	9.39296	m ³
n =	0.04		P =	0.58	m			
S =	0.025	m/m	R =	0.0724138	m			
b =	0.30	m	V =	0.6867377	m/s			
y =	0.14	m	B =	0.300	m			
f =	0.160	m	G =	1.100	m			
H =	0.3	m	Fr =	0.5859929				
m2 =	0		V max =	0.852	m/s			
HI =	0.4	m	Q max =	0.077	m ³ /s			
HD =	0.4	m	Cap. Ext. =	165.733	%			
t =	0.05	m	Fr max =	0.4964188				
ℓ =	0.1	m						

Fuente: MAZARIEGOS, Fernando. *Utilización de la hoja electrónica en computadoras personales para el diseño hidráulico y movimiento de tierras de canales abiertos*. p. 23.

Los resultados obtenidos en el programa se muestran en las siguientes tablas:

Tabla XVI. **Cálculo de dimensiones, velocidades y núm. Froude para los tramos del canal 1**

CANAL 1	L tramo	S	Base	Altura	Y opt	Vel	Froude	Cota invert (m)	
Tramo	m		m	m	m	m/s		inicial	final
1.1	68.096	0.025	0.3	0.3	0.16	0.718	0.573	1981.70	1980.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Cálculo de dimensiones, velocidades y núm. Froude para los tramos del canal 2**

CANAL 2	L tramo	S	Base	Altura	Y opt	Vel	Froude	Cota invert (m)	
Tramo	m		m	m	m	m/s		inicial	final
2,1	3,370	0,045	0,3	0,3	0,16	0,963	0,769	1 979,85	1 979,70
2,2	3,352	0,045	0,3	0,3	0,16	0,963	0,769	1 977,85	1 977,70
2,3	3,383	0,044	0,3	0,3	0,16	0,953	0,761	1 975,85	1 975,70
2,4	3,321	0,045	0,3	0,3	0,16	0,963	0,769	1 973,85	1 973,70
2,5	3,349	0,045	0,3	0,3	0,16	0,963	0,769	1 971,85	1 971,70
2,6	3,352	0,045	0,3	0,3	0,16	0,963	0,769	1 969,85	1 969,70

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Cálculo de dimensiones, velocidades y núm. Froude para los tramos del canal 3**

CANAL 3	L tramo	S	Base	Altura	Y opt	Vel	Froude	Cota invert (m)	
Tramo	m		m	m	m	m/s		inicial	final
3,1	3,574	0,042	0,3	0,3	0,17	0,949	0,735	1 967,85	1 967,70
3,2	2,552	0,059	0,3	0,3	0,16	1,103	0,881	1 965,85	1 965,70
3,3	2,552	0,059	0,3	0,3	0,16	1,103	0,881	1 963,85	1 963,70
3,4	2,552	0,059	0,3	0,3	0,16	1,103	0,881	1 961,85	1 961,70
3,5	2,552	0,059	0,3	0,3	0,16	1,103	0,881	1 959,85	1 959,70
3,6	2,552	0,059	0,3	0,3	0,16	1,103	0,881	1 957,85	1 957,70
3,7	2,552	0,059	0,3	0,3	0,16	1,103	0,881	1 955,85	1 955,70
3,8	1,831	0,071	0,3	0,3	0,15	1,185	0,977	1 953,70	1 953,57

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Cálculo de dimensiones, velocidades y núm. Froude para los tramos del canal 4**

CANAL 4	L tramo	S	Base	Altura	Y opt	Vel	Froude	Cota invert (m)	
								Tramo	m
4,1	1,981	0,076	0,3	0,3	0,15	1,226	1,011	1 951,85	1 951,70
4,2	2,696	0,056	0,3	0,3	0,16	1,075	0,858	1 949,85	1 949,70
4,3	2,696	0,056	0,3	0,3	0,16	1,075	0,858	1 947,85	1 947,70
4,4	2,696	0,056	0,3	0,3	0,16	1,075	0,858	1 945,85	1 945,70
4,5	2,696	0,056	0,3	0,3	0,16	1,075	0,858	1 943,85	1 943,70
4,6	1,692	0,124	0,3	0,3	0,14	1,529	1,305	1 942,80	1 942,59

Fuente: elaboración propia.

Los detalles de ubicación y posición de los tramos se pueden observar en los apéndices 9 y 10.

La velocidad de los tramos de los canales cumple con los parámetros de velocidades recomendadas. Con base en los tirantes óptimos y la base propuesta, las dimensiones de los canales serán de 30 cm de base y 30 cm de altura en la sección transversal.

Los canales desfogarán el agua pluvial recolectada sobre el río Chilayon que se encuentra en las cercanías del relleno sanitario.

CONCLUSIONES

1. Esta guía para el dimensionamiento de obras hidráulicas de un relleno sanitario de residuos sólidos municipales indica los estudios necesarios para analizar los caudales de diseño del relleno los cuales son: la precipitación promedio mensual, la evapotranspiración promedio mensual del área del terreno y el estudio de las intensidades para los períodos de retornos de ocurrencia en el área seleccionada, para calcular el caudal que se evacuará por el método racional. Con base en estos caudales se dimensionan las tuberías de recolección, el volumen que se tratará en la pileta de oxidación de lixiviados y los canales de desvío de escorrentía pluvial.
2. Los parámetros técnicos para determinar el balance hídrico producido en un relleno sanitario están en función de la precipitación pluvial, la infiltración del agua de escurrimiento, la evapotranspiración del lugar, la humedad, densidad de los residuos depositados, la capacidad de campo de los residuos y la cobertura para retener el agua que se infiltra. La relación entre el balance hídrico y el diseño de un relleno sanitario es la determinación del caudal resultante de los ingresos (precipitación y escorrentía) y egresos (infiltración o evapotranspiración) que puede ocurrir en los estratos del relleno sanitario y de las áreas aledañas del proyecto. Por esto, es necesario que se impermeabilice la base donde se ubicarán las obras civiles para evitar que los lixiviados producidos tengan un contacto directo con las aguas subterráneas. Por esta razón, también es necesario evitar capas de vegetal dentro y en el

perímetro del relleno, esto es un factor que influye en el balance hídrico, eliminando la variable de transpiración producido por las plantas.

3. Los caudales de diseño para las obras hidráulicas están basados, en su mayor parte, por el análisis de las precipitaciones, evaporación e intensidades de lluvia. El caudal de diseño para el drenaje de conducción y tratamiento de lixiviados se basan en un estudio de la precipitación que cae sobre el área útil del relleno sanitario, la infiltración que tiene sobre este, la evaporación y la capacidad de la cobertura para retener el agua que se infiltra calculado con la ecuación del balance hídrico. El caudal de diseño para los canales de desvío de agua de escurrimiento pluvial es el caudal máximo provocado por una intensidad de lluvia probable, durante una tormenta de diseño para un período de año específico.
4. Las obras hidráulicas necesarias para el correcto funcionamiento de un relleno sanitario sin afectar al ambiente, ni la salud de los pobladores son: tuberías de recolección ubicadas en la base de las celdas o plataformas para conducir el lixiviado producido por la descomposición de los residuos sólidos y el agua que infiltra sobre ellas; zanjas de oxidación o pileta de oxidación de lixiviados para dar tratamiento a los líquidos evacuados desde el relleno; y canales perimetrales de desvío de agua de escurrimiento pluvial.
5. Las tuberías de recolección y la pileta de oxidación de lixiviados se calculan por medio del caudal obtenido de la ecuación de balance hídrico y el área crítica donde se infiltra. Para el cálculo de las tuberías se realiza el dimensionamiento a sección parcial y a sección llena con la ecuación de Manning para evitar saturar el drenaje. Para el cálculo de

la pileta de oxidación de lixiviados, con base en el cálculo hidrológico se determina el volumen de lixiviados producidos durante el año, con el cual se dimensiona la pileta.

6. Los canales perimetrales de desvío de agua de escorrentía pluvial son dimensionados con el caudal calculado por medio del Método Racional, el coeficiente de escorrentía por tipo de suelo y la topografía de las áreas que influyen en el perímetro del relleno sanitario. Luego de obtener el caudal de diseño se utiliza la ecuación de Manning para calcular las dimensiones de los canales perimetrales.
7. El ejemplo desarrollado esta con base a un estudio de prefactibilidad, donde se encuentra los criterios, estudios, diseños y dimensionamientos explicados teóricamente en la guía. Aplicado a una región de San Lucas Sacatepéquez, se diseñó un relleno sanitario semimecanizado de residuos sólidos, con el método tipo cañón o terraza, con sus obras hidráulicas respectivas: drenaje de lixiviados, planta de tratamiento de lixiviados y canales perimetrales.

RECOMENDACIONES

1. Las estaciones meteorológicas de donde se obtendrá los datos para calcular las obras hidráulicas, deben estar ubicadas lo más cercanas posibles a la región del terreno, para tener un valor más exacto.
2. Para diseñar un proyecto de relleno sanitario, previamente debe realizarse un estudio de caracterización de los residuos sólidos del ente generador, para seleccionar el método de construcción y confinamiento adecuado para el relleno.
3. Considerar el estudio de suelos y el estudio geotécnico para tomar la decisión de la ubicación y el método de construcción adecuada para evitar deslizamientos.
4. Debido a que los gases producidos por la descomposición en un relleno sanitario son altamente tóxicos y contaminantes es necesario realizar especificaciones de cálculo y dimensionamiento de chimeneas o tuberías de ventilación el cual permita la correcta evacuación de los gases.
5. Al finalizar la construcción o este en operación un relleno sanitario, se debe actualizar un Manual de Operación y Mantenimiento, disponible para los operadores que ayude en su capacitación desde el inicio de su construcción.

BIBLIOGRAFÍA

1. BENAVIDES, Livia. *Guía para el diseño de rellenos de seguridad en América Latina*. México: CEPIS, OPS/OMS, 1994.
2. BROWN SALAZAR, Doreen. *Guía para la gestión del manejo de residuos sólidos municipales*. Guatemala: Programa Ambiental Regional para Centroamérica / SIGMA, 2004. 84 p.
3. GIL LAROJ, Joram Matías. *Manual de operación y mantenimiento del relleno industrial*. Guatemala: Grupo Sierra Madre, 2013. 54 p.
4. _____. *Memoria descriptiva del cálculo del relleno sanitario para la disposición final de los desechos sólidos de la empresa CGN S.A.* Guatemala: Grupo Sierra Madre, 2012. 17 p.
5. Instituto Nacional de Sismología Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Estudio de intensidades de precipitación en la república de Guatemala*. Guatemala: Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, 2002. 73 p.
6. IVANNIA YANET, Fernández Sandoval. *Diseño y factibilidad de relleno sanitario manual para el municipio de La Libertad, Departamento de La Libertad*. Trabajo de graduación de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador, 2010. 45 p.

7. JARAMILLO, Jorge. *Construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Estados Unidos: CEPIS, OPS/OMS, 2002
8. MAZARIEGOS BRAN, Fernando. *Utilización de la hoja electrónica en computadoras personales para el diseño hidráulico y movimiento de tierra de canales abiertos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1991. 99 p.
9. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos. Acuerdo Gubernativo 281-2015*. Guatemala: MARN, 2015. 92 p.
10. MORALES MASAYA, Rosa Aracely. *Diseño de obras de cruce para proyectos de ingeniería civil utilizando la hoja electrónica*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1992. 73 p.
11. NIJ PATZAN, Jéser Esaú de Jesús. *HEC – HMS, Segunda Clase. Diplomado en Hidráulica de Ríos*. Guatemala: Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, 2016, 11 p.
12. RAUDALES OSORTO, Rommel Josué; GRÁDIZ CÁCERES, Marvin Ovidio. *Modelo de gestión de residuos sólidos en el área urbana del municipio de Santa Catarina Pínula*. Tesis de Posgrado, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012. 247 p.

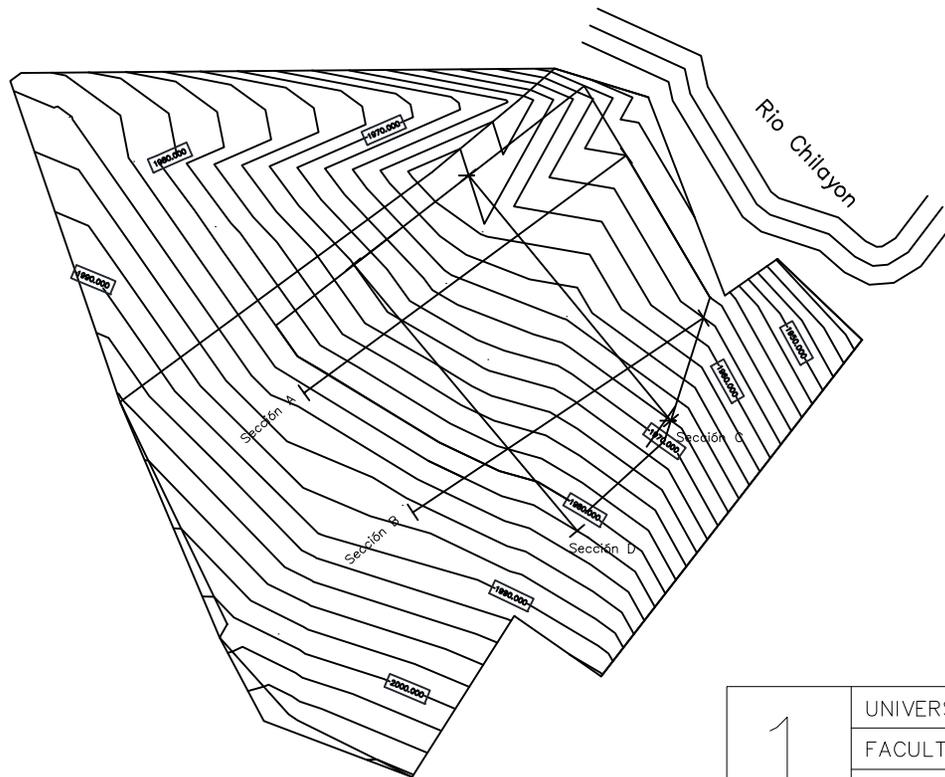
13. RÖBEN, Eva. *Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales*. Dirección de Higiene, Municipalidad de Loja, Ecuador, 2002. 151 p.
14. RODRIGUEZ HERRERA, Eddie Ronaldo. *Estudio de reubicación del relleno sanitario del municipio de San Gabriel, Suchitepéquez*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2014. 60 p.
15. RODRIGUEZ SOZA, Luis Carlos. *Guía para las instalaciones sanitarias en edificios*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 70 p.
16. SALES RODRIGUEZ, Jesús Sales. *Comparación del modelo Estándar y modelo Wenzel para curvas Intensidad-Duración-Frecuencia en la cuenca del Río Motagua*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2012. 126 p.
17. STEWART, Oakley. *Manual de diseño y operación de rellenos sanitarios en Honduras*. Estados Unidos: Universidad Estatal de California, 2005. 218 p.
18. TCHOBANOGLOUS, George; THEISEN, Hilary; ELIASSEN, Rolf. *Desechos sólidos, principios de ingeniería y administración*. Ambiente y los Recursos Naturales Renovables AR-16, 1982. 439 p.

19. TCHOBANOGLIOUS, George; THEISEN, Hilary; VIGIL, Samuel.
Gestión integral de residuos sólidos. 2da. ed. Mc Graw-Hill, 1998.
250 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Curvas de nivel**

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.



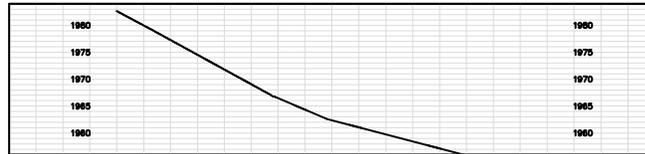
PLANTA DE CURVAS DE NIVEL

ESCALA : 1/150

1	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
	FACULTAD DE INGENIERIA
	INGENIERIA CIVIL
CURVAS DE NIVEL	
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD	
SMAILY ENRIQUE HERNANDEZ GIL	

Apéndice 2. **Secciones**

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.



SECCION LONGITUDINAL A

ESCALA : 1/100



SECCION LONGITUDINAL B

ESCALA : 1/100



SECCION TRANSVERSAL C

ESCALA : 1/100



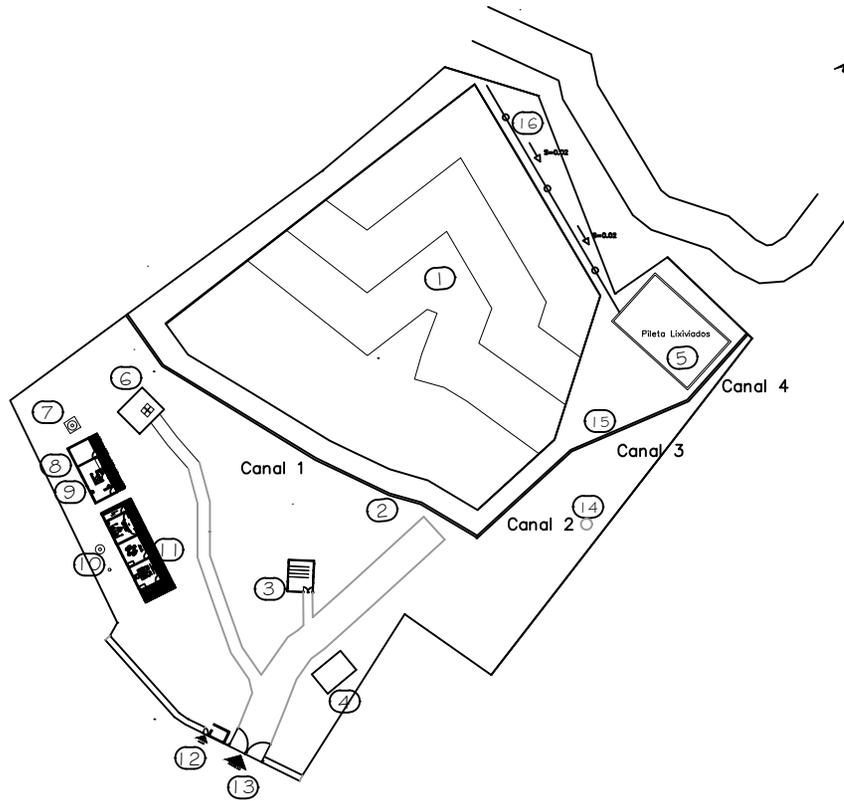
SECCION TRANSVERSAL D

ESCALA : 1/100

2	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
	FACULTAD DE INGENIERIA
	INGENIERIA CIVIL
SECCIONES	
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD	
SMAILY ENRIQUE HERNANDEZ GIL	

Apéndice 3. **Planta de conjunto**

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.



NOMENCLATURA	
NUMERO	DESCRIPCION
1	AREA RELLENO SANITARIO
2	INGRESO A LAS PLATAFORMAS
3	BODEGA DE CLASIFICACION MATERIALES
4	AREA CLASIFICACION DESECHOS
5	TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS
6	COMPOST
7	TANQUE ELEVADO AGUA
8	BODEGA HERRAMIENTA Y EQUIPO
9	VESTIDORES
10	FOSA SEPTICA + AREA DE ABSORCION
11	AREA ADMINISTRATIVA
12	GARITA
13	INGRESO
14	POZO MONITREO Y CONTROL
15	CANAL PLUVIAL
16	TUBERIA DE RECOLECCION

PLANTA DE CONJUNTO

ESCALA : 1/150

3 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
 FACULTAD DE INGENIERIA
 INGENIERIA CIVIL

PLANTA CONJUNTO

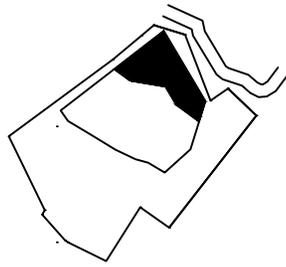
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD

SMAILY ENRIQUE HERNANDEZ GIL

Apéndice 4. **Planta de plataformas**

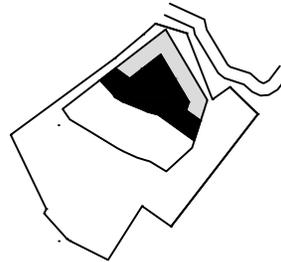
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Primera Plataforma



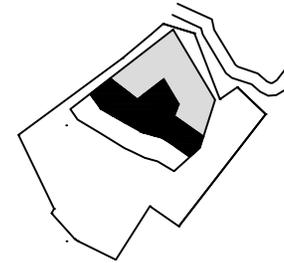
VOLUMEN A LLENAR: 4,595.58 m³
 PESO: 2,757.35 Ton

Segunda Plataforma



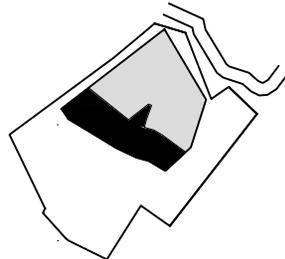
VOLUMEN A LLENAR: 5,096.82 m³
 PESO: 3,058.10 Ton

Tercera Plataforma



VOLUMEN A LLENAR: 5,476.38 m³
 PESO: 3,285.83 Ton

Cuarta Plataforma



VOLUMEN A LLENAR: 5,649.84 m³
 PESO: 3,389.90 Ton

PLANTA DE LLENADO DE PLATAFORMAS

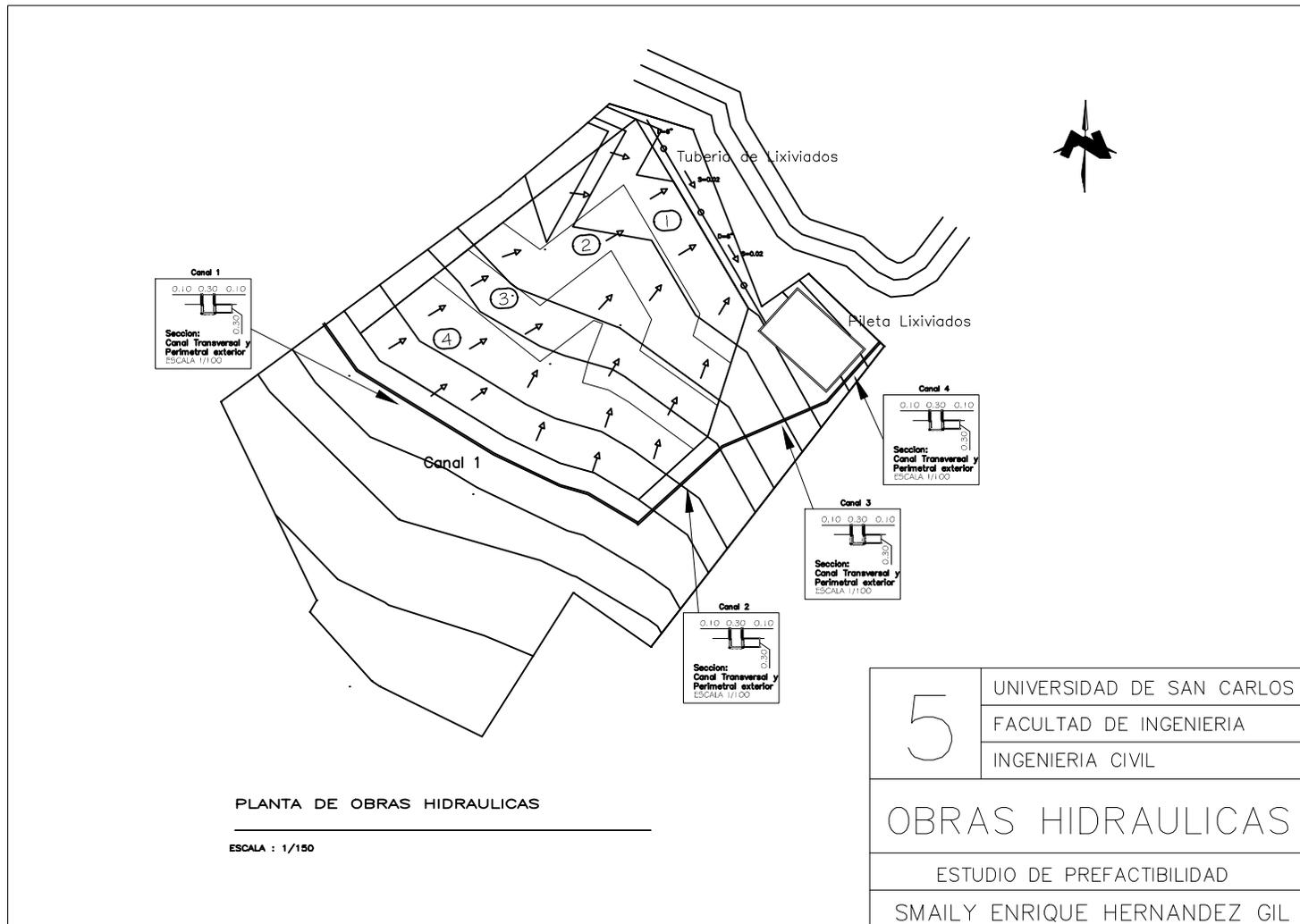
ESCALA : 1/50

VOLUMEN TOTAL: 20,818.62 m³
 PESO TOTAL: 12,491.17 Ton

4	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
	FACULTAD DE INGENIERIA
	INGENIERIA CIVIL
PLANTA DE PLATAFORMAS	
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD	
SMAILY ENRIQUE HERNANDEZ GIL	

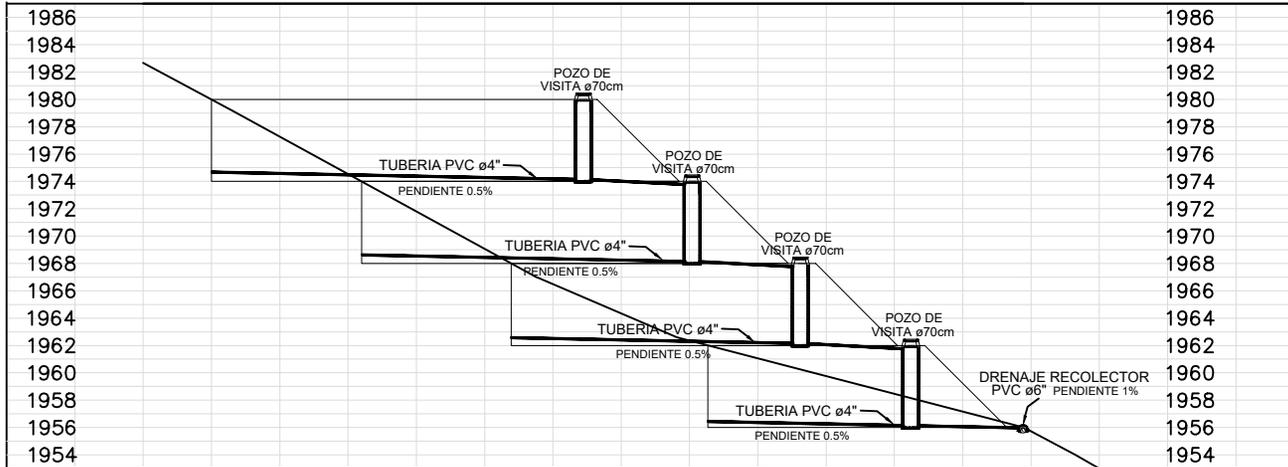
Apéndice 5. **Obras hidráulicas**

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.



Apéndice 6. **Perfil drenaje**

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.



PERFIL DE LLENADO Y DRENAJE LIXIVIADOS

ESCALA : 1/100

6

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERIA CIVIL

PERFIL DRENAJE

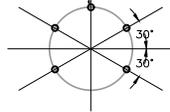
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD

SMAILY ENRIQUE HERNANDEZ GIL

Apéndice 7. **Detalle de drenaje de tubería de lixiviados**

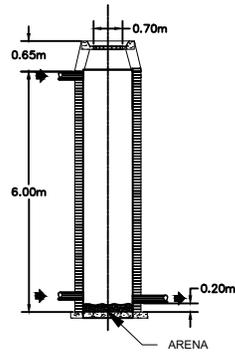
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

AGUJEROS DE $\frac{1}{4}$ " @ 25cms



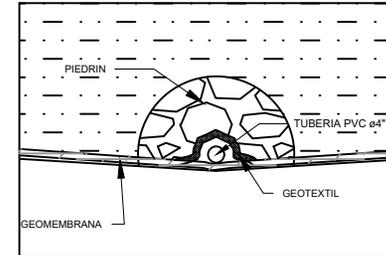
DETALLE TUBERIA PERFORADA

SIN ESCALA



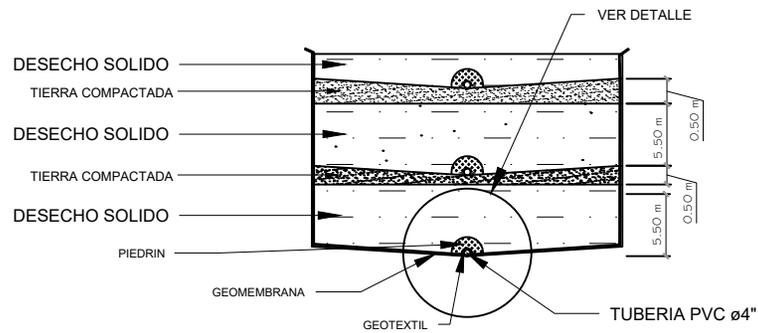
SECCION POZO DE VISITA

ESCALA : 1/100



DETALLE DRENAJE LIXIVIADOS

SIN ESCALA



CONFORMACION DE PLATAFORMA

SIN ESCALA

7

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERIA CIVIL

DETALLE DE DRENAJE DE
TUBERIA DE LIXIVIADOS

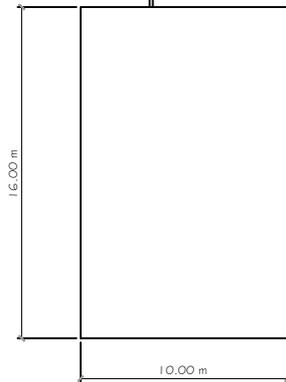
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD

SMAILY ENRIQUE HERNANDEZ GIL

Apéndice 8. **Planta de tratamiento**

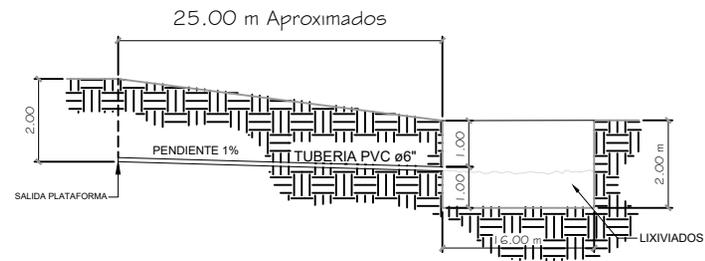
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

Tuberia Entrada Lixiviados



PLANTA — PILETA DE LIXIVIADOS
PLANTA DE TRATAMIENTO

ESCALA : 1/200



SECCION — PILETA DE LIXIVIADOS
PLANTA DE TRATAMIENTO

ESCALA : SIN ESCALA



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA CIVIL

PLANTA DE TRATAMIENTO

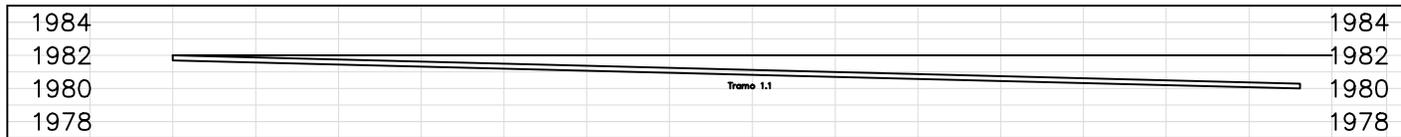
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD

SMAILY ENRIQUE HERNANDEZ GIL

Apéndice 9. **Perfil de canales pluviales 1 y 2**

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 3D 2016.

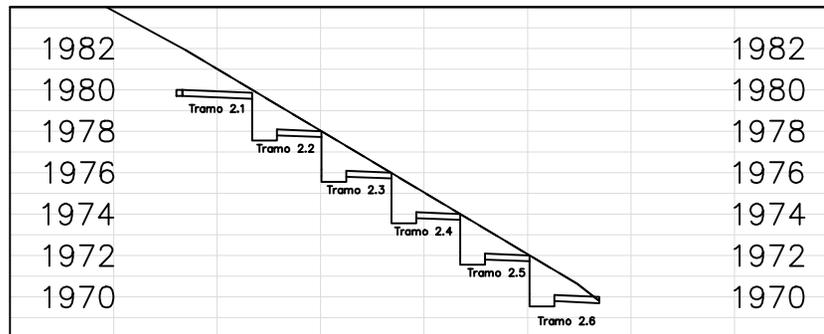
CANAL 1



PERFIL - CANAL PLUVIAL 1

ESCALA : 1/200

CANAL 2



PERFIL - CANAL PLUVIAL 2

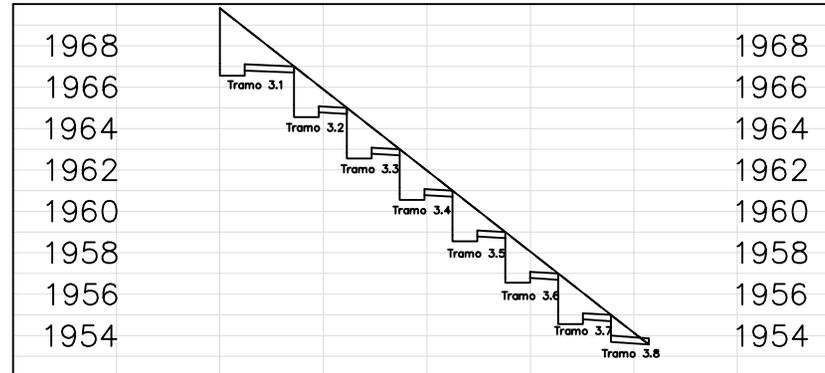
ESCALA : 1/200

9	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
	FACULTAD DE INGENIERIA
	INGENIERIA CIVIL
PERFIL DE CANALES PLUVIALES 1 Y 2	
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD	
SMAILY ENRIQUE HERNANDEZ GIL	

Apéndice 10. **Perfil de canales pluviales 3 y 4**

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 2016.

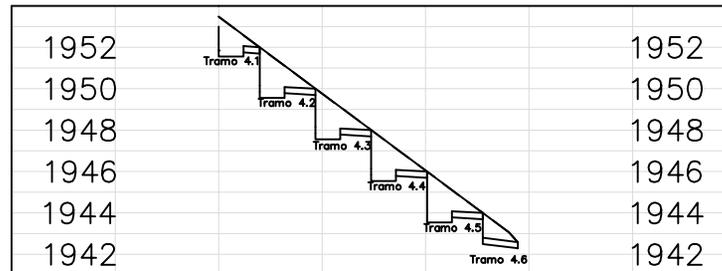
CANAL 3



PERFIL - CANAL PLUVIAL 3

ESCALA : 1/200

CANAL 4



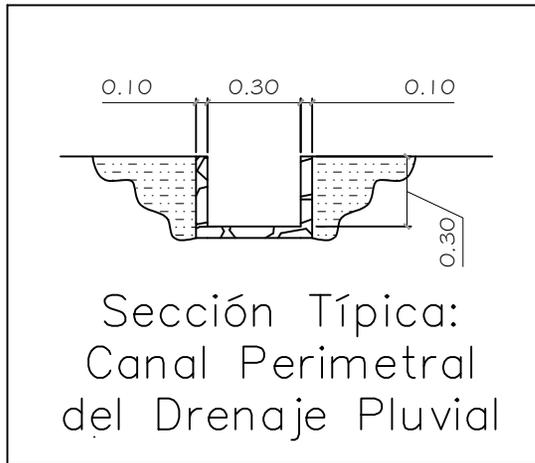
PERFIL - CANAL PLUVIAL 4

ESCALA : 1/200

10	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
	FACULTAD DE INGENIERIA
	INGENIERIA CIVIL
PERFIL DE CANALES PLUVIALES 3 Y 4	
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD	
SMAILY ENRIQUE HERNANDEZ GIL	

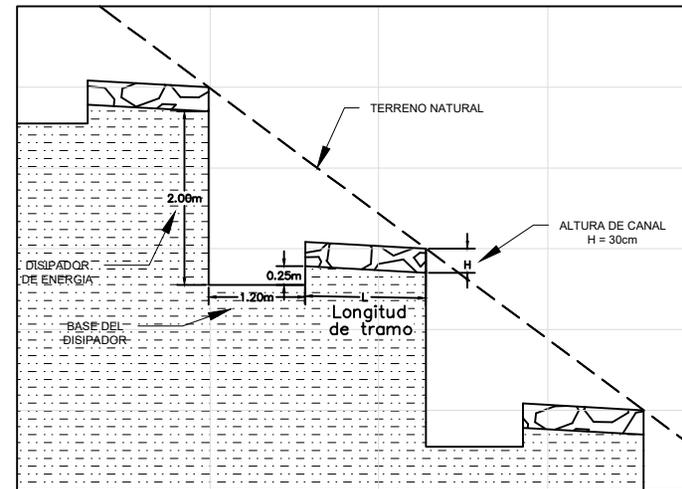
Apéndice 11. **Drenaje pluvial perimetral**

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD Civil 2016.



DETALLE SECCION - CANAL TIPICO

SIN ESCALA



SIN ESCALA

11	UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
	FACULTAD DE INGENIERIA
	INGENIERIA CIVIL
DRENAJE PLUVIAL PERIMETRAL	
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD	
SMAILY ENRIQUE HERNANDEZ GIL	

ANEXOS

Anexo 1. Mapa de estaciones hidrometeorológicas de INSIVUMEH en Guatemala



Fuente: INSIVUMEH.

