



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA AMBIENTAL – RESIDUOS SÓLIDOS

*“Metodología Ambiental Para La Clausura De
Vertederos A Cielo Abierto”*

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL

P R E S E N T A:

Ing. Javier Emmanuel Licea Castro

TUTOR PRINCIPAL:

M. en C. Constantino Gutiérrez Palacios – Facultad de Ingeniería,

TUTORES:

Dr. Enrique César Valdez – Facultad de Ingeniería

M. en I. Jorge Sánchez Gómez – Sistemas de Ingeniería y Control Ambiental

Dr. Szanto Narea Marcel– Universidad Católica de Valparaíso

Dr. Moreno Andrade Iván– Instituto de Ingeniería

Lugar de trabajo: ZMVM, Posgrado de Ingeniería, CU.

, Ciudad Universitaria, CDMX, septiembre, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado Asignado

Presidente– Dr. César Valdez Enrique

Secretario– Dr. Moreno Andrade Iván

1^{er} Vocal – Dr. Szanto Narea Marcel

2^{do} Vocal – M. en I. Sánchez Gómez Jorge

3^{er} Vocal – M. C. Gutiérrez Palacios Constantino

Lugar de trabajo:

Zona Metropolitana del Valle de México, Posgrado de ingeniería, CU.

Tutor de Tesis

M. C. Gutiérrez Palacios Constantino



FIRMA

No fracasan las estrategias por falta de mandos, fracasan por falta de ciudadanos, y siempre los ciudadanos seremos los únicos culpables. Por eso, si queremos cambiar a México se debe cambiar al ciudadano.

D. Fernández de Cevallos

Menos federación, más Estado. Menos Estado, más municipio. Menos municipio, más ciudadanía.

E. de la Madrid

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme formar parte de su posgrado en ingeniería ambiental, y con ello la oportunidad de reforzar conocimientos, los cuales al conjuntarlos con la experiencia laboral me permitió la elaboración de esta tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo a la investigación, el desarrollo científico y tecnológico del país, permitiéndome recibir su apoyo a través la beca otorgada. Como institución, debe prevalecer con el objetivo de fortalecer a México en la toma de decisiones futuras.

Al M. en C. Constantino Gutiérrez, por permitirme haber desarrollado el tema del cual es motivo esta tesis, y a mis tutores, por el tiempo dedicado a la revisión y comentarios para una mejora continua.

Al Ing. Javier Licea, el responsable de mi gusto por el tema de residuos, por compartir la pasión, la técnica y la responsabilidad que implica el manejo de los residuos y por compartir su experiencia en el manejo de los mismos, en operación de rellenos sanitarios y demás tecnologías de aprovechamiento de residuos. Es, y será siempre para mí, el mejor basurólogo y mi mentor.

A quienes fueron mis jefes y me dieron oportunidad en el ámbito laboral de formar parte de sus equipos, por haberme forjado desde mi salida de licenciatura y por darme la visión crítica de que, en teoría, todo es práctica, y con lo cual me otorgaron la experiencia que me permitió realizar esta tesis.

A las personas que me enseñaron a trabajar los residuos, operadores de maquinaria, compañeros de trabajo, pepenadores y todos aquellos que me ayudaron a integrar y adquirir el conocimiento en campo.

A Alejandro, el amigo que me dio el posgrado, a mis amigos que me han acompañado Ricardo y Oziel, a los amigos que me dio la ONU en su Programa para el Medioambiente; a mis amigos de Colombia, Ecuador, Chile, Perú, Canadá, Brasil, Japón, Suiza. A todos, espero conservarlos por muchos años.

A la parte más importante, la columna vertebral de mi vida, mi familia; a mi mamá, mi papá y mi hermana, por su amor, por apoyarme siempre en cualquier toma de decisiones, por escuchar las pláticas eternas en torno a residuos con mi papá y por siempre estar conmigo pese a cualquier situación. A mis tías, tíos, primos, primas, abuelitos y abuelitas.

ACRÓNIMOS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CDMX	Ciudad de México
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CH ₄	Metano
CNPC	Centro Nacional De Prevención De Desastres
CO ₂	Dióxido de Carbono
DGSU	Dirección General De Servicios Urbanos
EPA (USEPA)	United States Environmental Protection Agency
EPP	Equipo de Protección Personal
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ha	Hectárea
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ISWA	International Solid Waste Association
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LGPGIR	Ley general Para la Prevención y Gestión Integral de Residuos
NMX	Normas Mexicanas de Referencia
NOM	Normas Oficiales Mexicanas
NFU	Neumáticos Fuera De Uso
PPS	Proyecto para Prestación de Servicios
PVC	Policloruro de Vinilo
RS	Relleno Sanitario
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SC	Sitio Controlado
SDF	Sitio de Disposición Final
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SGM	Servicio Geológico Nacional
SINAPROC	Sistema Nacional de Protección Civil
SNC	Sitio No Controlado
VCA	Vertedero a Cielo Abierto
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

Precisión: Para el caso de este trabajo se entienden como sinónimos las palabras Sitio no Controlado (SNC) y Vertedero a cielo abierto (VCA).

GLOSARIO

- Clausura: Sellado del área de un sitio de disposición final después de la suspensión definitiva de la recepción de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Cobertura diaria: Capa de material natural o sintético, utilizada para cubrir los residuos, con el fin de controlar infiltraciones pluviales y emanaciones de gases y partículas, dispersión de residuos, así como el contacto de fauna nociva con los residuos confinados. (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Cobertura final de clausura: Revestimiento de material natural o sintético, o ambos; que se coloca sobre la superficie del sitio de disposición final, cuando ha concluido su vida útil, abarcando tanto a los taludes como a los planos horizontales. (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Contaminación: La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico. (LGEEPA)
- Contaminante: Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural. (LGEEPA)
- Disposición Final: Acción de depositar o confinar permanentemente residuos en sitios e instalaciones cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes afectaciones a la salud de la población y a los ecosistemas y sus elementos. (LGPGIR)
- Impacto ambiental: Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza. (LGEEPA)
- Lixiviado: Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos. (LGPGIR)

- Mantenimiento de posclausura: Etapa de conservación de las estructuras para el control ambiental, de la cobertura final, de los caminos y la apariencia en general de un sitio de disposición final que se ha clausurado. (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Monitoreo ambiental: Conjunto de acciones para la verificación periódica del grado de cumplimiento de los requerimientos establecidos para evitar la contaminación del ambiente." ("DOF – Diario Oficial de la Federación") (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Obras complementarias: conjunto de instalaciones y edificaciones necesarias, para la correcta operación de un sitio de disposición final. (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Parámetros hidráulicos: La conductividad hidráulica, la porosidad, la carga hidráulica, el gradiente hidráulico y los coeficientes de almacenamiento y transmisibilidad, de una determinada unidad geohidrológica. (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Residuo: Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de valorizarse o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en esta Ley y demás ordenamientos que de ella deriven. (LGPGIR)
- Residuos peligrosos: son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o que contengan agentes infecciosos que le confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio y, por tanto, representan un peligro al equilibrio ecológico o el ambiente. (LGEEPA)
- Residuos Sólidos Urbanos: Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza

de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole. (LGPGIR)

- Restauración: Conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales. (LGEEPA)
- Sistema de flujo: Dirección de flujo que sigue el agua subterránea, considerando las zonas de recarga y descarga, las cargas y gradientes hidráulicos a profundidad y el efecto de fronteras hidráulicas. Incluye, además, la interacción con el agua superficial y comprende sistemas locales, intermedios y regionales. (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Sitio Contaminado: Lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de éstos que ha sido contaminado con materiales o residuos que, por sus cantidades y características, pueden representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas. (LGPGIR)
- Sitio controlado: Sitio inadecuado de disposición final que cumple con las especificaciones de un relleno sanitario en lo que se refiere a obras de infraestructura y operación, pero no cumple con las especificaciones de impermeabilización. (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Sitio de disposición final: Lugar donde se depositan los residuos sólidos urbanos y de manejo especial en forma definitiva. (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Sitio no controlado: Sitio inadecuado de disposición final que no cumple con los requisitos establecidos en esta Norma. (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Subsuelo: Medio natural que subyace al suelo, que por su nulo o escaso intemperismo, presenta características muy semejantes a las de la roca madre que le dio origen. (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Suelo: Material o cuerpo natural compuesto por partículas sueltas no consolidadas de diferentes tamaños y de un espesor que varía de unos centímetros a unos cuantos metros, el cual está conformado por fases sólida, líquida y gaseosa, así como por elementos y compuestos de tipo

orgánico e inorgánico, con una composición variable en el tiempo y en el espacio. (NOM-083-SEMARNAT-2003)

- Talud: La inclinación del material de que se trate, con respecto a la horizontal. (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Uso final del sitio de disposición final: Actividad a la que se destina el sitio de disposición final, una vez finalizada su vida útil. (NOM-083-SEMARNAT-2003)
- Vida útil: Es el periodo de tiempo en que el sitio de disposición final será apto para recibir los residuos sólidos urbanos y de manejo especial. El volumen de los residuos y material térreo depositados en este periodo, es igual al volumen de diseño. (NOM-083-SEMARNAT-2003)

ÍNDICE

<i>Portada</i>	1
<i>Acrónimos</i>	5
<i>Glosario</i>	6
<i>Índice</i>	10

Capítulo I

1. Introducción	23
2. Justificación	32
3. Objetivos	34
3.1. Objetivo General	34
3.2. Objetivos Particulares	34
4. Alcances	35

Capítulo II

1. Antecedentes	36
1.1. Época Prehispánica	36
1.2. Época de la colonia	37
1.3. Independencia	37
1.4. México Contemporáneo	40
2. Situación Actual (Estado Del Arte)	52

Capítulo III

1. Marco Teórico	54
1.1. Impactos al Ambiente Generados por Vertederos a Cielo Abierto o Sitios No Controlados	56
1.2. Impactos a la Salud Generados por Vertederos a Cielo Abierto o Sitios No Controlados	56
2. Impactos Sobre el Medioambiente	58
2.1. Contaminación De Los Recursos Hídricos	58
2.2. Contaminación Atmosférica	58
2.3. Contaminación del Suelo	58
2.4. Amenazas a la Flora y Fauna	59
2.5. Alteraciones del Medio Antrópico	59
2.6. Incendios	59
2.7. Riesgos	62

2.8.	Rehabilitación, Saneamiento y Clausura de Vertederos a Cielo Abierto o Sitios No Controlados	66
2.8.1.	Rehabilitación	66
2.8.2.	Saneamiento Ambiental	67
2.8.3.	Clausura	67

Capítulo IV

1.	Marco Legal	69
1.1.	Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	69
1.2.	Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	70
1.3.	Ley General para la Prevención Y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)	74
1.4.	Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003	81

Capítulo V

1.	Metodología	83
1.1.	Secuencia de la Metodología	83
2.	Localización de Sitios No Controlados (SNC)	83
3.	Establecimiento de las bases de diseño de obras de ingeniería para la clausura ambiental	86
3.1.	Diseño de una Metodología Ambiental para la Clausura de Sitios no Controlados (SNC o VCA)	86

Capítulo VI

Metodología Ambiental para el Cierre y Clausura de Sitios No Controlados (Vertederos o Tiraderos a Cielo Abierto, o basurales)

1.	Proceso Previos a la Clausura	87
1.1.	Clasificación de los Sitios No Controlados	87
1.2.	Reconocimiento del Sitio	87
1.3.	Identificación y Mitigación de Riesgos	93
2.	Procesos Legales	97
2.1.	Concesión	98
2.2.	Contrato Público	98

Diagrama de Flujo Aplicable al Procedimiento Legal para Proyectos de Clausura de VCA o SNC Desarrollados por la Administración Pública 99

Diagrama de Flujo Aplicable al Procedimiento Legal para Proyectos de Clausura de VCA o SNC Desarrollados con Participación del Sector Privado 100

3.	Normatividad Aplicable	101
3.1.	Listado de la Normatividad Aplicable	101
3.1.1.	Normativa Ambiental	101

3.1.2.	Normativa Aplicable al Sistema de Sellado	102
3.1.3.	Especificaciones Internacionales para Sistema de Sellado	102
3.1.4.	Normativa Aplicable para Geosintéticos	102
3.1.5.	Especificaciones Internacionales para Geosintéticos	103
3.1.6.	Normativa Aplicable para Tuberías	103
4.	Consideraciones y Estudios Técnicos	104
4.1.	Estudio Topográfico	104
4.1.1.	Banco de Nivel Fijo	104
4.2.	Estudio Hidrológico	105
4.3.	Balance Hídrico	105
4.4.	Condiciones Geológicas, Geofísicas y Geohidrológicas	105
4.5.	Estudio Geotécnico	106
4.6.	Análisis Granulométrico	110
4.7.	Permeabilidad del Suelo	112
4.8.	Condiciones de Monitoreo Sísmico	113
4.9.	Estudio Geofísico Ambiental	113
4.10.	Análisis de Lixiviado y Biogás	114
4.11.	Análisis de Residuos Sólidos Urbanos Depositados en los Sitios de Disposición Final	114
4.11.1.	Análisis Estequiométrico de los residuos Sólidos Urbanos	114
4.11.2.	Caracterización Física de los Residuos Sólidos Urbanos en Sitio	115
5.	Procesos Operativos	117
5.1.	Acondicionamiento de Residuos	117
5.2.	Corte y Empuje de Residuos	117
5.3.	Conformación y Compactación de los Residuos	119
5.3.1.	Método de Área	120
5.3.2.	Método de Zanja	122
5.3.3.	Método Combinado	123
5.4.	Taludes	124
5.5.	Bermas	126
5.6.	Plataforma	127
6.	Sistema de Sellado o Sistema de Cubierta Final	130
6.1.	Capa Base o Capa de Cobertura	133
6.2.	Capa Sello	136
6.3.	Capa de Erosión	137
7.	Sistema de Capa Sello con Sistema de Capa de Erosión	138
7.1.	Capa Sello Mineral con Material Térreo Limo–Arcilloso	138
7.1.1.	Capa de Erosión para Capa Sello Mineral con Material Térreo Limo–Arcilloso	140
7.2.	Capa Sello Mineral con Material Térreo Mejorado	142
i)	Material Térreo Mejorado con Arcilla Bentónica (Bentonita de Sodio)	142
ii)	Material Térreo Mejorado con Aditivos Mejoradores de Suelo	144

7.2.1.	Capa de Erosión para Capa Sello Mineral a Base de Material Térreo Mejorado	146
7.3.	Capa Sello Sintética	148
7.3.1.	Capa de Erosión para Capa Sello Sintética	151
7.4.	Capa Sello Mixta	153
7.4.1.	Capa de Erosión para Capa Sello Mixta	157
i)	Alternativa 1. Capa de Erosión a Base de Material Térreo y Geotextil	157
ii)	Alternativa 2. Capa de Erosión a Base de Geotextil	159
iii)	Alternativa 3. Capa de Erosión a Base de Concreto Asfáltico para Bermas	161
8.	Cubierta Vegetal	163
8.1.	Material Orgánico (Tierra Vegetal)	164
8.2.	Manta Orgánica Vegetal	165
	<i>Diagrama de Flujo Aplicable al Procedimiento para la Construcción del Sistema de Sellado o Sistema de Cubierta Final</i>	170
9.	Sistema de Control y Monitoreo de Biogás y Lixiviado	171
9.1.	Sistema de Control Y Monitoreo De Biogás	171
9.2.	Migración de Biogás	173
9.3.	Criterios de Diseño del Sistema de Control y Monitoreo del Biogás	174
9.4.	Sistema Pasivo de Control y Monitoreo de Biogás	175
9.5.	Sistema Activo de Control y Monitoreo de Biogás	175
9.6.	Criterios para Determinar el Radio de Influencia y Cantidad de Pozos de Biogás	176
10.	Alternativas de Sistemas de Control y Monitoreo de Biogás Mediante Pozos Verticales	183
10.1.	Pozo tipo A. Sistema de Destrucción Térmica Pasiva con Tubo de 4" o 6" Sin trampa de condensado	183
10.2.	Pozo tipo B. Sistema de Destrucción Térmica Pasiva con Tubo de 6" Sin Trampa de Condensado y Tubo Interior De 1" Para Monitoreo	186
10.3.	Pozo tipo C. Sistema de Destrucción Térmica Pasiva con Tubo de 4" y Trampa de Condensado	189
10.4.	Pozo tipo D. Sistema de Destrucción Térmica Pasiva con Tubo de 6", Junta Telescópica de 4" y Trampa de Condensado	191
10.5.	Pozo tipo E. Sistema de Destrucción Térmica Pasiva con Tubo de 4" o 6" y Trampa de Condensado	194
10.6.	Pozo tipo F. Sistema de Pozo Mixto de 6" a 8" para Extracción de Lixiviado y Destrucción Térmica Pasiva de Biogás	197
10.7.	Detalle de Ranurado de Tubo para Pozo Vertical	200
11.	Alternativas de Sistema Horizontal de Control y Monitoreo de Biogás Mediante Zanja o Trinchera	201
11.1.	Sistema de Destrucción Térmica Pasiva con Tubería Continua	202
11.2.	Sistema de Destrucción Térmica Pasiva con Tubería Discontinua	207

11.3.	Detalle de Ranurado de Tubo para Sistema Horizontal de Control y Monitoreo de Biogás Mediante Zanjas o Trincheras _____	211
12.	Trampas de condensado _____	212
12.1.	Trampas de Condensado En Pozos Verticales _____	212
i)	Trampas de Condensado con Tezontle de 1/2" A 2" para Tubería Principal de 4" _____	212
ii)	Trampas de Condensado con Botellas de PET Seccionadas para Tubería Principal de 6" con Junta Telescópica de 4" _____	213
iii)	Trampas de Condensado con Botellas de PET Seccionadas para Tubería Principal de 4" _____	215
iv)	Trampas de Condensado con Tezontle de 1/2" A 2" para Tubería Principal de 6" con Junta Telescópica de 4" _____	216
v)	Trampas de Condensado de HDPE en Sistema de Espiral o Zigzag _____	219
12.2.	Trampas de Condensado en Sistema Horizontal de Control y Monitoreo de Biogás en Sistemas de Zanjas o Trincheras _____	221
i)	Trampas de Condensado con Tezontle o PET en tubería vertical de 4" _____	221
ii)	Trampas de Condensado con HDPE en Sistemas de Espiral o Zigzag en tubería vertical de 4" _____	223
iii)	Trampas de Condensado en Conexiones Tipo Cruz en Tubería Continua _____	224
iv)	Trampas de Condensado en Conexiones Tipo Cruz en Tubería Discontinua _____	227
v)	Trampas de Condensado de Crestas y Valles en Tubería Continua _____	230
13.	Transición de un Sistema Pasivo a un Sistema Activo de Control y Monitoreo de Biogás _____	234
	<i>Diagrama de Flujo del Procedimiento para la Aplicación del Sistema de Control y Monitoreo de Biogás _____</i>	<i>235</i>
14.	Sistema de Monitoreo y Control de Lixiviado _____	236
14.1.	Migración del Lixiviado _____	237
14.2.	Ubicación del Sistemas de Captación y Control del Lixiviado _____	237
14.3.	Edad del Lixiviado _____	238
14.4.	Tratamientos para el Lixiviado _____	239
15.	Sistema de Captación de Lixiviados _____	241
15.1.	Pozos Verticales _____	241
15.1.1.	Sistema de Pozo para Extracción de Lixiviado _____	241
15.1.2.	Sistema de Pozo Mixto para Extracción de Lixiviado y Destrucción Térmica Pasiva de Biogás _____	245
15.2.	Drenes Perimetrales _____	248
15.2.1.	Drenes Perimetrales Trapezoidales _____	249
15.2.2.	Drenes Trapezoidales con Geomembrana _____	251
15.2.3.	Drenes Trapezoidales con Tubo _____	253
15.3.	Drenes Horizontales de Penetración _____	257
15.4.	Cárcamos de Captación _____	259
15.4.1.	Cárcamo Simple con Refuerzo de Geored _____	259

15.4.2.	Cárcamo de Concreto Armado	260
15.4.3.	Cárcamo con Tanque Tricapa (Tinaco)	262
15.4.4.	Drenado de Cárcamos de Lixiviado	263
16.	Tratamientos Recomendados para Lixiviados	264
16.1.	Lagunas	264
16.1.1.	Lagunas Aireadas	266
16.1.2.	Laguna Facultativa	267
16.1.3.	Laguna de Evaporación	268
16.1.4.	Aireadores	268
i)	Aireadores Sumergibles	268
ii)	Aireadores Superficiales	269
16.2.	Sistema de Recirculación del Lixiviado	269
16.2.1.	Pozos Verticales de Recirculación de Lixiviado	270
16.2.2.	Drenes de Recirculación de Lixiviado (Diagrama Ishikawa o Espina De Pescado)	273
16.3.	Tratamiento de Lixiviado en Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR)	276
	<i>Diagrama de Flujo del Procedimiento para la Aplicación del Sistema de Control y Monitoreo de Lixiviado</i>	<i>277</i>
17.	Sistema de Drenaje Pluvial	278
17.1.	Lluvia Media	278
17.1.1.	Método Aritmético	279
17.1.2.	Método de Polígonos de Thiessen	279
17.1.3.	Método de Isoyetas	279
17.2.	Estructura del Drenaje Pluvial	279
17.2.1.	Cunetas	280
17.2.2.	Cajas Rompedoras de Presión	280
17.2.3.	Cajas Deflectoras	281
17.2.4.	Areneros	281
17.2.5.	Lavaderos	281
17.2.6.	Cruces con Caminos o Bermas	282
i)	Cruces por Medio de Tuberías	282
i)	Cruces por Medio de Trincheras de Concreto Armado	283
18.	Obras Complementarias	284
18.1.	Cercado Perimetral	284
18.2.	Pluma de Acceso	284
18.3.	Puerta de Acceso	284
18.4.	Caseta de Vigilancia	284
18.5.	Oficina	285
18.6.	Almacén de Equipos y Herramientas	285
18.7.	Señalética	285
18.7.1.	Señalización al Interior	286
18.7.2.	Señalización al Exterior	286
19.	Programa de Operación y Mantenimiento (O&M) Posclausura	287

19.1.	Funciones del Personal Responsable del Mantenimiento _____	288
19.2.	Plan de Mantenimiento y Control de Infraestructura _____	288
19.3.	Plan de Mantenimiento del Sistema de Control y Monitoreo de Biogás _____	288
19.4.	Plan de Mantenimiento del Sistema de Control y Monitoreo de Lixiviados _____	290
19.5.	Plan de Monitoreo de Asentamiento y Fisuramiento de la Cubierta Final del Sitio Clausurado _____	291
19.6.	Mantenimiento a Banco de Nivel Fijo _____	291
19.7.	Monitoreo de Asentamientos _____	291
19.8.	Reparación de Fisuramiento _____	292
19.9.	Plan de Mantenimiento y Control de Erosión de Taludes del Sitio Clausurado _____	292
19.10.	Plan de Mantenimiento de Cubierta Vegetal _____	293
19.11.	Plan de Monitoreo, Mantenimiento y Control de Caminos _____	294
19.12.	Plan de Monitoreo de Agua y Cuerpos de Agua Superficiales y Subterráneos _____	294
19.13.	Plan de Mantenimiento y Control de Drenaje Pluvial _____	296
19.13.1.	Inspección del Sistema de Drenaje Pluvial _____	296
19.13.2.	Limpieza de Canaletas y Desarenadores _____	296
19.13.3.	Renivelación de Canaletas _____	297
19.13.4.	Plan de Control de Fauna Nociva _____	297

Diagrama de flujo del procedimiento para la aplicación de la metodología ambiental de clausura de vertederos a cielo abierto (sitios no controlados) _____ 299

Capítulo VII

1.	Conclusiones _____	300
----	--------------------	-----

Referencias _____ 302

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica de sitios de disposición final por Entidad federativa reportados en el año 2020 _____	26
Figura 2. Listado y ubicación del número de VCA o SNC por entidad federativa reportados en México. _____	28
Figura 3. Gráfico del número que municipios que emplean distintas formas de disposición de RSU _____	29
Figura 4. Ilustración de plano iconográfico de la Ciudad de México. estructurado para delimitar los Barrios y establecer el buen orden de su limpia. Realizado por el Maestro Mayor don Ignacio Castera en 1793 _____	38
Figura 5. Ilustración de carreta para la recolección de basura, utilizada en el año 1890 _____	39
Figura 6. Fotografía de pepenadores laborando en un vertedero, Ciudad de México 1920 _____	41
Figura 7. Fotografía del Tiradero de Zoquipa 1937 _____	42
Figura 8. Fotografía de trabajadores del Servicio de Limpia en vehículos contenedores de residuos, Ciudad de México 1940. _____	43
Figura 9. Mapa de localización de infraestructura para el Manejo de Residuos con la que contaba la Ciudad de México en 1970 _____	44
Figura 10. Fotografía de Sitio no controlado de Santa Cruz Meyehualco, Ciudad de México, 1980. _____	45
Figura 11. Fotografía del Sitio no controlado de Santa Cruz Meyehualco, Ciudad de México 1982. _____	46
Figura 12. Fotografía del Relleno Sanitario Prados de la Montaña, “Pared Impermeabilizada”, Ciudad de México 1992 _____	47
Figura 13. Fotografía del Relleno Sanitario Prados de la Montaña, operación de los dos socavones, Ciudad de México, marzo 1992. _____	48
Figura 14. Fotografía del Relleno Sanitario Prados de la Montaña en proceso de clausura, Ciudad de México, noviembre 1994 _____	49
Figura 15. Fotografía del Relleno Sanitario Prados de la Montaña, Clausurado, Ciudad de México, marzo 2020 _____	50
Figura 16. Diagrama de flujo de los Impactos generados por los VCA o SNC _____	57
Figura 17. Diagrama de flujo de contaminación atmosférica provocada por los VCA o SNC _____	61
Figura 18. Diagrama de flujo de riesgos y consecuencias presentes en sitios de disposición final con una mala operación _____	63
Figura 19. Diagrama de flujo del proceso de saneamiento ambiental, rehabilitación, y clausura de un vertedero a cielo abierto o sitio no controlado _____	68
Figura 20. Mapa de la república mexicana con el número de sitios no controlados (SNC) por Entidad federativa _____	85
Figura 21. Zonas Sísmicas en México. Riesgo y Vulnerabilidad ante Sismos en las Entidades Federativas de México _____	91
Figura 22. Diagrama de flujo del proceso legal para proyectos de clausura de VCA o SNC, desarrollados por la Administración pública _____	99
Figura 23. Diagrama de flujo del proceso legal para proyectos de clausura de VCA o SNC con participación del sector privado _____	100
Figura 24. Carta de suelos dominantes de la República Mexicana _____	107

Figura 25.	Diagrama de corte, empuje y acarreo de residuos _____	118
Figura 26.	Diagrama de traslape de huella de bulldozer en la compactación de residuos _____	120
Figura 27.	Diagrama de extendido y empuje de residuos por método de área _____	121
Figura 28.	Diagrama de extendido y empuje de residuos por método de zanja _____	122
Figura 29.	Diagrama de extendido y empuje de residuos por método combinado _____	123
Figura 30.	Diagrama de configuración de taludes _____	124
Figura 31.	Diagrama de método de construcción de taludes _____	124
Figura 32.	Diagrama de configuración de talud proporción 3:1 _____	125
Figura 33.	Diagrama de configuración de talud proporción 2:1 o 2.5:1 _____	126
Figura 34.	Diagrama de configuración de berma _____	126
Figura 35.	Diagrama de método de empuje y esparcido de residuos en plataforma _____	127
Figura 36.	Diagrama de traslape de huella de bulldozer en la compactación de residuos en plataforma _____	128
Figura 37.	Diagrama de la configuración de un SDF con residuos compactados _____	129
Figura 38.	Diagrama del sistema de sellado o sistema de cubierta final _____	132
Figura 39.	Diagrama de estratificación de capa base o de cobertura _____	134
Figura 40.	Diagrama de conformación de capa base o de cobertura _____	135
Figura 41.	Diagrama de conformación de capa sello _____	136
Figura 42.	Diagrama de conformación de capa de erosión _____	137
Figura 43.	Diagrama de estratificación de capa sello con material limo-arcilloso (Tepetate) _____	139
Figura 44.	Diagrama de estratificación de capa de erosión para capa sello con material limo-arcilloso _____	141
Figura 45.	Diagrama de estratificación de capa sello con material térreo mejorado con bentonita _____	143
Figura 46.	Diagrama de estratificación de capa sello con material térreo mejorado con aditivos mejoradores de suelo _____	145
Figura 47.	Diagrama de estratificación de la capa de erosión para capa sello mineral con material térreo mejorado _____	147
Figura 48.	Diagrama de extendido de geomembrana en taludes _____	149
Figura 49.	Diagrama de estratificación de capa sello sintética (Geomembrana) _____	150
Figura 50.	Diagrama de extendido y unión de geotextil para la capa de erosión de la capa sello sintética _____	151
Figura 51.	Diagrama de estratificación de la capa de erosión para capa sello sintética _____	152
Figura 52.	Diagrama de la combinación 1 para capa sello mixta _____	154
Figura 53.	Diagrama de la combinación 2 para capa sello mixta _____	155
Figura 54.	Diagrama de la combinación 3 para capa sello mixta _____	156
Figura 55.	Diagrama de capa de erosión mixta a base de material térreo y geotextil en taludes _____	159
Figura 56.	Diagrama de método de extendido y unión de geotextil para la capa de erosión de la capa sello mixta _____	160
Figura 57.	Diagrama de estratificación de capa de erosión a base de geotextil _____	161
Figura 58.	Diagrama de capa de erosión a base de concreto asfáltico para bermas _____	162
Figura 59.	Diagrama del sistema de cubierta final con cobertura vegetal en taludes y plataforma _____	163

Figura 60.	Diagrama de estratificación de cobertura vegetal en sistema de capa sello con material limo-arcilloso _____	167
Figura 61.	Diagrama de estratificación de cobertura vegetal en sistema de capa sello sintética _____	168
Figura 62.	Diagrama de estratificación de cobertura vegetal en sistema de capa sello de material térreo mejorado _____	169
Figura 63.	Diagrama de flujo del procedimiento de construcción del sistema de sellado o sistema de cubierta final _____	170
Figura 64.	Proceso de generación y liberación de biogás _____	172
Figura 65.	Diagrama de arreglo triangular para determinación de radio de influencia para ubicación de pozos de biogás _____	177
Figura 66.	Diagrama de arreglo en cuadrado para determinación de radio de influencia para ubicación de pozos de biogás _____	177
Figura 67.	Diagrama de arreglo hexagonal para determinación de radio de influencia para ubicación de pozos de biogás _____	178
Figura 68.	Diagrama de determinación de separación de pozos de biogás con un arreglo triangular en rellenos sanitarios y sitios controlados _____	180
Figura 69.	Diagrama de determinación de separación de pozos de biogás con un arreglo triangular aplicable para la clausura y saneamiento de VCA o SNC _____	181
Figura 70.	Diagrama de separación mínima entre pozos de biogás en la clausura y saneamiento de SNC o VCA _____	182
Figura 71.	Diagrama de pozo tipo A para el sistema de control, monitoreo y destrucción pasiva de biogás _____	185
Figura 72.	Diagrama de pozo tipo B para el sistema de control, monitoreo y destrucción pasiva de biogás _____	188
Figura 73.	Diagrama de pozo tipo C para el sistema de control, monitoreo y destrucción pasiva de biogás _____	190
Figura 74.	Diagrama de pozo tipo D para el sistema de control, monitoreo y destrucción pasiva de biogás _____	193
Figura 75.	Diagrama de pozo tipo E para el sistema de control, monitoreo y destrucción pasiva de biogás _____	196
Figura 76.	Diagrama del pozo tipo F para el sistema de control, monitoreo y destrucción pasiva de biogás _____	199
Figura 77.	Diagrama del detalle de ranurado del tubo de pozo vertical para captación y extracción de biogás _____	200
Figura 78.	Diagrama del sistema de control y monitoreo de biogás mediante zanja o trinchera (sistema perimetral sistema interior basado en el diagrama de Ishikawa) _____	201
Figura 79.	Diagrama del sistema de control y monitoreo de biogás mediante zanja o trinchera con tubería continua _____	204
Figura 80.	Diagrama del sistema de crestas y valles para el control y monitoreo de biogás mediante zanja o trinchera con tubería continua _____	205
Figura 81.	Sistema de crestas y valles para el control y monitoreo de biogás mediante zanjas o trincheras con tubería continua _____	206
Figura 82.	Sistema de control y monitoreo de biogás mediante zanjas o trincheras con tubería discontinua _____	210

Figura 83.	Diagrama del detalle de ranurado del tubo para sistema de control y monitoreo de biogás mediante zanja o trinchera _____	211
Figura 84.	Diagrama de la trampa de condensado para tubería vertical con aditamento de PET o tezontle _____	218
Figura 85.	Diagrama de detalle de armado y sujeción de aditamento de trampa de condensado con relleno de PET o tezontle para tubería vertical _____	219
Figura 86.	Diagrama de detalle de trampa de condensado con mamparas plásticas en sistema zigzag para tubería vertical _____	220
Figura 87.	Diagrama de detalle de trampa de condensado con relleno de PET o tezontle en tubería vertical del sistema de zanja o trinchera _____	222
Figura 88.	Diagrama de detalle de trampa de condensado con mamparas plásticas en sistema zigzag en tubería vertical del sistema de control y monitoreo de biogás por método de zanja o trinchera _____	224
Figura 89.	Diagrama de detalle de la trampa de condensado con conexiones tipo Cruz en la tubería horizontal del sistema de control y monitoreo de biogás por método de zanja o trinchera _____	226
Figura 90.	Diagrama de detalle de trampa de condensado con conexiones tipo Tee en la tubería horizontal de control y monitoreo de biogás por método de zanja o trinchera _____	229
Figura 91.	Diagrama de detalle de trampa de condensado con conexiones tipo Tee en tubería horizontal del sistema de crestas y valles para el de control y monitoreo de biogás por método de zanja o trinchera _____	232
Figura 92.	Diagrama de detalle de cabezal y trampa de condensado con conexiones tipo Tee o tipo Cruz en tubería horizontal del sistema de crestas y valles para el de control y monitoreo de biogás por método de zanja o trinchera _____	233
Figura 93.	Diagrama de flujo para el procedimiento de aplicación del sistema de control y monitoreo de biogás _____	235
Figura 94.	Diagrama de pozo para extracción de lixiviado _____	244
Figura 95.	Diagrama de pozo mixto para extracción de lixiviado y destrucción térmica pasiva de biogás (Pozo tipo F del sistema de control y monitoreo de biogás) _____	247
Figura 96.	Diagrama de alternativas de drenes trapezoidales a pie de talud para captación de lixiviado _____	248
Figura 97.	Diagrama de alternativa A de dren perimetral para la captación de lixiviado a pie de talud _____	249
Figura 98.	Diagrama de alternativa B de dren perimetral para la captación de lixiviado a pie de talud _____	250
Figura 99.	Diagrama de alternativa A de dren perimetral recubierto con geomembrana para la captación de lixiviado a pie de talud _____	251
Figura 100.	Diagrama de alternativa B de dren perimetral recubierto con geomembrana para la captación de lixiviado a pie de talud _____	252
Figura 101.	Diagrama de alternativa de dren perimetral en talud intermedio recubierto con geomembrana para la captación de lixiviado a pie de talud _____	252
Figura 102.	Diagrama de alternativa A de dren perimetral con tubo central y cubierta de geomembrana para la captación de lixiviado a pie de talud _____	254
Figura 103.	Diagrama de alternativa B de dren perimetral con tubo central y cubierta de geomembrana para la captación de lixiviado a pie de talud _____	255

Figura 104.	Diagrama de alternativa de dren perimetral en talud intermedio con tubo central y cubierta de geomembrana para la captación de lixiviado a pie de talud	255
Figura 105.	Diagrama de detalle de ranurado de tubo (media caña) para drenes trapezoidales de captación de lixiviado	256
Figura 106.	Diagrama de drenes horizontales de penetración en talud para captación de lixiviado	258
Figura 107.	Diagrama de cárcamo simple con refuerzo de geored, filtro de tezontle y cubierta de geotextil para la captación de lixiviado	260
Figura 108.	Diagrama de cárcamo de concreto armado para la captación de lixiviado	261
Figura 109.	Diagrama de cárcamo con tanque tricapa (tinaco) para la captación de lixiviado	263
Figura 110.	Diagrama de estructura de laguna para almacenamiento y tratamiento de lixiviado	265
Figura 111.	Diagrama de lagunas de evaporación con aireadores	267
Figura 112.	Diagrama de pozo vertical para la recirculación de lixiviado	271
Figura 113.	Diagrama del sistema central de dren de recirculación de lixiviado por principio del diagrama de Ishikawa o espina de pescado	273
Figura 114.	Isométrico del sistema central de dren de recirculación de lixiviado por principio del diagrama de Ishikawa o espina de pescado	274
Figura 115.	Diagrama de flujo para la aplicación del procedimiento del sistema de control y monitoreo de lixiviado	277
Figura 116.	Diagrama del esquema del sistema de estructuras que conforman el drenaje pluvial	283
Figura 117.	Diagrama de flujo del procedimiento para la aplicación de la metodología del manual para la clausura ambiental de vertederos a cielo abierto	299

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de infraestructura y procesos en SDF a nivel Nacional _____	25
Tabla 2. Número de sitios de disposición final (SDF) en la ZMVM _____	30
Tabla 3. Área en hectáreas (ha) abarcada por los sitios de disposición final (SDF) controlados (SC) y no controlados (SNC) en la ZMVM _____	55
Tabla 4. Clasificación de tipo de riesgo, causas generadoras y consecuencias que generan en sitios de disposición final _____	64
Tabla 5. Sitios No Controlados reportados por el CENAPRED, en el Atlas Nacional de Riesgos en el año 2021 _____	84
Tabla 6. Análisis de Parámetros de evaluación en campo del SDF de RSU _____	88
Tabla 7. Tipo, generadores, consecuencias y medidas de mitigación de riesgos en sitios de disposición final _____	94
Tabla 8. Tipos de suelos presentes en el territorio de la República Mexicana _____	108
Tabla 9. Sistema Unificado De Clasificación De Suelos (S.U.C.S.) _____	111
Tabla 10. Coeficiente de permeabilidad de suelos _____	112
Tabla 11. Características de material limo-arcilloso para capa sello _____	138
Tabla 12. Combinaciones de capa sello mixta (elaboración propia) _____	153
Tabla 13. Composición del biogás _____	172
Tabla 14. Pendientes de inclinación de tubería horizontal para sistema de trampas de condensado en sistema continuo _____	225
Tabla 15. Pendientes de inclinación de tubería horizontal para sistema de trampas de condensado en sistema discontinuo de control y monitoreo de biogás por método de zanja o trinchera _____	227
Tabla 16. Criterios para colocación de trampas de condensado en sistema de crestas y valles en sistema continuo _____	231
Tabla 17. Características de lixiviado de acuerdo con su edad _____	239
Tabla 18. Eficiencia de tratamientos de acuerdo con edad de lixiviado _____	240
Tabla 19. Lista de parámetros a analizar para el monitoreo de agua superficial y subterránea _____	295

CAPÍTULO I

“Un vertedero a cielo abierto es demasiado común y no necesita explicación. Nunca es satisfactorio, como suele afirmarse. La basura generalmente se esparce en una gran área, proporcionando una fuente de alimento y refugio para ratas, moscas y otras alimañas. Es antiestético, molesta por el olor y el humo, el vertedero a cielo abierto representa un peligro de incendio, y a menudo, es una causa de contaminación del agua. Se debe eliminar o cambiar su funcionamiento a relleno sanitario.”

Salvato Jr, J. 1992. Environmental Engineering and Sanitation, pp. 403

1. INTRODUCCIÓN

Esta tesis representa la experiencia adquirida en la operación de SDF, donde se han adquirido habilidades y aplicado alternativas que han ayudado a mejorar los procesos operativos, por ello la propuesta de es crear un manual que sirva de alternativa para la clausura vertederos a cielo abierto o sitios no controlados, el cual ayude a los cuerpos técnicos a de la Administración Pública al desarrollo y revisión de los proyectos de clausura, saneamiento y posclausura, de los sitios de disposición final en los que los procesos operativos y de clausura que se han visto limitados por diversas causas ante el cumplimiento de las normativas aplicables a residuos. Esta propuesta representa una viabilidad y una alternativa aplicable en los aspectos ingenieriles, técnicos y sobre todo ambientales.

A inicios de la segunda década del siglo XXI, los espacios a destinar para el confinamiento y disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) se han visto reducidos debido al crecimiento de la mancha urbana. Lo mismo ocurre con la vida útil de los sitios para disposición final en operación, la cual se acorta debido a una inadecuada conformación y compactación de los residuos. Por ello, es necesario afrontar nuevos retos que exijan mayor interés en el manejo integral de los residuos sólidos urbanos (RSU) con el objetivo de frenar su disposición final en sitios no controlados (SNC), también denominados vertederos a cielo abierto, o botaderos. Estas nuevas acciones deben ir enfocadas a fortalecer y aplicar adecuadamente el sistema de rellenos sanitarios para la disposición final de los residuos urbanos y de manejo espacial, estableciendo como meta a largo plazo la implementación de alternativas de aprovechamiento de los residuos cuando el poder adquisitivo y la viabilidad den la pauta para hacerlo. Lo anterior conduce a implementar y

asumir la responsabilidad y el compromiso para la clausura y saneamiento de sitios no controlados (SNC).

En México, la disposición final de los residuos sólidos urbanos se realiza, principalmente, a través de su confinamiento en: rellenos sanitarios (RS), sitios controlados (SC) y sitios no controlados (SNC). Con base en datos publicados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), en el artículo “Tiraderos a cielo abierto dañan ambiente y salud humana” publicado el 18 de enero de 2019, el cual, con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), menciona que del total de los sitios de disposición final de RSU, el 87% son sitios no controlados (SNC) y únicamente el 13 % son rellenos sanitarios (RS) o sitios controlados (SC).

Citando al “*Diagnóstico Básico Para La Gestión Integral De Los Residuos del año 2020 (DBGIR,2020)*” publicado por la SEMARNAT en mayo del 2020, el cual con base en el “*Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones de la Ciudad de México*” (CNGMD) 2017, sobre las características de los sitios de disposición final (SDF), no es posible clasificarlos como rellenos sanitarios (RS), sitios controlados (SC) o sitios no controlados (SNC), por lo que se tomaron aspectos para clasificarlos según la infraestructura y características de los procesos operativos con los que cuentan, como son: la existencia de báscula, captura de lixiviados, captura de biogás, utilización de geomembrana, cerca, control de acceso, control de admisión de residuos, compactación y cubrimiento con tierra, monitoreo de aspectos de higiene y seguridad. En consideración con estas condiciones se obtuvo que a nivel nacional se tiene un total de 2,203 sitios de disposición final, de los cuales, y en relación con la infraestructura con la que cuentan, sólo 190 sitios (el 8.62 %) tienen báscula; 359 (el 6.30%) cuentan con infraestructura para la captura de lixiviados y de éstos sólo 91 sitios tienen sistemas para su tratamiento; 213 (el 9.67%) están equipados con infraestructura para la captura de biogás. En el mismo sentido 326 (el 14.80%) cumplen con impermeabilización del suelo con geomembrana; 955 (el 43.35%) cuentan con un cercado perimetral; 753 (el 34.18%) tiene control de acceso a las instalaciones, y en el 81% de los sitios no se tiene control sobre el tipo y la cantidad de residuos que ingresan, lo que, según comentarios de la misma Secretaría, implica que no se pueda asegurar que se confinen residuos peligrosos en estos SDF de RSU. En cuanto a los procesos operativos, en solo 955 (el 43.35%) se compactan y cubren los residuos con material térreo (no se especifica la frecuencia con que se realiza). En cuanto a higiene y seguridad, únicamente en 260 sitios, es decir, el 11.80% del total, se realizan actividades

afines. En la Tabla 1, se enlistan las características y número de sitios de un total de 2,203 con las características antes mencionadas.

Tabla 1. *Características de infraestructura y procesos en SDF a nivel Nacional*

Características de Infraestructura y Procesos en SDF a Nivel Nacional	
Infraestructura	Número de Sitios
Báscula	190
Captura de Lixiviados	359
Captura de Biogás	213
Geomembrana	326
Cerca	955
Ninguna	1,053
Procesos	Número de Sitios
Control de Acceso	753
Control de Admisión de Residuos	417
Compactación y Cubrimiento con Tierra	955
Monitoreo de aspectos de Higiene y Seguridad	260
Ninguna	883

Fuente: elaboración propia adecuado del DBDIR, SEMARNAT, 2020

Los datos anteriores dan evidencia de que la infraestructura con la que cuentan los sitios de disposición final (SDF) en nuestro país es insuficiente para suponer que sean instalaciones en las que se puedan depositar los residuos con garantía de protección al ambiente, sobre todo, cuando se observa que 1,053 SDF, los cuales representan el 47.80% del total, no cuentan con ninguna infraestructura básica para la protección medioambiental. (DBGIR, SEMARNAT, 2020)

El DBGIR señala que la disposición final de 34,726 t/día de RSU, que corresponden al 40.21% de la generación total de los residuos, se realiza en 82 sitios repartidos en 79 municipios de 28 entidades federativas diferentes, sin incluir a la Ciudad de México, que no cuenta con ningún sitio en operación. Destacando que estos 82 sitios cumplen con todas las características de infraestructura y de procesos operativos como la conformación, compactación y colocación de cubierta diaria, entre otros.

Por otro lado, se tiene que 3,695 t/día que representan el 4.28% del total generado, son depositadas en SDF que no cumplen con ninguna característica de infraestructura y de procesos operativos, y por ende incumple con la normatividad (NOM-083-SEMARNAT-2003). Estos sitios están ubicados en 509 municipios en 27 estados de la República, Encabezando la lista el estado

de Oaxaca, con 207 sitios donde se depositan 316.17 t/día (DBGIR, SEMARNAT, 2020).

En la Figura 1, se puede observar el número de sitios de disposición final por Entidad federativa .

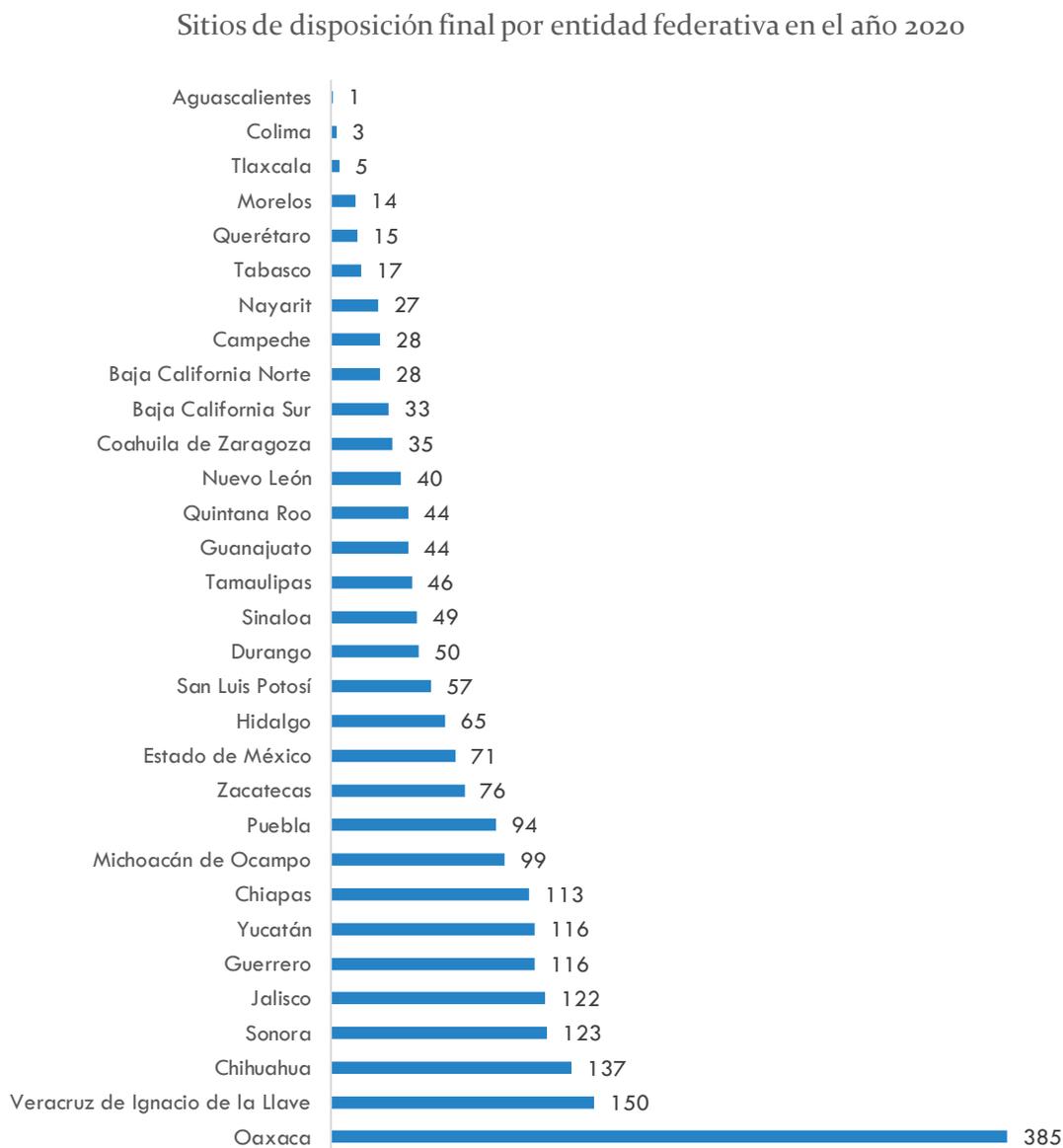


Figura 1. Gráfica de sitios de disposición final por Entidad federativa reportados en el año 2020

Fuente: elaboración propia adecuado del DBGIR, SEMARNAT, 2020

La identificación y clasificación de sitios publicados por SEMARNAT se hace mediante los cuestionarios que el INEGI envía a los municipios y dependencias para realizar el “Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones de la Ciudad de México” (CNGMD), razón por la cual la información no se obtiene en ninguna visita ni evaluación en campo por parte de SEMARNAT para constatar que los sitios realmente cuentan con la infraestructura y características de los procesos con la que clasificó a los SDF en el DBGIR, 2020. Por ello se recomienda no adicionar preguntas a la tabla 38 del DBGIR 2020 “Propuesta de información sobre sitio de disposición final a incluir en el censo nacional de gobiernos municipales y delegacionales” (sic), sino hacer una evaluación y verificación en campo por parte de la Secretaría, para así tener información confiable de la condición y características de los sitios de disposición final sean estos controlados, o no controlados.

Con estas acciones por parte de la SEMARNAT, se estaría dando cumplimiento al “Artículo 39” de la LGPGIR, el cual dice que en conjunto los tres órdenes de gobierno (Federal, Estatal y Municipal), [...] Integrarán inventarios de tiraderos de residuos o sitios donde se han abandonado clandestinamente residuos de diferente índole en cada entidad, en los cuales se asienten datos acerca de su ubicación, el origen, características y otros elementos de información que sean útiles a las autoridades, para desarrollar medidas tendientes a evitar o reducir riesgos. La integración de inventarios se sustentará en criterios, métodos y sistemas informáticos, previamente acordados, estandarizados y difundidos.

Por otra parte, tomando como base al artículo “*Tiraderos a cielo abierto*”, publicado en el año 2012 en la revista del CONACyT “Ciencia y Desarrollo”, realizado por la Dra. Neftalí Rojas y la Dra. Carla Sahagún, en la República Mexicana, se identificaron, para el año 2012, al menos 5,000 sitios no controlados SNC, de los cuales en la península de Baja California y Norte del país se ubican 510. En el Estado de Coahuila se tiene registro de 205 sitios, mientras que en la Capital del Estado Michoacán se han detectado 97. En la zona ubicada en la Costa del Pacífico que abarca de los estados de Sinaloa a Oaxaca, se tiene registro de aproximadamente 1,411 (SNC), de los cuales 570 se encuentran en el Estado de Oaxaca. En la región del Golfo de México en el Estado de Veracruz se tienen registrados 1,500, mientras que en el Estado de Tamaulipas se tienen 28 SNC. En la zona del sureste mexicano, en los Estados de Tabasco y Chiapas hay la presencia de 17 y 118 sitios respectivamente entre sitios municipales y clandestinos. En la Península de Yucatán se tienen registrados 127 sitios. En los estados del centro del país hay 1,219 SNC, de los cuales 672 sitios se encuentran en Aguascalientes y el Estado de Morelos tiene 32 sitios identificados en las zonas urbanas. (N. Rojas, C. Sahagún, 2012)

En la Figura 2, se pueden observar el número de SNC identificados en los Estados de la República.



No.	Estado	Número de Sitios No Controlados	No.	Estado	Número de Sitios No Controlados
1	B.C. Norte	16	19	Querétaro	17
2	B.C. Sur	46	20	Edo. De México	68
3	Sonora	54	21	Hidalgo	84
4	Chihuahua	44	22	Morelos	32
5	Coahuila	205	23	Ciudad de México	96
6	Nuevo León	29	24	Tlaxcala	60
7	Durango	39	25	Puebla	217
8	Zacatecas	78	26	Tamaulipas	28
9	Sinaloa	138	27	Veracruz	1,500
10	Nayarit	300	28	Tabasco	17
11	Jalisco	137	29	Chiapas	118
12	Colima	10	30	Campeche	11
13	Michoacán	97	31	Yucatán	106
14	Guerrero	159	32	Quintana Roo	10
15	Oaxaca	570	Total		5,003
16	Aguascalientes	672			
17	San Luis Potosí	25			
18	Guanajuato	20			

Figura 2. Listado y ubicación del número de VCA o SNC por entidad federativa reportados en México.

Fuente: elaboración propia adecuado del artículo tiraderos a cielo abierto. N. Rojas, C. Sahagún. Revista Ciencia y Desarrollo. Mayo-junio 2012

Según el Censo Nacional de Gobiernos Municipales realizado en 2019 por parte del INEGI, se obtuvieron los datos mostrados en la Figura 3, los cuales muestran el número de municipios y la manera en que realizaron la disposición de los residuos sólidos urbanos.

Municipios que utilizan distintas formas de disposición de los RSU

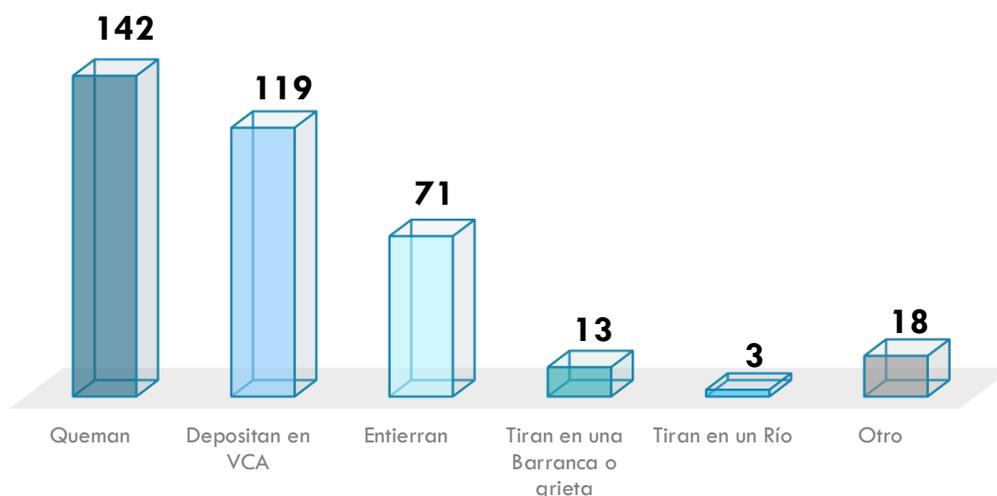


Figura 3. Gráfico del número que municipios que emplean distintas formas de disposición de RSU

Fuente: elaboración propia adaptado del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2019. INEGI. Agosto, 2020

Actualmente en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), conformada por las entidades federativas de la Ciudad de México, el Estado de México y un municipio del Estado de Hidalgo, se tienen identificados desde el año 2010 un total de 62 sitios no controlados entre las entidades del Estado de México y el Estado de Hidalgo (INEGI, 2011). En cuanto a hectáreas de que abarcan los sitios controlados (SC) y los sitios no controlados (SNC), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía reportó una ocupación de 98 hectáreas (INEGI, 2013), de las cuales en su mayoría se encuentran dentro de los municipios pertenecientes a la ZMVM en el Estado de México y en el Estado de Hidalgo,

En la Tabla 2 se describen los sitios de disposición final que se tienen hasta la fecha en las tres entidades que conforman la Zona Metropolitana del Valle de México.

Tabla 2. Número de sitios de disposición final (SDF) en la ZMVM

Entidad federativa	Tipo de sitio	
	Relleno sanitario	Sitio No Controlado
<i>Distrito Federal (SIC)</i>	0	0
<i>Hidalgo</i>	0	1
<i>Estado de México</i>	28	61

Fuente: elaboración propia adaptado del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2011. INEGI. 2013.

En el caso del Estado de México el INEGI menciona que hay 28 rellenos sanitarios en la entidad, sin embargo, el Sistema Integral de Residuos del Estado de México (SIREM), únicamente reconoce catorce (14¹) sitios como rellenos sanitarios.

Los sitios no controlados (SNC) provocan diversos impactos ambientales (uno de ellos, la afectación de la calidad del suelo, causada por la lixiviación y el arrastre de metales pesados como plomo y mercurio, entre otros) que pueden estar contenidos en la fracción de residuos inorgánicos. Por ello, antes de iniciar los trabajos para la recuperación y re inserción de un sitio, se debe conocer el tipo de residuos que se han depositado en él y sus posibles riesgos para planificar las intervenciones técnicas la visión y el objetivo de garantizar el saneamiento de las áreas degradadas para reintegrarlas como áreas saneadas. Reintegrando el sitio al entorno del paisaje y mitigando sus impactos ambientales, ya que, aunado a otras afecciones que causan estos sitios, está presente la contaminación del agua subterránea y superficial con los lixiviados que se producen durante la biodegradación de los residuos orgánicos y la dilución de compuestos inorgánicos. La destrucción de las zonas de vegetación y afectación en el hábitat de las especies animales también es un problema relacionado a estos sitios. Sumado a las afecciones mencionadas, se genera afectación a la calidad del aire con la emanación de biogás, compuesto principalmente de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄), gases que contribuyen al efecto invernadero.

Por lo descrito en el párrafo anterior, es tiempo de desarrollar una sinergia entre el medioambiente y la forma en que son tratados los residuos, pero, sobre

¹ Fuente: Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México, Portal de Consulta del Sistema Integral de Residuos del Estado de México, 2021.

todo, aplicar métodos y tecnologías que sean viables para la clausura de sitios no controlados y para la adecuada disposición de residuos que generan contaminantes dañinos para la sociedad y el medioambiente.

2. JUSTIFICACIÓN

Un vertedero a cielo abierto o sitio no controlado es el sitio donde se disponen residuos sólidos urbanos, el cual carece de infraestructura para mitigar los impactos ambientales.

En México se realiza la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) a través de la técnica de relleno sanitario (RS), sitios controlados (SC) y sitios no controlados (tiraderos o vertederos a cielo abierto), (SNC). Esta disposición final de residuos sólidos se realiza, mayormente, a través del sistema de sitios no controlados, lo que representa una afectación para el ambiente y para el medio social. A lo largo del país se tienen 767 sitios de disposición final (SDF), de los cuales únicamente 82 cumplen con las características básicas de relleno sanitario y 685 son sitios no controlados (DBGIR, SEMARNAT, 2020).

Actualmente, el Gobierno de la Ciudad de México no cuenta ya con ningún relleno sanitario en operaciones, pero la zona metropolitana es ahora el receptor de los RSU generados en la capital del país. La Zona Metropolitana del Valle de México está conformada por las 16 Alcaldías de la Ciudad de México, un municipio del Estado de Hidalgo (Tizayuca) y 59 municipios del Estado de México (INEGI, 2013). El Estado de México alberga 89 sitios de disposición final (SDF), de los cuales 61 son sitios no controlados, para el caso de Hidalgo de los 78 sitios de disposición final (SDF) 71 son sitios no controlados (INEGI, 2010).

Esta práctica de disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU) a través del confinamiento de residuos en sitios no controlados (SNC) produce grave deterioro en el ambiente debido a que en este tipo de lugares se carece de cualquier tipo de control en la recepción de residuos, por lo que se propicia el depósito irregular de los mismos y con ello se incrementa la peligrosidad de los vertederos. Lo anterior provoca que cada una de las toneladas dispuestas de esta forma genere subproductos más agresivos que los producidos en sitios controlados (SC) o rellenos sanitarios (RS), aunados a la generación de biogás y lixiviados generado por la propia degradación de los residuos.

Los subproductos, como el biogás y lixiviado, contienen altas concentraciones de contaminantes y sustancias peligrosas que potencializan los riesgos derivados de estos. De presentarse un manejo inadecuado, tales sustancias pueden migrar a las afueras del sitio y producir, aunado a la contaminación, malos olores y deterioro medioambiental, además de contribuir directamente al cambio climático (derivado de las emisiones de biogás) y a la contaminación

de los suelos y las aguas superficiales, así como subterráneas (en el caso de la contaminación por lixiviados), (DGSU, 1986).

Así mismo, los sitios no controlados representan una potencial vector de fauna nociva (perros, ratas, moscas, mosquitos, pulgas, entre otros.), la cual es portadora y transmisora de enfermedades que afecta a la salud de las personas que habitan en las inmediaciones de los sitios de disposición final irregulares.

Además, siempre existe el riesgo de que ocurra algún incendio, que también puede provocar afecciones a la salud humana.

Como puede comprobarse, la gran cantidad de sitios no controlados (SNC) genera consecuencias negativas en los aspectos sociales y medioambientales. Por ello, deben tomarse acciones inmediatas para la clausura armoniosa, técnica y ambiental, así como establecer programas de posclausura para estos sitios de disposición final (SDF) irregulares. Si bien los sitios no controlados dieron un servicio a la comunidad que disponía de los residuos sólidos urbanos (RSU) a bajo costo monetario, las irregularidades en el proceso de disposición final podrían generar afectaciones todavía mayores para la población.

Por todo lo anterior, este trabajo se plantea alternativas que ayuden a la toma de decisiones de los municipios para la atención y corrección de estos pasivos ambientales.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer una metodología acorde a la normatividad aplicable, que brinde una solución técnicamente sustentable, que ayude a la elaboración y puesta en marcha de proyectos para el cierre y clausura ambiental de los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, aplicando procedimientos ingenieriles que privilegien el cuidado del ambiente.

3.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Identificar los impactos ambientales que se generan en los vertederos a cielo abierto o sitios no controlados como pasivos ambientales.
- Analizar y plantear soluciones para el saneamiento de los vertederos a cielo abierto o sitios no controlados y su reintegración al ambiente.
- Establecer los procesos de conformación de los residuos sólidos dispuestos en los vertederos a cielo abierto o sitios no controlados.
- Plantear el desarrollo de los procesos con el posible uso de materiales existentes en la zona que satisfagan técnicamente la normatividad en el proceso de cobertura final en la clausura y saneamiento.
- Plantear alternativas para el control, tratamiento y manejo del biogás y lixiviados.
- Establecer un desarrollo cronológico de las actividades de clausura, saneamiento y mantenimiento (post-clausura).

4. ALCANCES

- Establecer los lineamientos de una metodología para la clausura ambiental de sitios no controlados
- Evaluación e identificación de los impactos negativos generados por sitios no controlados
- Establecer el método de conformación, compactación y ángulo de inclinación de taludes, conformación y compactación de bermas y plataformas para la estructuración y clausura de los sitios no controlados.
- Planteamiento de alternativas para el control, tratamiento y manejo de lixiviado y biogás.
- Integración de un manual con propuestas técnicas que sean aplicables por los municipios en la regularización, clausura y saneamiento ambiental de sitios no controlados.

CAPÍTULO II

1. ANTECEDENTES

En este capítulo se hace una cronología de la evolución que ha tenido la disposición final de los residuos sólidos urbanos y los sitios de disposición final en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) a lo largo de la historia con base en datos que se tomaron de los libros “*El servicio de limpia en la Ciudad de México*” (Álvarez y López, 1999) y “*Bosquejo histórico de los residuos sólidos de la ciudad de México*” (Sánchez, 1993) basados en datos del Instituto Nacional de Antropología e Historia.

1.1. ÉPOCA PREHISPÁNICA

En la época prehispánica, el concepto de desecho estaba definido por la palabra *Tlazolli*, de la cual se derivan dos palabras: *Tlazotléotl*, nombre designado a la diosa de los desechos y *Tlazotlalli* “tierra abonada con residuos”. Los historiadores como Jaques Soustelle, señalan que, a principios del siglo XVI, Tenochtitlan tenía hábitos muy estrictos de limpieza para mantener el orden en las avenidas principales de la ciudad, así como en los templos y canales.

En aquel entonces, el grueso de los residuos estaba conformado, en su mayoría, por aquellos de carácter orgánico, provenientes de la actividad doméstica, de la florería y de la carpintería, así como de la actividad textil y de la producción de papel. La forma de disponer de tales residuos consistía en enterrar los de origen doméstico en los patios interiores, darlos a los animales como alimento o aprovecharlos para la elaboración de abono al mezclarlos con hierbas secas y estiércol; este último se obtenía de las letrinas públicas, sistema de disposición del desecho generado por la actividad humana de gran relevancia en la vida pública, puesto que dicho compuesto era llevado a las chinampas para nutrir la tierra o para curtir pieles de animales.

El registro más antiguo que se tiene de sitios de disposición final (SDF) es del año de 1531, en el que el ayuntamiento de la Ciudad de México señaló tres lugares donde los vecinos podían depositar sus residuos. Uno de ellos se ubicó en el camino a Tlatelolco, otro en la laguna detrás de las casas de Andrés Tapia y Marcilla, y el tercero se encontraba a espaldas de las casas de don Pedro Solís.

1.2. ÉPOCA DE LA COLONIA

Después de la conquista, en 1570, se hace la publicación de la normatividad relativa a la disposición final de los residuos, la cual consistía en arrojarlos a la laguna que estaba junto a la iglesia mayor (hoy Catedral Metropolitana de la Ciudad de México), dado que el lugar donde estaba siendo construida no permitía tener cimientos fijos. Aunque el verdadero objetivo de esta actividad era que los residuos fuesen como relleno y así ganar espacio al área de la laguna.

Con relación al método de disposición final, en 1581 se ordenó que todo el material extraído de acequias, así como todo tipo de residuo vegetal, debía depositarse en los muladares (vertederos) de Iztapalapa. Al igual que en la época prehispánica, se continuó con la práctica de rellenar la laguna utilizando los residuos como recurso de construcción, así como para otros usos domésticos y demás actividades urbanas. De tal manera que se definieron y seleccionaron las zonas de ubicación de los sitios de disposición final, y, de los cuales, sólo uno ha podido ser identificado en la zona de Iztapalapa.

En 1790, el maestro mayor de la ciudad, don Ignacio Castera, impulsó, a través de las reformas borbónicas, una serie de acciones para la limpieza de la Ciudad, tales como el incremento en la frecuencia de recolección de residuos. Mediante tales reformas se determinó que los vertederos de residuos se ubicaran fuera de los límites de la ciudad, es decir, pasando las garitas. Sin embargo, estas acciones nunca se pudieron llevar a cabo, dado que las carretas recolectoras no soportaban los grandes trayectos a través de las deterioradas calzadas y avenidas que la gestión novohispana, a diferencia de la gestión Tenochca, no supo mantener en correctas condiciones. Por ello, fueron propuestos otros sitios de disposición final por don José Damián Ortiz, mismos que se encontraban todavía más cerca de los puntos de recolección, además de ser verificados, y de no causar perjuicios ni daños a la población en general.

1.3. INDEPENDENCIA

Después de la Independencia, los vertederos propuestos correspondían a El Caballero, que, aunque no recibía una alta cantidad de residuos, gozaban de gran importancia gracias a su ubicación. El del Puente de Santa Cruz, el cual constaba de un terreno que se ubicaba en un paraje en el camino verde hacia San Lázaro. De igual manera, la ubicación de este sitio era una ventaja para los recolectores, dado que significaba un recorrido más corto en carretilla. El

principal vertedero fue el del Puente de las Guerras, que se colocaba entre dos vertederos que podrían haber sido cerrados, dejando este en operación solitaria.

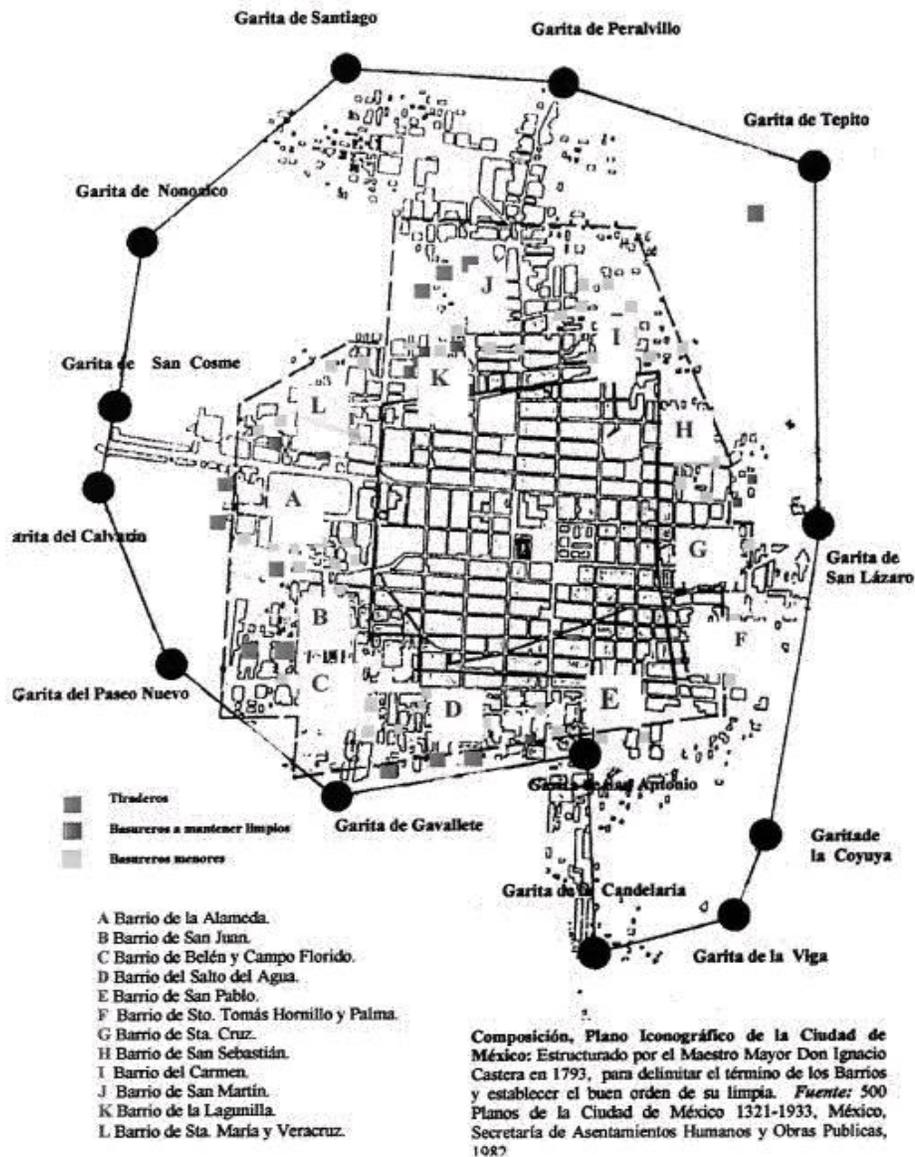


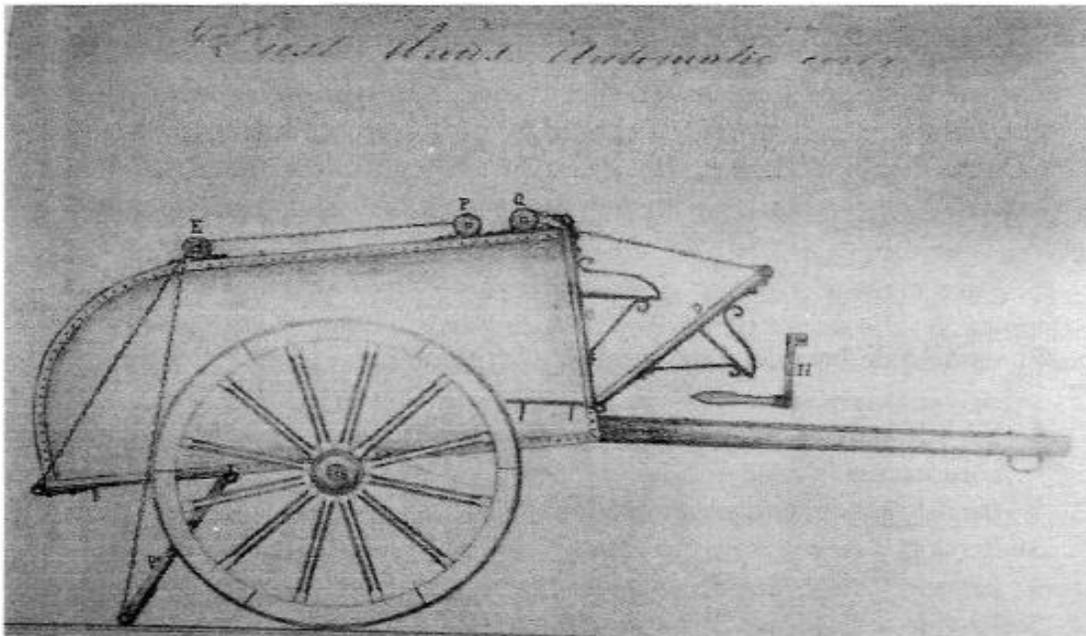
Figura 4. Ilustración de plano iconográfico de la Ciudad de México. estructurado para delimitar los Barrios y establecer el buen orden de su limpia. Realizado por el Maestro Mayor don Ignacio Castera en 1793

Fuente: tomado del libro *El Servicio de Limpia de la Ciudad de México*, extraído de la fuente: 500 Planos de la Ciudad de México 1321-1933, México, Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas 1982

Como resultado de la autorización del Virrey para la construcción de vertederos, se hace la apertura de tres sitios de disposición final (SDF):

- Gihuitongo
- San Lázaro
- Puente del Clérigo.

La operación de estos sitios consistía en arrojar los residuos en zanjas de 15, 30 o 40 varas de largo y 2 varas de profundidad por 3 de ancho (una vara equivale a 80 cm). El informe establece que en la mayoría de los casos no se advertía que los residuos fueran cubiertos con tierra, la cual se había sacado al hacer la zanja. En los vertederos de San Lázaro no todas las zanjas estaban tapadas, pero se encontraban fuera de la acequia y a una distancia considerable de la población; sin embargo, en los sitios de Gihuitongo y Puente del Clérigo, estando este último en el tránsito del público, se depositaban tanto residuos sólidos como residuos líquidos.



CARRETA PARA RECOLECCIÓN DE BASURA, 1890, AHDDF

Figura 5. Ilustración de carreta para la recolección de basura, utilizada en el año 1890

Fuente: tomado del libro *El Servicio de Limpia de la Ciudad de México*, extraído de la fuente: Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas 1982.

Para el sitio de San Lázaro los comisionados para la limpieza de la ciudad, don Manuel de Luyando y don Francisco Carrillo Regrés, realizaron recomendaciones para que los residuos líquidos fueran depositados directamente en la laguna, dado que la corriente del agua los arrastraría a su centro. Estas recomendaciones se hicieron igualmente para varios vertederos donde las aguas de la acequia todavía tuvieran una corriente considerable.

El teniente coronel de ingenieros, don Miguel Constanzó, consideró que era conveniente que las zanjas fueran cubiertas con tierra para que, con ayuda de la evaporación causada por el sol y los vientos, los residuos logaran una consistencia sólida.

1.4. MÉXICO CONTEMPORÁNEO

Ya entrados en el siglo XX, en el año de 1932, existían en la Ciudad de México 6 sitios de disposición final (SDF), llamados como se enlista a continuación:

- La Jarana
- Cuatro Vientos
- El Peñón
- La Magdalena Mixiuhca
- El Atorón
- La Modelo

Una de las mayores preocupaciones para las autoridades de esa época era que en estos sitios se practicaba el trabajo de la pepena.



PEPENADORES LABORANDO EN UN TIRADERO, 1920, MÉXICO D.F., FOTOTECA DEL INAH

Figura 6. *Fotografía de pepenadores laborando en un vertedero, Ciudad de México 1920*

Fuente: tomado del libro *El Servicio de Limpia de la Ciudad de México*. Fototeca INAH.

En 1937, el Gobierno de la Ciudad, a través del Departamento del Distrito Federal, tenía programado el cierre de los vertederos “Cuatro Vientos”, “Magdalena Mixhuca” y “La Jarana” a consecuencia y en virtud de su cercanía con los centros habitacionales. En aquella época el presupuesto otorgado para estas clausuras fue de 2 millones de pesos.



TIRADERO DE ZOQUIPA, 1937, MÉXICO D.F., AGN

Figura 7. Fotografía del Tiradero de Zoquipa 1937

Fuente: tomado del libro *El Servicio de Limpia de la Ciudad de México*. Fototeca INAH.

Para 1940, se consideró clausurar los vertederos y utilizar los residuos para producir composta que fertilizara las tierras desecadas del lago de Texcoco.

Entre los años de 1941 y 1946, la Ciudad de México tenía 4 delegaciones y 39 sectores. Las cuatro delegaciones contaban con un vertedero, los residuos provenientes de la ciudad se depositaban en los vertederos Magdalena Mixiuhca, Santa Catarina, Bramaderos, La modelo, Dos ríos, Nativitas, Independencia y Pedregal. En esos años se estima que se recogían entre 800 y 1,000 toneladas de residuos diarias.



TRABAJADORES DEL DEPARTAMENTO DE LIMPIA EN VEHÍCULOS CONTENEDORES DE BASURA. 1940.
MÉXICO D.F., FOTOTECA DEL INAH

Figura 8. Fotografía de trabajadores del Servicio de Limpia en vehículos contenedores de residuos, Ciudad de México 1940.

Fuente: tomado del libro *El Servicio de Limpia de la Ciudad de México*. Fototeca INAH.

Para 1970 se realizó una modificación a la ley orgánica del Departamento del Distrito Federal y se crearon entonces las 16 Delegaciones con las que cuenta en la actualidad (hoy Alcaldías).

En los primeros años de la década de los setenta, se inició la construcción de infraestructura para el manejo de los residuos sólidos, que ya era una generación de 6,000 toneladas diarias. Para 1974 dan inicio las operaciones de las primeras estaciones de transferencia en la Delegación Miguel Hidalgo, Cuauhtémoc y Azcapotzalco, así como la planta industrializadora de residuos sólidos urbanos (RSU) de San Juan de Aragón. En 1976 inicia operaciones las estaciones de transferencia de la delegación Venustiano Carranza y en 1978 la de Iztacalco.

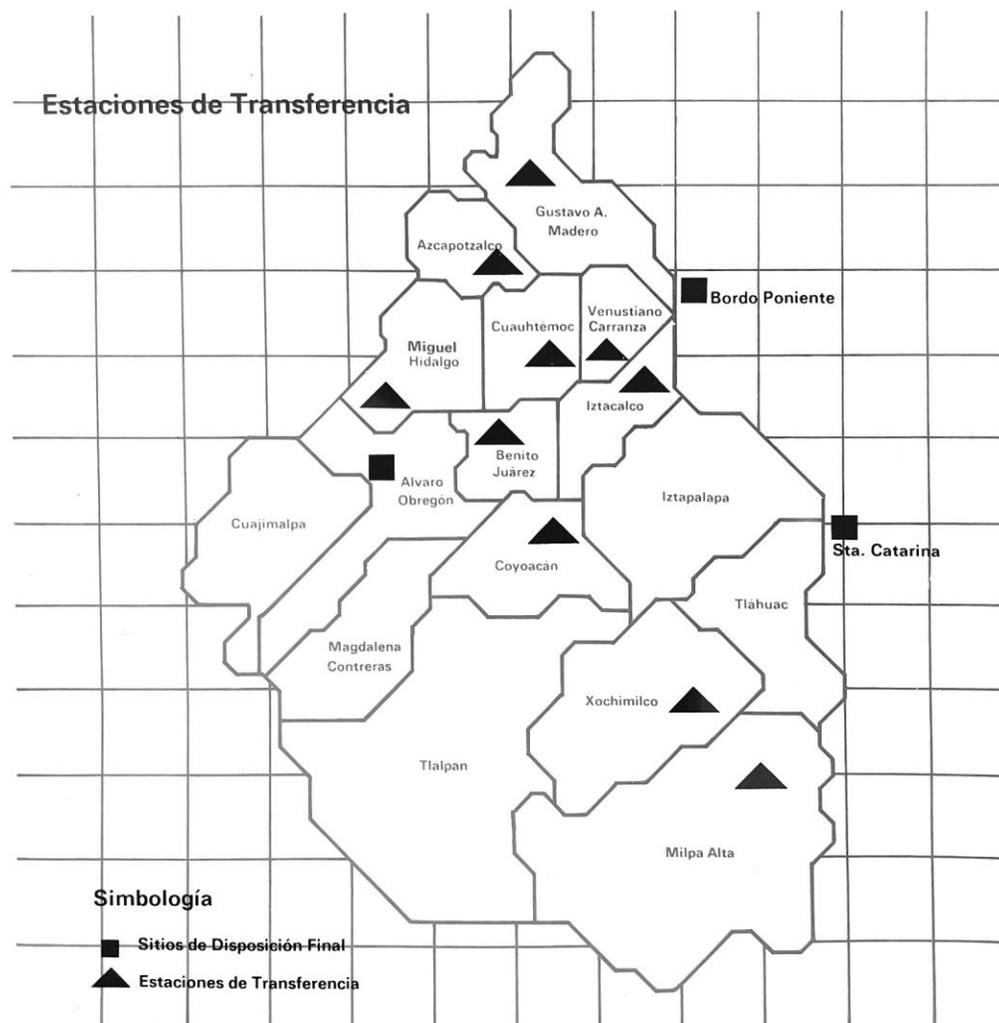


Figura 9. Mapa de localización de infraestructura para el Manejo de Residuos con la que contaba la Ciudad de México en 1970

Fuente: tomado del libro México *La Ciudad Más Grande del Mundo*

En el año de 1977 la mancha urbana empezó a crecer, por lo que los sitios no controlados que abarcaban un área aproximada de 500 hectáreas representaban una gran problemática y preocupación para las autoridades después de que estos fueron alcanzados por la urbanización. Tales vertederos generaban altos niveles de contaminación tanto de suelo y aire como de agua, que como consecuencia provocaban problemas de salud pública y marginación social.



Figura 10. Fotografía de Sitio no controlado de Santa Cruz Meyehualco, Ciudad de México, 1980.

Fuente: tomado del Periódico El Universal, artículo “*Santa Cruz Meyehualco, una de las primeras unidades habitacionales*” Imagen Cortesía Beatriz Ramírez y Gobierno CDMX

En el año de 1980, el manejo de los residuos se encontraba en un estado crítico debido al personal sindicalizado y a los líderes de pepenadores que condicionaban el manejo y disposición de los residuos. Esto dio origen a que hubiese sitios no controlados en las siguientes áreas de la Ciudad:

- Delegación Milpa Alta
- Ajusco
- Cuauhtepac
- Tláhuac
- San Lorenzo Tezonco
- Santa Cruz Meyehualco
- Santa Fe
- Venustiano Carranza
- Gustavo A. Madero
- Vaso de Texcoco

Estos vertederos generaron impactos constantes como malos olores, incendios, proliferación de la fauna nociva y afección de los mantos acuíferos. En el caso del vertedero de Santa Cruz Meyehualco, su clausura fue necesaria debido a los incendios constantes que se producían y con el fin político-social de retirar poder a Rafael Gutiérrez Moreno, quien era diputado y líder de pepenadores de aquel sitio. Además de la problemática ambiental, la problemática social penetró profundamente en los vertederos, llegando al punto

de que los líderes de los pepenadores condicionaran la disposición de los residuos a cambio de apoyos de distinta índole.



TRADERO DE SANTA CRUZ MEYEHUALCO, 1982, MÉXICO D.F.; AGN

Figura 11. Fotografía del Sitio no controlado de Santa Cruz Meyehualco, Ciudad de México 1982.

Fuente: tomado del libro *El Servicio de Limpia de la Ciudad de México*. Fototeca INAH.

En el periodo de 1984 a 1988 se aplicaron medidas para el ordenamiento de la disposición final de los RSU, las cuales consistían en la clausura de siete vertederos:

- Santa Cruz Meyehualco
- San Lorenzo Tezonco
- Santa Fe
- Tlalpan
- Milpa Alta
- Vaso de Texcoco
- Bordo de Xochiaca

Santa Cruz Meyehualco operó durante cuarenta años en un área de 150 hectáreas y fue clausurado en este programa de ordenamiento de los sitios de disposición final. Se clausura también el vertedero de San Lorenzo Tezonco en 1985 (este vertedero recibía aproximadamente dos mil toneladas diarias) y en 1987 se clausura el vertedero de Santa Fe, el segundo más grande de la ciudad con una superficie de aproximadamente 35 hectáreas, que se expandieron a

60 para la estabilización de taludes. Dentro de este plan de clausura de vertederos se incluye al vertedero de Tlalpan, Milpa Alta, Vaso de Texcoco y el del Bordo de Xochiaca que en aquellos años formaba parte de la jurisdicción del Distrito Federal. Con estas acciones se convirtieron poco más de 300 hectáreas en áreas verdes y parques recreativos, los cuales se conocen hoy en día como Alameda Oriente, Alameda Poniente y Parque Cuitláhuac. El único sitio que no cerró en ese periodo fue el de Santa Catarina, el cual se clausuró hasta mediados del año 2001.

Para el año de 1988 se inaugura la Alameda Oriente, con una superficie de 96 hectáreas, ubicada al nororiente del D.F (hoy CDMX), colindando con el Aeropuerto Internacional Benito Juárez, la entonces Delegación Venustiano Carranza (hoy Alcaldía Venustiano Carranza) y el municipio de Nezahualcóyotl. En este saneamiento del vertedero se construyeron canchas deportivas, áreas recreativas y un lago artificial, además de colocarse trescientos mil sujetos forestales de especies adaptables a suelo salino.

Debido a la clausura de los sitios de disposición final (SDF), el gobierno construye dos rellenos sanitarios, el primero abierto en 1985 en la zona del Lago de Texcoco con una superficie de 135 hectáreas y el otro, en 1987, en Santa Fe, llamado Prados de la Montaña.



RELLENO SANITARIO DE PRADOS DE LA MONTAÑA. "PARED IMPERMEABILIZADA". 1992. MÉXICO D.F.

Figura 12. *Fotografía del Relleno Sanitario Prados de la Montaña, "Pared Impermeabilizada", Ciudad de México 1992*

Fuente: tomado del libro El Servicio de Limpia de la Ciudad de México. GDF, DGSU.

En 1991 se crea un Programa Metropolitano para Control de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) entre el Gobierno del entonces Distrito Federal y el Gobierno del Estado de México. Dicho programa establecía la reorganización en 5 zonas de la superficie donde colindaban 17 municipios del Estado Mexiquense y delegaciones del Distrito Federal, este plan establecía la construcción de rellenos sanitarios, estaciones de transferencia y centros integrales de aprovechamiento de residuos. Sin embargo, la ejecución del proyecto no pudo llevarse a cabo debido a la poca viabilidad arrojada por los estudios realizados y por la fuerte oposición de la población, así como por la duración de los cuerpos técnicos por las sucesiones de gobierno.



Figura 13. Fotografía del Relleno Sanitario Prados de la Montaña, operación de los dos socavones, Ciudad de México, marzo 1992.

Fuente: fotografía cortesía de la DGSU

Como parte del programa, se clausuran los vertederos de Naucalpan, Atizapán y Nezahualcóyotl en el Estado de México. La operación de los sitios de disposición final del Departamento del Distrito Federal se llevó a cabo con la transición de estatus de sitios no controlados a sitios controlados y posteriormente a rellenos sanitarios. El sitio de disposición final de Santa Catarina pasó de ser no controlado a controlado, y así permaneció hasta su cierre en 2001. Con la apertura y puesta en marcha del sitio de disposición final “Prados de la Montaña” se consiguió alcanzar el objetivo de cerrar el vertedero de Santa Fe (Alameda Poniente).



Figura 14. Fotografía del Relleno Sanitario Prados de la Montaña en proceso de clausura, Ciudad de México, noviembre 1994

Fuente: fotografía cortesía de la DGSU

La clausura de Prados de la Montaña se realiza en 1994, con este hecho se finaliza la etapa iniciada en 1986. Este sitio fue clausurado con criterios muy distintos a los demás, dado que el proceso fue realizado bajo la normativa de la EPA California, esto por condicionante de los inversionistas del polo de desarrollo inmobiliario ZEDEC Santa Fe (Zona Especializada de Desarrollo Económico Santa Fe). Para el año 2001 con el cierre de Santa Catarina la capital del país contó solo con el relleno sanitario de Bordo Poniente IV Etapa como sitio de disposición final, el cual se clausuró el 19 de diciembre del año 2011.



Figura 15. Fotografía del Relleno Sanitario Prados de la Montaña, Clausurado, Ciudad de México, marzo 2020

Fuente: fotografía propia

En el año 2007, otra clausura importante de un sitio no controlado fue la del vertedero Neza 1, ubicado en el Estado de México, dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México, con un área de 138 hectáreas, el cual recibía más de 1,500 t/día de residuos sólidos urbanos (RSU). Este fue saneado y se construyó el complejo Ciudad Jardín Bicentenario.

Como parte de la revisión de los antecedentes se concluye que desde el año 1531, cuando se dio la apertura de los primeros sitios de disposición final para los residuos, que en su gran mayoría eran de origen orgánico, los sitios no controlados han fungido como el principal sistema de disposición de residuos, tanto a nivel de la Zona Metropolitana del Valle de México como a nivel nacional. Sin embargo, hoy día ya se cuenta con sistemas de disposición final de residuos sólidos bajo cumplimiento de la normativa técnica y ambiental vigente, como el sistema de rellenos sanitarios, realidad que refleja cierta evolución de la problemática actual que, aunque lenta, ha demostrado viabilidad de implementación más de una vez.

Como se describe en los antecedentes, los sitios de disposición final que tenía el Gobierno de la Ciudad de México, operados bajo el sistema de vertedero (tiradero) a cielo abierto, fueron regulados y clausurados en el periodo comprendido entre 1986 y 1994, siendo la clausura de Prados de la Montaña

el ejemplo de uno de los proyectos más representativos hasta la fecha. Es así como a lo largo de 500 años, tanto la Capital del país como algunos estados de la República Mexicana, se han ocupado de aplicar una mejora a sus sistemas de disposición final de residuos sólidos, implementando el sistema de relleno sanitario. Sin embargo, todavía en algunas entidades continúa prevaleciendo el sistema de vertedero a cielo abierto, problemática particular que ha motivado la realización de este trabajo en aras de proponer un sistema de clausura ambiental para todos los sitios no controlados.

2. SITUACIÓN ACTUAL (ESTADO DEL ARTE)

La situación actual del manejo de residuos sólidos urbanos (RSU) dentro de los municipios de la zona conurbada del Valle de México, no ha evolucionado mucho desde los años ochenta. En comparación con la Ciudad de México, que clausuró y saneó todos sus sitios no controlados, resaltando Prados de la Montaña en 1994 (DGSU, 1995) como uno de los sitios mejor saneados de México y de América Latina por implementar medidas y normas apegadas a los requerimientos de EPA California. Actualmente, y similar al caso de Prados de la Montaña, es el caso del relleno sanitario Bordo Poniente IV etapa el cual se encuentra en proceso de saneamiento.

La situación del estado del arte en cuanto a sitios no controlados (SNC) es un reflejo de la poca inversión que destinan los municipios al manejo de sus residuos. Tomando en cuenta que la mayor parte de la recolección es realizada por *propineros* y no por un sistema de recolección municipal, además de que ningún municipio de la Zona Metropolitana del Valle de México aplica un cobro a los ciudadanos por el manejo integral de los residuos. Haciendo que todo ese proceso sea visto como un gasto y no una inversión, el panorama pinta realmente desalentador.

Sin embargo, frente a distintas alternativas de reúso o valorización de los residuos que pretenden convertirlos en recurso, la disposición de los mismos sobre el suelo sigue siendo una de las opciones más baratas, esto considerando únicamente el costo económico a corto plazo y dejando de lado el costo ambiental y social, ya que un sitio no controlado no cuenta con estudios de impacto ambiental, ni de capacidad de carga del suelo, y mucho menos de infraestructura (como una capa impermeable que permita la captación y control de lixiviados, un sistema de control de biogás, instalaciones complejas, o preparación técnica especializada para su operación). Es por ello que, a nivel nacional, de América Latina y el Caribe, este tipo de disposición de residuos en sitios no controlados es el método mayormente empleado para la disposición de los residuos sólidos urbanos generados en una comunidad o región, sin importar el daño que generan en el entorno.

Si bien se realizan clausuras de sitios no controlados, estas se llevan a cabo sin ningún estudio de las afectaciones e impactos ambientales, económicos, y antrópicos del sitio, lo que genera un planteamiento poco claro de los impactos negativos de los contaminantes y de los beneficios que los saneamientos traerían consigo, dado que el único objetivo es cumplir con las recomendaciones que hace la autoridad competente sin una visión de

mantenimiento y con un cumplimiento mínimo establecido en la normatividad. De todo ello, el factor más preocupante es el del recurso tiempo, dado que los municipios conciben la necesidad de reglamentar los sitios como un gasto, y no como una inversión, y, por lo tanto, los costos de saneamiento de aquellos sitios desatendidos se irán incrementando cada año.

Se debe seguir y replicar el ejemplo de aquellas clausuras realizadas exitosamente en los sitios no controlados de México y América Latina, como sucedió con los sitios Prados de la Montaña, o Santa Catarina, ambos ubicados en los límites de la CDMX y el Estado de México, donde en este último se realizaron obras de perforación horizontal de drenes para captación de lixiviado para evitar deslizamientos. Otro ejemplo de sitios que han quedado inmersos en el tejido urbano es el vertedero Macul, en Chile, que es utilizado como estacionamiento; caso similar al de Ciudad Jardín Bicentenario, en el Municipio de Nezahualcóyotl, Estado de México, donde se construyeron universidades, zonas comerciales y zonas deportivas ubicadas en el antiguo vertedero Neza 1.

En Latinoamérica, existen ejemplos de clausura de vertederos exitosas que concluyeron con su reinserción al ambiente como lugares de recreación, parques y campos deportivos, como el parque “La Cañamera” en Santiago de Chile y el Polideportivo “Pérez Perazo” en Quito, Ecuador, mientras que, en Barranquilla, Colombia se cuenta con el parque “Los Ensueños”. En México, se tiene el caso de la Alameda Oriente, con una superficie de 96 hectáreas, ubicada entre la Alcaldía Venustiano Carranza y el Municipio de Nezahualcóyotl, del cual ya se habló con anterioridad.

Se tiene también la experiencia del sitio no controlado de “El Fundo La Gloria” en Limanche, Chile, donde se instaló un sistema de control de emisiones y una cobertura apropiada que dio lugar a que el sitio ahora sea utilizado como lugar para cultivo agrícola.

Otros casos exitosos de adecuación de los terrenos donde antes fungieron como vertederos y que fueron clausurados y saneados, dando una alternativa con la colocación de las coberturas con paneles fotovoltaicos o con instalación de generadores de energía eólicos como es el caso de Frey Hill, en Pensilvania, donde fueron instaladas dos turbinas de 1.6 MW (Trotti 2011)

CAPÍTULO III

1. MARCO TEÓRICO

“Los sitios no controlados, ubicados en países emergentes o en vías de desarrollo, son considerados como zonas altamente contaminantes. Estos sitios reciben aproximadamente el 40% de los residuos generados en todo el mundo. Los sitios no controlados representarán entre el 8% y el 10% de la generación de los gases de efecto invernadero (GEI) para el año 2025” (ISWA, 2018).

Un sitio no controlado es el lugar donde se depositan residuos sólidos urbanos (RSU) de manera irregular y sin ningún control, ya que estos sitios no cuentan con ninguna infraestructura, o ésta resulta apenas mínima, para mitigar los impactos ambientales generados, carecen de una barrera impermeable para limitar la infiltración de lixiviados y no cuentan con ningún grado de conformación y compactación de los residuos.

Según la NOM-083-SEMARNAT-2003, un sitio controlado es un sitio inadecuado de disposición final que cumple con las especificaciones de un relleno sanitario en lo que se refiere a obras de infraestructura y operación, pero no con las especificaciones de impermeabilización. Mientras que un sitio no controlado incumple los requisitos establecidos en dicha Norma. (DOF-NOM-083-SEMARNAT-2003)

Se tiene el dato de que en México hay un aproximado de 5,000 sitios no controlados, es decir, el 87% de los sitios de disposición final (SDF) de residuos sólidos son a cielo abierto, y sólo 13% son rellenos sanitarios, según datos del Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI, 2019).

En la Zona Metropolitana del Valle de México conformada por la Ciudad de México con sus 16 Alcaldías, 59 municipios del Estado de México y el municipio de Tizayuca perteneciente al Estado de Hidalgo, la superficie que abarcan tanto los sitios controlados (SC) y los sitios no controlados (SNC) por entidad, según datos del INEGI, 2013, es de un área total de 46.9 ha y 51.1 ha respectivamente, Teniendo en el Estado de México una ocupación de 19.3 hectáreas por sitios no controlados (SNC), mientras que el Estado de Hidalgo se tiene únicamente un sitio en el municipio de Tizayuca con una superficie de 1.8 hectáreas. La distribución de superficies abarcadas por los SDF en los distintos municipios de la ZMVM se encuentra en la Tabla 3.

Tabla 3. Área en hectáreas (ha) abarcada por los sitios de disposición final (SDF) controlados (SC) y no controlados (SNC) en la ZMVM

No.	Delegación o municipio	Superficie de los sitios controlados (hectáreas)	Superficie de los sitios no controlados (hectáreas)
Zona Metropolitana del Valle de México		46.9	51.1
Municipio conurbado del Estado de Hidalgo			1.8
1	Tizayuca		1.8
Municipios conurbados del Estado de México		46.9	49.3
2	Acolman	1.2	
3	Apaxco	4	
4	Atizapán de Zaragoza	20	
5	Atlautla		0.5
6	Chicoloapan	1.5	
7	Cocotitlán		1.4
8	Huehuetoca		2
9	Hueypoxtla		2
10	Jaltenco		0.5
11	Nopaltepec	0.5	
12	Nezahualcóyotl		30
13	Ozumba		1.3
14	Papalotla	0.5	
15	San Martín de las Pirámides		1.6
16	Temamatla		1
17	Temascalapa		1.5
18	Teotihuacán	2.2	
19	Tepetlaoxtoc		1
20	Tepetlixpa		1.5
21	Tequixquiac		2
22	Tlalmanalco		2
23	Tultepec	3	
24	Tultitlán	14	
25	Villa del Carbón		1

Fuente: elaboración propia basada en información del cuaderno estadístico de la ZMVM, INEGI, 2013

1.1. IMPACTOS AL AMBIENTE GENERADOS POR VERTEDEROS A CIELO ABIERTO O SITIOS NO CONTROLADOS

Los vertederos a cielo abierto o sitios no controlados provocan impactos al ambiente como:

- Afectación de la calidad del suelo por el arrastre de metales pesados como plomo y mercurio, entre otros, que pueden estar contenidos en la fracción inorgánica de los residuos sólidos urbanos (FIRSU).
- Contaminación del agua subterránea y superficial con los lixiviados que se producen por la percolación del agua de lluvia y por el efecto de la biodegradación de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), incrementando su carga contaminante con la dilución de compuestos inorgánicos.
- Destrucción de las zonas de vegetación y afectación en el hábitat de las especies animales, por la falta de planificación y previsión ambiental.
- Afectación a la calidad del aire con la emanación de biogás, compuesto principalmente de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) que son gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global del planeta.
- Emisión de partículas volátiles o dispersión de polvo por efecto del aire y tránsito de vehículos.

1.2. IMPACTOS A LA SALUD GENERADOS POR VERTEDEROS A CIELO ABIERTO O SITIOS NO CONTROLADOS

El manejo inadecuado de los residuos sólidos genera impactos significativamente negativos para la salud humana. Los residuos son una fuente de transmisión de enfermedades, ya sea por vía hídrica, por los alimentos contaminados, o por fauna nociva, como moscas y otros vectores. El propio manejo inadecuado de los residuos puede crear condiciones en los hogares, que aumentan la susceptibilidad a contraer enfermedades.

La disposición final de residuos en un sitio no controlado constituye una amenaza para la salud pública, principalmente por la proliferación de fauna nociva, y es común la presencia de animales que se alimentan con los residuos

allí depositados. Tomando en cuenta la presencia de segregadores (pepenadores), quienes son los más propensos a sufrir algún ataque como mordeduras y contraer alguna enfermedad.

El polvo transportado por el viento desde un sitio no controlado puede portar patógenos y materiales peligrosos. En estos sitios, durante la biodegradación o quema de la materia orgánica se generan gases orgánicos volátiles, tóxicos y algunos potencialmente carcinógenos (por ejemplo, bencina y cloruro vinílico), así como subproductos típicos de la biodegradación (metano, sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono).

El humo generado de la quema de residuos en sitios no controlados constituye un importante irritante respiratorio e influye en que las poblaciones expuestas sean mucho más susceptibles a las enfermedades respiratorias debido al monóxido de carbono que se libera.

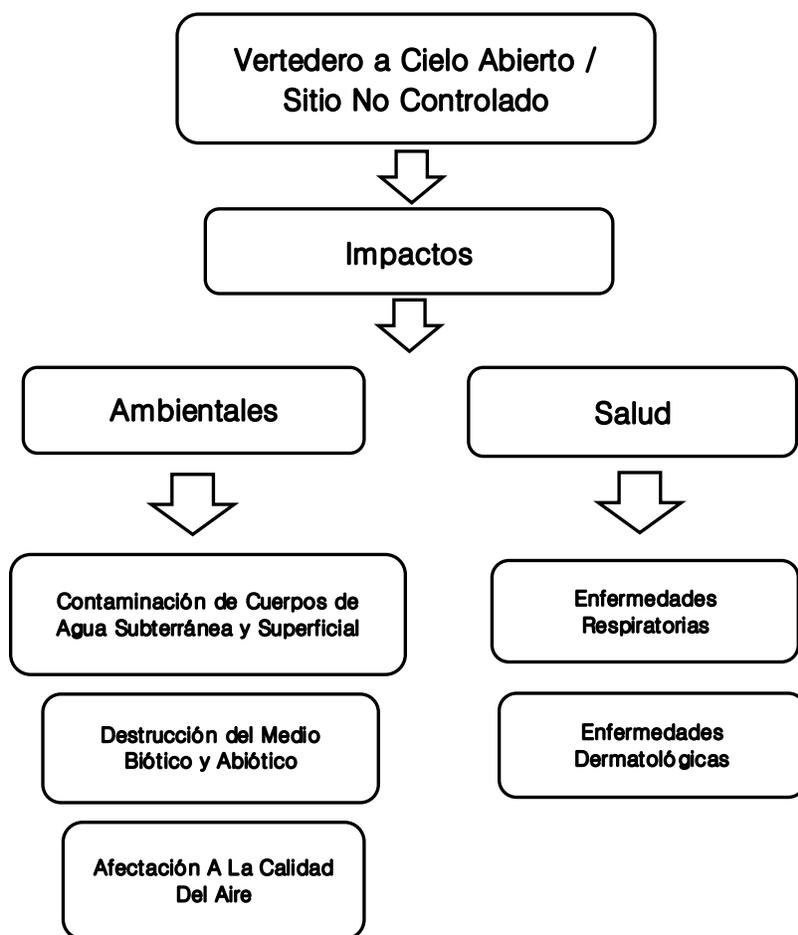


Figura 16. Diagrama de flujo de los Impactos generados por los VCA o SNC

Fuente: elaboración propia

2. IMPACTOS SOBRE EL MEDIOAMBIENTE

2.1. CONTAMINACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

La disposición final de residuos sólidos en sitios sin preparación ni infraestructura adecuada pueden contaminar las aguas superficiales o subterráneas usadas para el abastecimiento público. En forma indirecta, la escorrentía y lixiviados provenientes de los sitios no controlados de residuos sin tratamiento, incorpora tanto a las aguas superficiales, como a los acuíferos, los principales contaminantes, caracterizados por tener altas concentraciones de materia orgánica y sustancias tóxicas. La contaminación de los cuerpos de agua puede significar la pérdida del recurso para consumo humano o recreación, ocasionar la pérdida de fauna y el deterioro ambiental. Estos factores y las respectivas medidas de mitigación deben ser considerados en un plan de manejo eficiente de los residuos sólidos. En caso de depositar los residuos a cielo abierto en manglares, la contaminación hídrica puede ocasionar su deterioro.

2.2. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Los principales impactos asociados a la contaminación atmosférica es la emanación de olores molestos en las proximidades de los sitios de disposición final (SDF) y la generación de gases asociados a la digestión bacteriana de la materia orgánica, y a la quema de residuos.

Es común que los sitios no controlados carezcan de un sistema de control de biogás, lo que genera la liberación de los gases que lo conforman como el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), nitrógeno (N), sulfuro de hidrogeno (H_2S), que son gases que aumentan el deterioro de la capa de ozono.

2.3. CONTAMINACIÓN DEL SUELO

La descarga y acumulación de residuos al aire libre en sitios no controlados producen impactos negativos, malos olores y polvos, aunados al impacto visual o condición estética de la zona.

El depósito de residuos en sitios no controlados provoca la contaminación del suelo con microorganismos patógenos, metales pesados, sustancias tóxicas e hidrocarburos clorados que están presentes en la generación de los lixiviados de los residuos.

La contaminación del suelo se presenta de distinta forma y en concentraciones diferentes en cada zona, dado el tipo de suelo de la zona y la permeabilidad del mismo, ya que si se tiene un suelo con baja permeabilidad el lixiviado escurre hasta zonas donde la permeabilidad del suelo sea alta y se infiltre, en ambos casos dañando y contaminando cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

2.4. AMENAZAS A LA FLORA Y FAUNA

Los impactos ambientales directos sobre la flora y fauna se encuentran asociados, en general, a la remoción de especímenes de la flora y a la perturbación de la fauna nativa durante la fase de disposición de residuos, ya que al ser un sitio irregular no cuenta con un estudio de impacto ambiental previo, dado que carece de las etapas que conlleva un proyecto, por lo que este tipo de sitios no controlados (SNC) o vertederos a cielo abierto (VCA) operan sin medidas de mitigación y remediación a la flora y fauna.

Aunado a lo anterior las amenazas, y deterioro a la flora y fauna persisten en la etapa de operación o de vertido de residuos, en la cual los VCA o SNC tienen una operación inadecuada de los residuos.

2.5. ALTERACIONES DEL MEDIO ANTRÓPICO

El aspecto sociocultural tiene un papel crítico en el manejo de los residuos. Uno de los principales problemas es la falta de conciencia colectiva y/o conductas sanitarias por parte de la población para disponer sus residuos, dejándolos abandonados en cualquier lugar como en calles, áreas verdes, márgenes de los ríos, playas, barrancas, entre otros, deteriorando las condiciones del paisaje y el medioambiente.

2.6. INCENDIOS

La quema al aire libre de residuos sólidos es uno de los factores que genera impactos al ambiente, y daños a la salud humana que pueden provocar y acentuar enfermedades respiratorias agudas (IRA) como bronquitis y enfisemas. Tanto los impactos al ambiente como los daños a la salud se agudizan debido a la composición heterogénea de residuos con un contenido alto de residuos plásticos, ya que se generan gases y material particulado, tales como furanos, dioxinas y derivados organoclorados.

Los incendios en los sitios de disposición final se presentan en forma de combustión sorda, esto significa que se desarrolla al interior de los residuos por debajo de la superficie y no habrá presencia de flama, sino hasta que haya entrada de oxígeno y se forme el triángulo de fuego. Para controlar y extinguir el incendio se debe romper uno de los componentes del triángulo de fuego, que pueden ser combustible, temperatura u oxígeno.

Los incendios en sitios de disposición final pueden ser provocados por varios factores tales como, el efecto lupa, cenizas calientes, aerosoles, materiales explosivos, reacciones químicas o de manera intencional.

En los sitios no controlados o vertederos a cielo abierto es común realizar la práctica de quema de los residuos, con el objeto de reducir los volúmenes y aprovechar nuevamente el espacio.

Con base a la *Guía Para El Control De Incendios En Vertederos De Residuos Sólidos (sic)*, publicado por el CENAPRED en marzo de 2021, se hace una categorización de incendios con base a la clasificación de la *International Solid Waste Association* (ISWA), de la siguiente manera:

- Nivel 1: incendios pequeños de residuos que pueden dominarse con recursos propios del sitio dentro de las 24 horas iniciales y extinguirse por completo en 48 horas.
- Nivel 2: aquellos que, en términos generales, involucran cantidades menores a 200 m³ de material. Pueden durar hasta una semana.
- Nivel 3: incendios que pueden prolongarse hasta por dos semanas. Intervienen cantidades de materiales que varían entre 200 y 500 m³.
- Nivel 4: incendios grandes o que se asientan profundamente en los vertederos. Su control requiere de más de dos semanas. Se combustionan cantidades de materiales que generalmente rebasan 5000 m³.

Para el control de los incendios en los sitios de disposición final, se recomienda evitar el uso de agua, para obstaculizar suministro de oxígeno que se genere con el proceso de evaporación del agua y con ello la reactivación del incendio. Por lo que para controlar y extinguir el incendio se recomienda el uso material terreo y maquinaria (bulldozer).

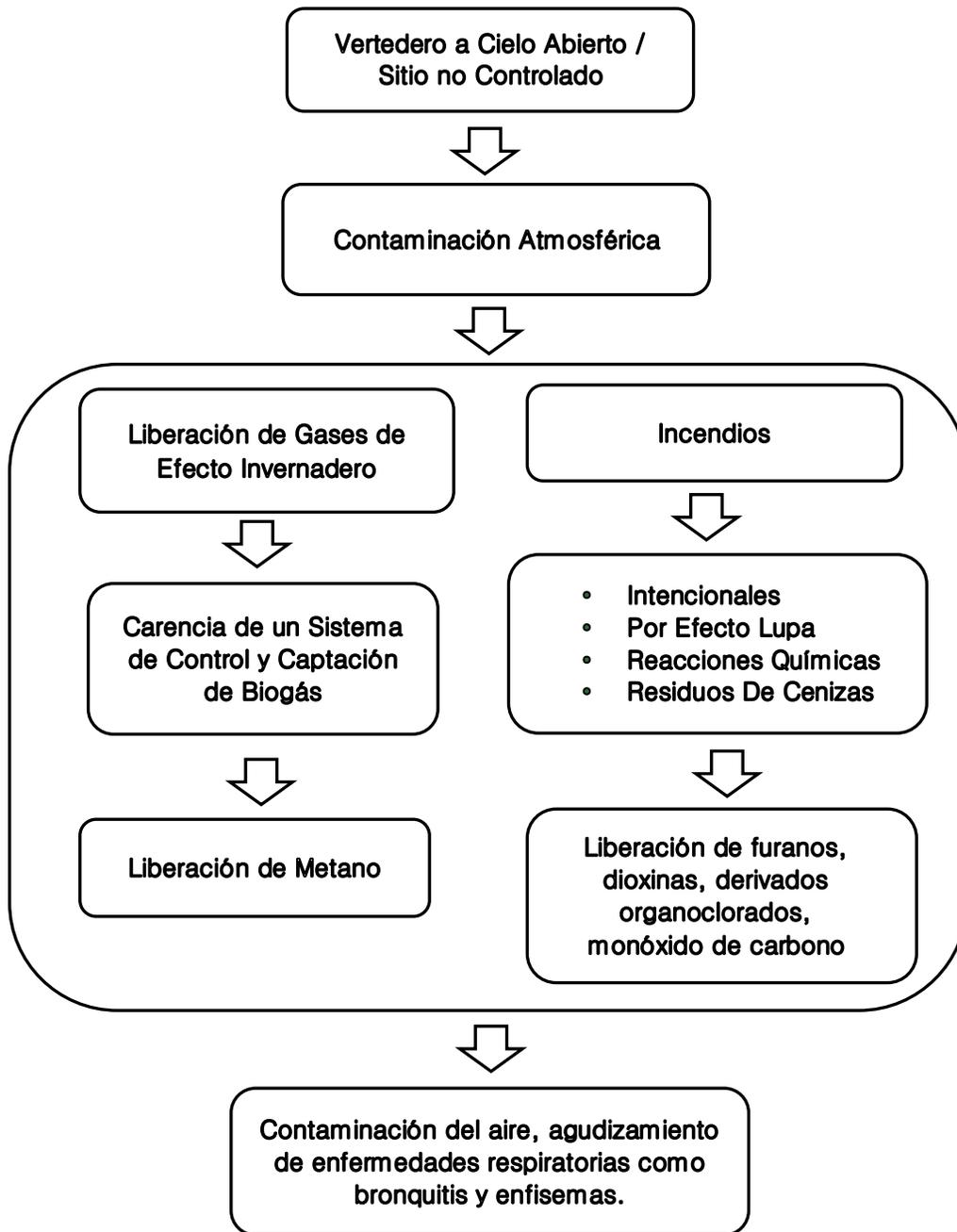


Figura 17. Diagrama de flujo de contaminación atmosférica provocada por los VCA o SNC

Fuente: elaboración propia

2.7. RIESGOS

Los sitios de disposición final representan una serie de riesgos, sean estos sitios controlados o no controlados. Estos riesgos pueden presentarse de manera natural o de manera antropogénica, sin embargo, deben ser prevenidos para evitar accidentes. Los riesgos identificados que pueden estar presentes en un sitio de disposición final son agudos, crónicos, biológicos, naturales y humanos; con base en estos se deben tomar acciones para su mitigación y prevención, de modo tal que el sitio de disposición final no se convierta en un peligro para las zonas urbanas aledañas o para los propios trabajadores que laboran en las instalaciones.

Cabe señalar que en los sitios no controlados como lo son los vertederos o tiraderos a cielo abierto, existe mayor probabilidad de riesgo, dado que los residuos, al estar sin conformación, generan un mayor número de contaminantes, así como también son un vector para la proliferación de la fauna nociva, un foco de infecciones que representan daños a la salud para las comunidades que habitan en estas zonas o para los pepenadores que laboran en los sitios. En la Figura 18 se muestran los riesgos generados por una mala operación dentro de los sitios de disposición final.

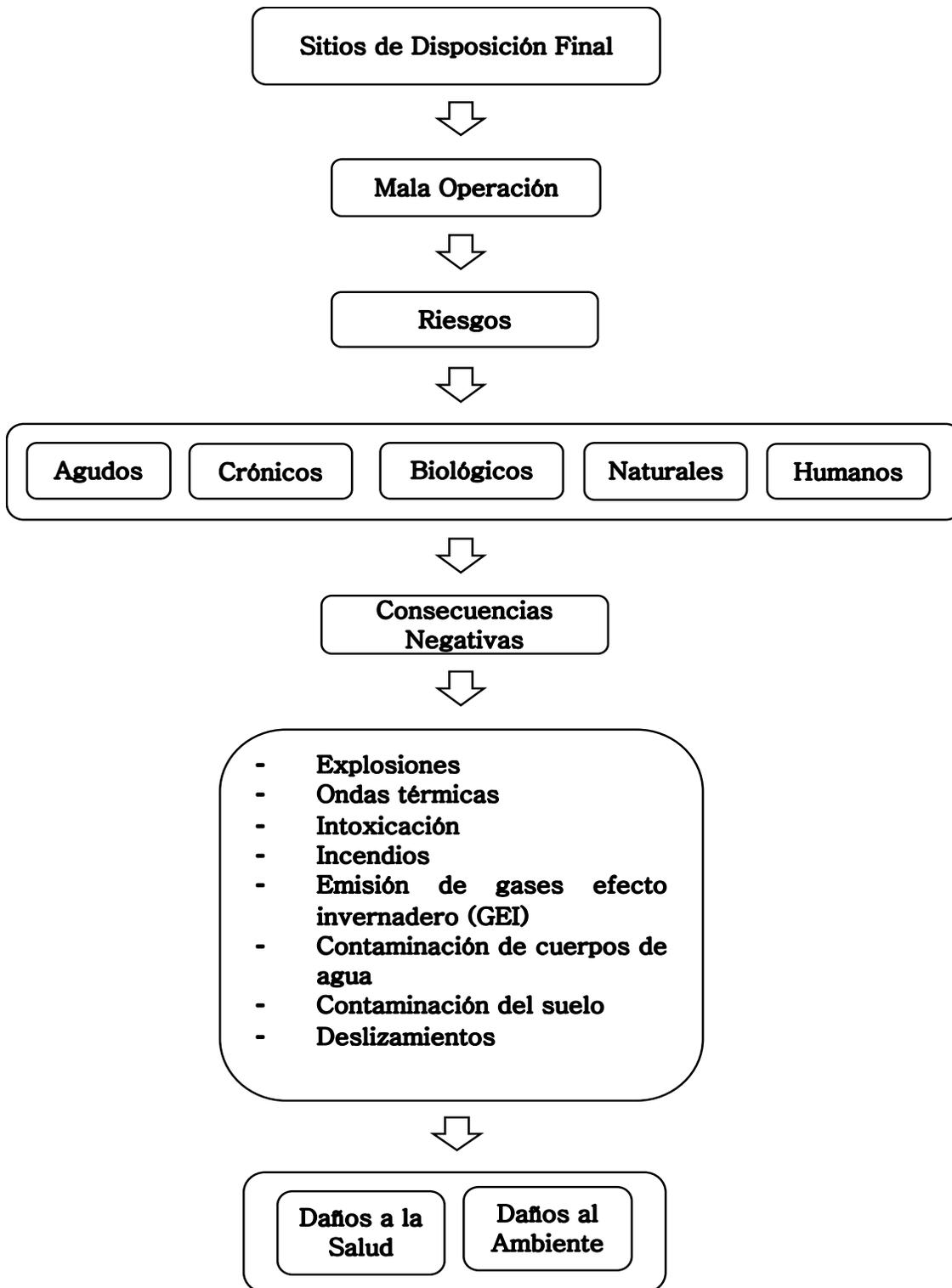


Figura 18. Diagrama de flujo de riesgos y consecuencias presentes en sitios de disposición final con una mala operación

Fuente: elaboración propia

Una vez identificados los riesgos que hay en un sitio de disposición final y concluyendo que estos incurren en el aumento de consecuencias negativas, como accidentes que pueden ser ocasionados por motivos de una mala elección del sitio para disponer los residuos o hasta una mala operación del sitio de disposición final. En este sentido, se consiguió la elaboración de la Tabla 4, que hace una clasificación por tipo de riesgo, generadores identificados y las consecuencias que estos conllevan.

Tabla 4. Clasificación de tipo de riesgo, causas generadoras y consecuencias que generan en sitios de disposición final

Riesgos y Consecuencias En Sitios De Disposición Final		
Tipo de Riesgo	Generador	Consecuencias
Riesgos Agudos	<ul style="list-style-type: none"> - Combustibles - Biogás - Aceites y lubricantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Explosiones - Ondas térmicas - Intoxicación - Daños al medio biótico - Daños al medio abiótico
Riesgos Crónicos	<ul style="list-style-type: none"> - Lixiviado - Biogás - Emisiones de CO₂ - Generación de polvo 	<ul style="list-style-type: none"> - Incendios - Daños a la salud - Emisión de gases efecto invernadero (GEI) - Contaminación de cuerpos de agua - Contaminación del suelo
Riesgos Biológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Fauna nociva - Contaminantes aerobiológicos - Generación de malos olores 	<ul style="list-style-type: none"> - Daños a la salud - Daños a las cadenas tróficas - Generación de partículas PM10 y PM2.5
Riesgos Naturales	<ul style="list-style-type: none"> - Sismos - Lluvias extremas - Nevadas - Incendios externos - Vientos extremos - Tornados 	<ul style="list-style-type: none"> - Deslizamientos - Inundación del sitio - Alta generación de lixiviados - Tolváneras - Licuefacción de material de cobertura
Riesgos Humanos	<ul style="list-style-type: none"> - Mala selección del sitio para construir el sitio de disposición final - Mala operación del sitio - Carencia de estudios 	<ul style="list-style-type: none"> - Deslizamientos - Licuefacción de material de cobertura - Alta generación de lixiviados - Liberación de biogás - Incendios - Explosiones

	<ul style="list-style-type: none"> - Uso indebido de maquinaria - Presencia de pepenadores - Generación de fauna nociva - Falta de implementación de protocolos - Carencia de equipo de protección - Personal inadecuado - Nula capacitación al personal 	<ul style="list-style-type: none"> - Daños a la salud - Pérdida de vidas humanas
--	---	--

Fuente: elaboración propia

2.8. REHABILITACIÓN, SANEAMIENTO Y CLAUSURA DE VERTEDEROS A CIELO ABIERTO O SITIOS NO CONTROLADOS

Antes de rehabilitar, clausurar y/o sanear un sitio de disposición inadecuada (vertedero a cielo abierto o sitio no controlado), se debe tener un buen diagnóstico del sitio en lo referente a capacidad del sitio, características del suelo, características de los residuos depositados, riesgos potenciales y posibles emisiones al ambiente. Una vez teniendo este diagnóstico se podrá determinar la acción a implementar en el sitio, y la elaboración del proyecto de rehabilitación, saneamiento o clausura.

2.8.1. REHABILITACIÓN

La rehabilitación de los sitios no controlados (SNC) se realiza cuando se quiere transitar de un sistema de sitio no controlado (SNC) o vertedero a cielo abierto (VCA), a un sitio controlado. Teniendo como finalidad disminuir y mitigar riesgos e impactos al ambiente, mejorando las condiciones del sitio y su operación bajo un esquema controlado. Ayudando a recuperar la capacidad del sitio de disposición final para continuar con el confinamiento de residuos sólidos urbanos, siempre y cuando se cumpla con un mínimo de requisitos en cuanto a la capacidad volumétrica, forma de operación, mecanismos de control, protección al ambiente y a la salud pública.

Esta etapa de transición se puede realizar haciendo el saneamiento a la celda o zona de recepción de residuos del vertedero a cielo abierto (VCA) y a la par iniciar la preparación de una nueva celda con las características mínimas para que se considere sitio controlado (SC) o relleno sanitario (RS).

Para la rehabilitación de los sitios no controlados (SNC) es limitado el aplicar todas las medidas de infraestructura necesaria de un relleno sanitario, especialmente la impermeabilización por debajo de los residuos y materiales ya depositados, ya que esto sería muy costoso.

Al hablar de movimiento de residuos sólidos se define como el empuje y la conformación de los residuos sólidos urbanos (RSU) que se encuentran esparcidos sobre el terreno, en el área destinada para la conformación de la celda, de manera que se aproveche de mejor manera el terreno disponible.

Frecuentemente es necesario estabilizar el vertedero a cielo abierto, ya que presenta una estructura inestable (sin bermas ni taludes) y con un grado mínimo de compactación en los residuos, o porque el vertedero se fue creando a lo

largo de una pendiente. Es por ello que en el proceso de estabilización las pendientes óptimas que se recomiendan no deben pasar de una relación de 3:1 (horizontal-vertical).

2.8.2. SANEAMIENTO AMBIENTAL

El saneamiento ambiental es el conjunto de acciones de remediación y reparación tendientes a devolver, mediante el control ambiental, las características naturales al sitio utilizado como sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU) una vez que este se ha clausurado; de manera tal que esté en armonía con el entorno y deje de ser un potencial de riesgos a la salud de la población y contaminación al ambiente.

El saneamiento ambiental de los sitios que se encuentran en operación y los cuales han llegado a los límites de vida útil o que están en situaciones inadecuadas para rehabilitarlos y continuar con la operación, constituye el último paso del ciclo de vida de operación de los sitios de disposición final (SDF). Sin embargo, esta etapa es la que representa el inicio de los aspectos de monitoreo, mantenimiento y control, los cuales son fundamentales para garantizar las medidas sanitarias básicas y de conservación a largo plazo.

2.8.3. CLAUSURA

Es la etapa correspondiente al cierre definitivo de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos al término de su vida útil, cumpliendo con los requisitos mínimos para procurar la estabilidad, monitoreo sanitario y ambiental a largo plazo.

Las entidades gubernamentales deben ser consideradas en la elaboración y autorización de un proyecto de rehabilitación, clausura y/o saneamiento de vertederos. Además, se recomienda involucrar a todos los grupos sociales en este proceso, para tener en cuenta la información particular de cada sector en las necesidades y procedimientos a los que debe darse seguimiento.

En la Figura 19, se muestra el proceso de saneamiento ambiental, rehabilitación, y clausura de un sitio no controlado.

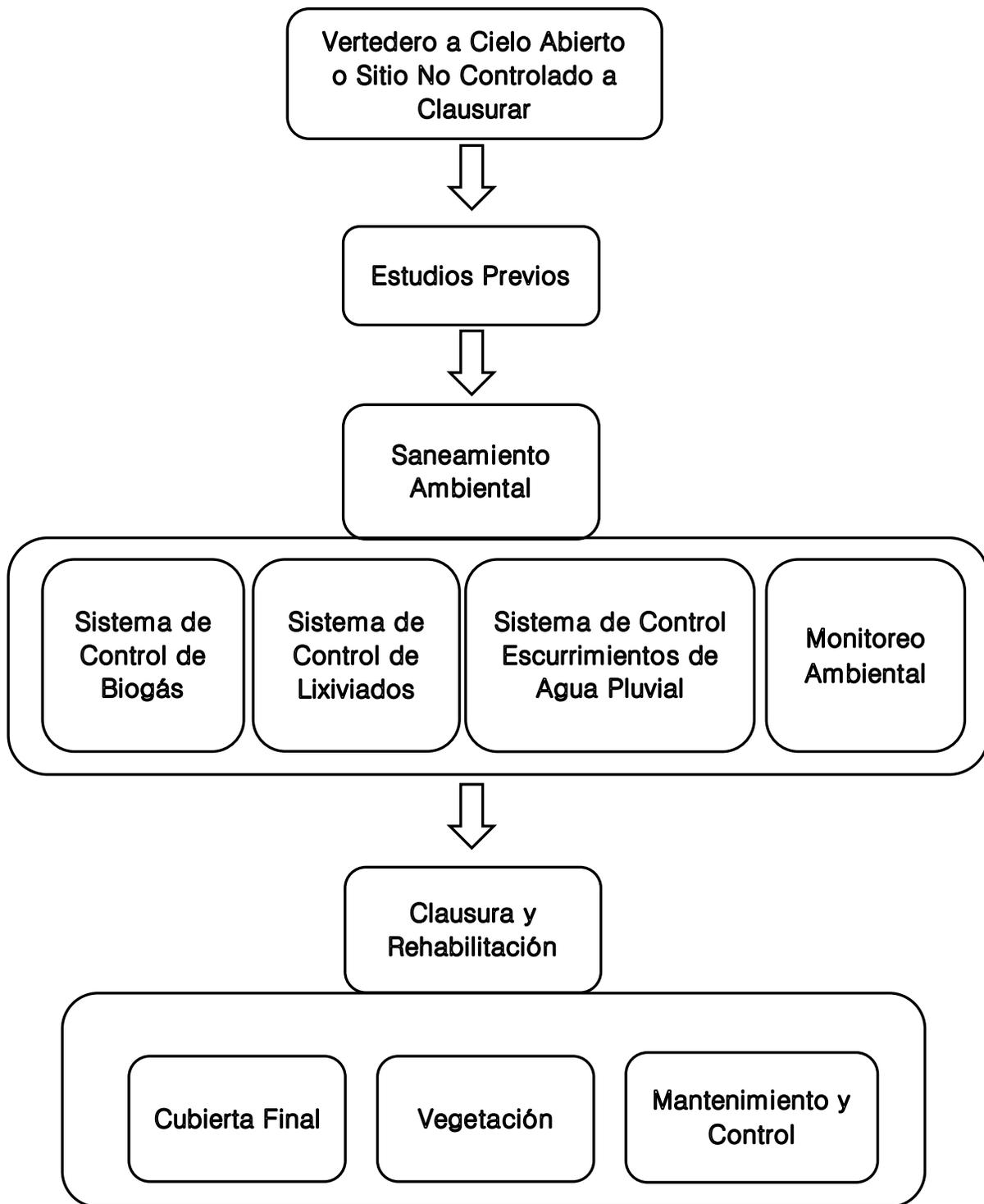


Figura 19. Diagrama de flujo del proceso de saneamiento ambiental, rehabilitación, y clausura de un vertedero a cielo abierto o sitio no controlado

Fuente: elaboración propia adaptado del artículo Cierre, sellado y reinsertión de antiguos vertederos. Experiencias en Iberoamérica.

CAPÍTULO IV

¿Leyes? Los mexicanos siempre hemos sido excelentes legisladores, pero hemos sido históricamente incapaces de ejecutar las leyes que hemos promulgado.

Martín, M. 2012. México Sedito, pp. 213

1. MARCO LEGAL

Dentro de los aspectos jurídicos que corresponden al manejo de residuos se incluyen los aplicables en la generación, recolección, transporte, almacenamiento y disposición final de los residuos sólidos urbanos. Es por ello que es importante en el aspecto legal considerar a la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Ley General de Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente (LGEEPA), la Ley General Para La Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), y como parte normativa, la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 “*Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial*”. Para así estar bajo cumplimiento legal y normativo en los procesos que se le quiera dar a los residuos generados.

1.1. CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

En referente a residuos sólidos urbanos desde su generación hasta su disposición final, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, menciona lo siguiente:

Titulo Quinto “*De los estados de la federación y de la Ciudad de México*”;

Artículo 115, “*Los estados adoptarán, para su régimen interior, la forma de gobierno republicano, representativo, democrático, laico y popular, teniendo como base de su división territorial y de su organización política y administrativa, el municipio libre, conforme a las bases siguientes*”;

[...]

Numeral III “*Los Municipios Tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes:*”

[...]

Inciso C *“Limpia, Recolección, Traslado, tratamiento y disposición final de residuos”*.

1.2. LEY GENERAL DE EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE (LGEEPA)

La Ley General de Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente (LGEEPA), menciona lo siguiente:

Del Título Primero *“Disposiciones Generales”*, Capítulo II *“Distribución de Competencias y Coordinación”*

[...]

Artículo 7o. *“Corresponden a los Estados, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades”*; Numeral VI *“La regulación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos de conformidad con lo dispuesto por el artículo 137 de la presente Ley”*;

[...]

Fracción VII *“La prevención y el control de la contaminación generada por la emisión de ruido, vibraciones, energía térmica, luz intrusa, radiaciones electromagnéticas y olores perjudiciales al equilibrio ecológico o al ambiente, proveniente de fuentes fijas que funcionen como establecimientos industriales, así como, en su caso, de fuentes móviles que conforme a lo establecido en esta Ley no sean de competencia federal”*.

Artículo 8o *“Corresponden a los Municipios, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades”*;

[...]

Fracción IV *“La aplicación de las disposiciones jurídicas relativas a la prevención y control de los efectos sobre el ambiente ocasionados por la generación, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos, de conformidad con lo dispuesto por el artículo 137 de la presente Ley”*.

Del Título Cuarto *“Protección al Ambiente”*, Capítulo I *“Disposiciones Generales”*

Artículo 109 BIS *“La Secretaría, las entidades federativas, los Municipios y las demarcaciones territoriales de la Ciudad de México, deberán integrar un registro de emisiones y transferencia de contaminantes al aire, agua, suelo y subsuelo, materiales y residuos de su competencia, así como de aquellas sustancias que determine la autoridad correspondiente. La información del registro se integrará con los datos y documentos contenidos en las autorizaciones, cédulas, informes, reportes, licencias, permisos y concesiones que en materia ambiental se tramiten ante la Secretaría, o autoridad competente del Gobierno de las entidades federativas y en su caso, de los Municipios y las demarcaciones territoriales de la Ciudad de México”*.

Del Título Cuarto *“Protección al Ambiente”*, Capítulo II *“Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera”*

Artículo 110 *“Para la protección a la atmósfera se considerarán los siguientes criterios:”*;

[...]

Fracción II *“Las emisiones de contaminantes de la atmósfera, sean de fuentes artificiales o naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas y controladas, para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico”*.

Del Título Cuarto *“Protección al Ambiente”*, Capítulo III *“Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos”*;

[...]

Artículo 120 *“Para evitar la contaminación del agua, quedan sujetos a regulación federal o local”*;

[...]

Fracción IV *“Las descargas de desechos, sustancias o residuos generados en las actividades de extracción de recursos no renovables”*;

[...]

Fracción VII *“El vertimiento de residuos sólidos, materiales peligrosos y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, en cuerpos y corrientes de agua”.*

Del Capítulo IV *“Prevención y Control de la Contaminación del Suelo”*

Artículo 134 *“Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios”;*

Fracción I *“Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo”;*

Fracción II *“Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos”;*

Fracción III *“Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reúso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes”;*

[...]

Fracción V *“En los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable”.*

Artículo 135 *“Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se consideran, en los siguientes casos”;*

[...]

Fracción II *“La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios”;*

Fracción III *“La generación, manejo y disposición final de residuos sólidos, industriales y peligrosos, así como en las autorizaciones y permisos que al efecto se otorguen”.*

Artículo 136 *“Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar”;*

Fracción I *“La contaminación del suelo”*;

Fracción II *“Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos”*;

Fracción III *“Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación”*; Fracción IV *“Riesgos y problemas de salud”*.

Artículo 137 *“Queda sujeto a la autorización de los Municipios o de la Ciudad de México, conforme a sus leyes locales en la materia y a las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reúso, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales”*. *“La Secretaría expedirá las normas a que deberán sujetarse los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de residuos sólidos municipales”*.

Artículo 138 *“La Secretaría promoverá la celebración de acuerdos de coordinación y asesoría con los gobiernos estatales y municipales para”*;

Fracción I *“La implantación y mejoramiento de sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales”*;

Fracción II *“La identificación de alternativas de reutilización y disposición final de residuos sólidos municipales, incluyendo la elaboración de inventarios de los mismos y sus fuentes generadoras”*.

Artículo 139 *“Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría”*.

Artículo 140. *“La generación, manejo y disposición final de los residuos de lenta degradación deberá sujetarse a lo que se establezca en las normas oficiales mexicanas que al respecto expida la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Economía”*.

[...]

Artículo 142 *“En ningún caso podrá autorizarse la importación de residuos para su derrame, depósito, confinamiento, almacenamiento, incineración o*

cualquier tratamiento para su destrucción o disposición final en el territorio nacional o en las zonas en las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Las autorizaciones para el tránsito por el territorio nacional de residuos no peligrosos con destino a otra Nación sólo podrán otorgarse cuando exista previo consentimiento de ésta”.

1.3. LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS (LGPGIR)

La Ley General Para La Prevención Y Gestión Integral De Los Residuos (LGPGIR), menciona lo siguiente:

Título primero “*Disposiciones Generales*”; Capítulo Único “*Objeto Y Ámbito De Aplicación De La Ley*”

Artículo 1 “*La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, en el territorio nacional. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación, así como establecer las bases para:*”

[...]

Fracción IX “*Crear un sistema de información relativa a la generación y gestión integral de los residuos peligrosos, sólidos urbanos y de manejo especial, así como de sitios contaminados y remediados*”;

Fracción X “*Prevenir la contaminación de sitios por el manejo de materiales y residuos, así como definir los criterios a los que se sujetará su remediación*”

[...]

Artículo 2 “*En la formulación y conducción de la política en materia de prevención, valorización y gestión integral de los residuos a que se refiere esta Ley, la expedición de disposiciones jurídicas y la emisión de actos que de ella*

deriven, así como en la generación y manejo integral de residuos, según corresponda, se observarán los siguientes principios:";

[...]

Fracción II *"Sujetar las actividades relacionadas con la generación y manejo integral de los residuos a las modalidades que dicte el orden e interés público para el logro del desarrollo nacional sustentable";*

Fracción III *"La prevención y minimización de la generación de los residuos, de su liberación al ambiente, y su transferencia de un medio a otro, así como su manejo integral para evitar riesgos a la salud y daños a los ecosistemas;*

Fracción IV *"Corresponde a quien genere residuos, la asunción de los costos derivados del manejo integral de los mismos y, en su caso, de la reparación de los daños";*

[...]

Fracción VII *"El acceso público a la información, la educación ambiental y la capacitación, para lograr la prevención de la generación y el manejo sustentable de los residuos";*

Fracción VIII *"La disposición final de residuos limitada sólo a aquellos cuya valorización o tratamiento no sea económicamente viable, tecnológicamente factible y ambientalmente adecuada;*

Fracción IX *"La selección de sitios para la disposición final de residuos de conformidad con las normas oficiales mexicanas y con los programas de ordenamiento ecológico y desarrollo urbano;*

Fracción X *"La realización inmediata de acciones de remediación de los sitios contaminados, para prevenir o reducir los riesgos inminentes a la salud y al ambiente".*

[...]

Artículo 3 *"Se consideran de utilidad pública:";*

Fracción I *"Las medidas necesarias para evitar el deterioro o la destrucción que los elementos naturales puedan sufrir, en perjuicio de la colectividad, por la liberación al ambiente de residuos";*

Fracción II *“La ejecución de obras destinadas a la prevención, conservación, protección del medio ambiente y remediación de sitios contaminados, cuando éstas sean imprescindibles para reducir riesgos a la salud”*;

Fracción IV *“Las acciones de emergencia para contener los riesgos a la salud derivados del manejo de residuos”*.

Título segundo *“Distribución De Competencias Y Coordinación”*; Capítulo Único *“Atribuciones De Los Tres Órdenes De Gobierno Y Coordinación Entre Dependencias”*.

[...]

Artículo 6 *“La Federación, las entidades federativas y los municipios, ejercerán sus atribuciones en materia de prevención de la generación, aprovechamiento, gestión integral de los residuos, de prevención de la contaminación de sitios y su remediación, de conformidad con la distribución de competencias prevista en esta Ley y en otros ordenamientos legales”*.

Artículo 7 *“Son facultades de la Federación:”*;

Fracción I *“Formular, conducir y evaluar la política nacional en materia de residuos así como elaborar el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos de Manejo Especial y el Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados y coordinar su instrumentación con las entidades federativas y municipios, en el marco del Sistema Nacional de Planeación Democrática, establecido en el artículo 25 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”*;

[...]

Fracción IV *“Expedir las normas oficiales mexicanas relativas al desempeño ambiental que deberá prevalecer en el manejo integral de residuos sólidos urbanos y de manejo especial”*;

[...]

Fracción XII *“Promover, en coordinación con los gobiernos de las entidades federativas, de los municipios, de otras dependencias y entidades involucradas, la creación de infraestructura para el manejo integral de los residuos con la*

participación de los inversionistas y representantes de los sectores sociales interesados”;

[...]

Fracción XIV *“Establecer y operar, en el marco del Sistema Nacional de Protección Civil, en coordinación con los gobiernos de las entidades federativas y de los municipios, el sistema para la prevención y control de contingencias y emergencias ambientales relacionadas con la gestión de residuos”;*

[...]

Fracción XXI *“Diseñar y promover mecanismos y acciones voluntarias tendientes a prevenir y minimizar la generación de residuos, así como la contaminación de sitios”;*

Fracción XXII *“Diseñar y promover ante las dependencias competentes el establecimiento y aplicación de incentivos económicos, fiscales, financieros y de mercado, que tengan por objeto favorecer la valorización, la gestión integral y sustentable de los residuos, la remediación de sitios contaminados con estos; así como prevenir o evitar la generación de residuos y la contaminación de sitios por estos”;*

[...]

Fracción XXVI *“Coadyuvar con las entidades federativas para la instrumentación de los programas para la prevención y gestión integral de los residuos, otorgando asistencia técnica”;*

[...]

Fracción XXVIII *“Convocar a entidades federativas y municipios, según corresponda, para el desarrollo de estrategias conjuntas en materia de residuos que permitan la solución de problemas que los afecten”.*

[...]

Artículo 9 *“Son facultades de las Entidades Federativas:”;*

Fracción I *“Formular, conducir y evaluar la política estatal, así como elaborar de manera coordinada con la Federación los programas en materia de residuos*

de manejo especial, acordes al Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos de Manejo Especial y el Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados, en el marco del Sistema Nacional de Planeación Democrática, establecido en el artículo 25 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”;

Fracción II “Expedir conforme a sus respectivas atribuciones, y de acuerdo con las disposiciones de esta Ley, en coordinación con la Federación y de conformidad con el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos de Manejo Especial y el Programa Nacional de Remediación de Sitios Contaminados, los ordenamientos jurídicos que permitan darle cumplimiento conforme a sus circunstancias particulares, en materia de manejo de residuos de manejo especial, así como de prevención de la contaminación de sitios con dichos residuos y su remediación”;

[...]

Fracción VIII “Promover programas municipales de prevención y gestión integral de los residuos de su competencia y de prevención de la contaminación de sitios con tales residuos y su remediación, con la participación activa de las partes interesadas”;

Fracción IX. “Participar en el establecimiento y operación, en el marco del Sistema Nacional de Protección Civil y en coordinación con la Federación, de un sistema para la prevención y control de contingencias y emergencias ambientales derivadas de la gestión de residuos de su competencia”;

Fracción XI “Promover la participación de los sectores privado y social en el diseño e instrumentación de acciones para prevenir la generación de residuos de manejo especial, y llevar a cabo su gestión integral adecuada, así como para la prevención de la contaminación de sitios con estos residuos y su remediación, conforme a los lineamientos de esta Ley y las normas oficiales mexicanas correspondientes”;

Fracción XVI “Diseñar y promover ante las dependencias competentes el establecimiento y aplicación de instrumentos económicos, fiscales, financieros y de mercado, que tengan por objeto prevenir o evitar la generación de residuos, su valorización y su gestión integral y sustentable, así como prevenir la contaminación de sitios por residuos y, en su caso, su remediación”;

[...]

Fracción XVIII *“Someter a consideración de la Secretaría, los programas para el establecimiento de sistemas de gestión integral de residuos de manejo especial y la construcción y operación de rellenos sanitarios, con objeto de recibir asistencia técnica del Gobierno Federal para tal fin”.*

Artículo 10 *“Los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos, que consisten en la recolección, traslado, tratamiento, y su disposición final, conforme a las siguientes facultades”;*

[...]

Fracción III *“Controlar los residuos sólidos urbanos”;*

[...]

Fracción V *“Otorgar las autorizaciones y concesiones de una o más de las actividades que comprende la prestación de los servicios de manejo integral de los residuos sólidos urbanos”;*

[...]

Fracción X *“Coadyuvar en la prevención de la contaminación de sitios con materiales y residuos peligrosos y su remediación”*

[...]

Capítulo III *“Participación Social”*

Artículo 35 *“El Gobierno Federal, los gobiernos de las entidades federativas y los municipios, en la esfera de su competencia, promoverán la participación de todos los sectores de la sociedad en la prevención de la generación, la valorización y gestión integral de residuos, para lo cual”;*

Fracción I *“Fomentarán y apoyarán la conformación, consolidación y operación de grupos intersectoriales interesados en participar en el diseño e instrumentación de políticas y programas correspondientes, así como para prevenir la contaminación de sitios con materiales y residuos y llevar a cabo su remediación”*

[...]

Capítulo IV “Derecho A La Información”

[...]

Artículo 39 *“Los tres órdenes de gobierno elaborarán, actualizarán y difundirán los inventarios de generación de residuos peligrosos, residuos sólidos urbanos y residuos de manejo especial, de acuerdo con sus atribuciones respectivas, para lo cual se basarán en los datos que les sean proporcionados por los generadores y las empresas de servicios de manejo de residuos, conforme a lo dispuesto en la presente Ley y en los ordenamientos jurídicos que de ella deriven. Además, integrarán inventarios de tiraderos de residuos o sitios donde se han abandonado clandestinamente residuos de diferente índole en cada entidad, en los cuales se asienten datos acerca de su ubicación, el origen, características y otros elementos de información que sean útiles a las autoridades, para desarrollar medidas tendientes a evitar o reducir riesgos. La integración de inventarios se sustentará en criterios, métodos y sistemas informáticos, previamente acordados, estandarizados y difundidos”.*

[...]

Título sexto; *“De La Prevención Y Manejo Integral De Residuos Sólidos Urbanos Y De Manejo Especial”*; Capítulo Único.

Artículo 95 *“La regulación de la generación y manejo integral de los residuos sólidos urbanos y los residuos de manejo especial, se llevará a cabo conforme a lo que establezca la presente Ley, las disposiciones emitidas por las legislaturas de las entidades federativas y demás disposiciones aplicables”.*

Artículo 96 *“Las entidades federativas y los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, con el propósito de promover la reducción de la generación, valorización y gestión integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, a fin de proteger la salud y prevenir y controlar la contaminación ambiental producida por su manejo, deberán llevar a cabo las siguientes acciones”;*

Fracción I *“El control y vigilancia del manejo integral de residuos en el ámbito de su competencia. Cada entidad federativa podrá coordinarse con sus municipios para formular e implementar dentro de su circunscripción territorial un sistema de gestión integral de residuos que deberá asegurar el manejo,*

valorización y disposición final de los residuos a que se refiere este artículo. Asimismo, dichas autoridades podrán convenir entre sí el establecimiento de centros de disposición final local o regional que den servicio a dos o más entidades federativas”.

[...]

Artículo 97 *“Las normas oficiales mexicanas establecerán los términos a que deberá sujetarse la ubicación de los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, en rellenos sanitarios o en confinamientos controlados. Las normas especificarán las condiciones que deben reunir las instalaciones y los tipos de residuos que puedan disponerse en ellas, para prevenir la formación de lixiviados y la migración de éstos fuera de las celdas de confinamiento. Asimismo, plantearán en qué casos se puede permitir la formación de biogás para su aprovechamiento. Los municipios regularán los usos del suelo de conformidad con los programas de ordenamiento ecológico y de desarrollo urbano, en los cuales se considerarán las áreas en las que se establecerán los sitios de disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial”.*

1.4. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-083-SEMARNAT-2003

La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, menciona lo siguiente en referente a la clausura de los sitios de disposición final y los sitios no controlados:

[...]

Fracción 4 *“Definiciones”*; Apartado 4.42 *“Sitio no controlado: Sitio inadecuado de disposición final que no cumple con los requisitos establecidos en esta norma”.*

[...]

Fracción 9 *“Clausura del sitio”*; Apartado 9.1 *“Cobertura final de clausura: La cobertura debe aislar los residuos, minimizar la infiltración de líquidos en las*

celdas, controlar el flujo del biogás generado, minimizar la erosión y brindar un drenaje adecuado.

Las áreas que alcancen su altura final y tengan una extensión de dos hectáreas deben ser cubiertas conforme al avance de los trabajos y el diseño específico del sitio”.

Fracción 9 “*Clausura del sitio*”; Apartado 9.2 “*Conformación final del sitio: La conformación final que se debe dar al sitio de disposición final debe contemplar las restricciones relacionadas con el uso del sitio, estabilidad de taludes, límites del predio, características de la cobertura final de clausura, drenajes superficiales y la infraestructura para control del lixiviado y biogás*”.

Fracción 9 “*Clausura del sitio*”; Apartado 9.3. “*Mantenimiento: Se debe elaborar y operar un programa de mantenimiento de posclausura para todas las instalaciones del sitio de disposición final, por un periodo de al menos 20 años. Este periodo puede ser reducido cuando se demuestre que ya no existe riesgo para la salud y el ambiente. El programa debe incluir el mantenimiento de la cobertura final de clausura, para reparar grietas y hundimientos provocados por la degradación de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como los daños ocasionados por erosión (escurrimientos pluviales y viento)*”.

Fracción 9 “*Clausura del sitio*”; Apartado 9.4. “*Programa de monitoreo: Se debe elaborar y operar un programa de monitoreo para detectar condiciones inaceptables de riesgo al ambiente por la emisión de biogás y generación de lixiviado, el cual debe mantenerse vigente por el mismo periodo que en el punto 9.3 de la presente Norma*”.

Fracción 9 “*Clausura del sitio*”; Apartado 9.5. “*Uso final del sitio de disposición final: Debe ser acorde con el uso de suelo aprobado por la autoridad competente con las restricciones inherentes a la baja capacidad de carga, posibilidad de hundimientos diferenciales y presencia de biogás*”.

Dentro de la parte legislativa en referencia a la gestión de residuos, como se pudo revisar en este capítulo se encuentra un compendio de artículos que se deben aplicar para la mejora de los sistemas de gestión de residuos y la clausura y saneamiento de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos.

CAPÍTULO V

1. METODOLOGÍA

La metodología para la elaboración de este trabajo se propuso con base en experiencias propias, consultas personales y una revisión bibliográfica la cual consistió en un análisis documental, fijando y analizando los distintos casos de saneamiento de vertederos realizados en México, bajo estándares que rebasan lo establecido en las normas mexicanas. Así también esta revisión bibliográfica sirvió para analizar el estado del arte y los procesos constructivos que se llevan a cabo en otros países como Estados Unidos de América, así como la revisión de casos exitosos de América Latina. La información recabada se empleó también para la realización del marco teórico, así como el marco legal donde se incluyó normativa mexicana y aunado al tema normativo se hizo una selección de normas internacionales las cuales tuvieran sus parámetros por encima de los parámetros de las normativas nacionales, con el objetivo de que esta normativa ayude a la elaboración de la metodología de saneamiento y clausura ambiental de sitios no controlados.

Se realizó una localización de sitios no controlados a nivel nacional basado en el Atlas Nacional de Riesgos de Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y se énfasis en los sitios ubicados en la ZMVM.

1.1. SECUENCIA DE LA METODOLOGÍA

- Revisión bibliográfica
- Localización de sitios no controlados
- Establecimiento de las bases de diseño de obras de ingeniería para la clausura ambiental.
- Propuestas de diseño y ejecución de sistemas de conformación de residuos, cubierta final y manejo y control de biogás y lixiviado.
- Diseño de una metodología ambiental para la clausura de sitios no controlados (SNC o VCA)

2. LOCALIZACIÓN DE SITIOS NO CONTROLADOS (SNC)

En la consulta y análisis de información acerca de los sitios de disposición final no controlados se obtuvieron datos del Atlas Nacional de Riesgos, desarrollado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2021), en su apartado Sanitario–Ecológico. Se identificaron los sitios clasificados como

“Peligro de contaminación por residuos sólidos urbanos”, entre los cuales están incluidos centros de reciclaje, centros de acopio de residuos valorizables, plantas de composta, estaciones de transferencia, así como sitios de disposición final que cumplen o no con la NOM-083-SEMARNAT-2003, de los sitios registrados por el CENAPRED. Así, según el objetivo de este trabajo, se localizaron 1,975 sitios en las 32 Entidades Federativas que conforman la República Mexicana, mismos que al no estar bajo cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003, son clasificados como sitios no controlados. Estos sitios se enlistan por Entidad federativa en la Tabla 5.

Tabla 5. *Sitios No Controlados reportados por el CENAPRED, en el Atlas Nacional de Riesgos en el año 2021*

No.	Entidad Federativa	Número de Sitios No Controlados	No	Entidad Federativa	Número de Sitios No Controlados
1	Aguascalientes	11	20	Oaxaca	364
2	Baja California Norte	25	21	Puebla	72
3	Baja California Sur	54	22	Querétaro	11
4	Campeche	27	23	Quintana Roo	46
5	Chiapas	95	24	San Luis Potosí	36
6	Chihuahua	116	25	Sinaloa	42
7	Ciudad de México	0	26	Sonora	110
8	Coahuila de Zaragoza	22	27	Tabasco	12
9	Colima	7	28	Tamaulipas	39
10	Durango	47	29	Tlaxcala	1
11	Estado de México	51	30	Veracruz de Ignacio de la Llave	147
12	Guanajuato	26	31	Yucatán	137
13	Guerrero	110	32	Zacatecas	75
14	Hidalgo	49	Total		1,975
15	Jalisco	100			
16	Michoacán de Ocampo	85			
17	Morelos	17			
18	Nayarit	21			
19	Nuevo León	20			

Fuente: *elaboración propia basado en información del Atlas Nacional de Riesgos, CENAPRED (2021)*

En la Figura 20, se muestra la distribución de los sitios enlistados por Entidad federativa, dando un total de 1,975 SNC, donde el Estado de Oaxaca es la entidad con el mayor número de sitios no controlados (SNC), con un total de 364, y en el extremo opuesto se encuentra la Ciudad de México con cero (0) SNC, prosiguiendo a esta el Estado de Tlaxcala con sólo un (1) SNC.

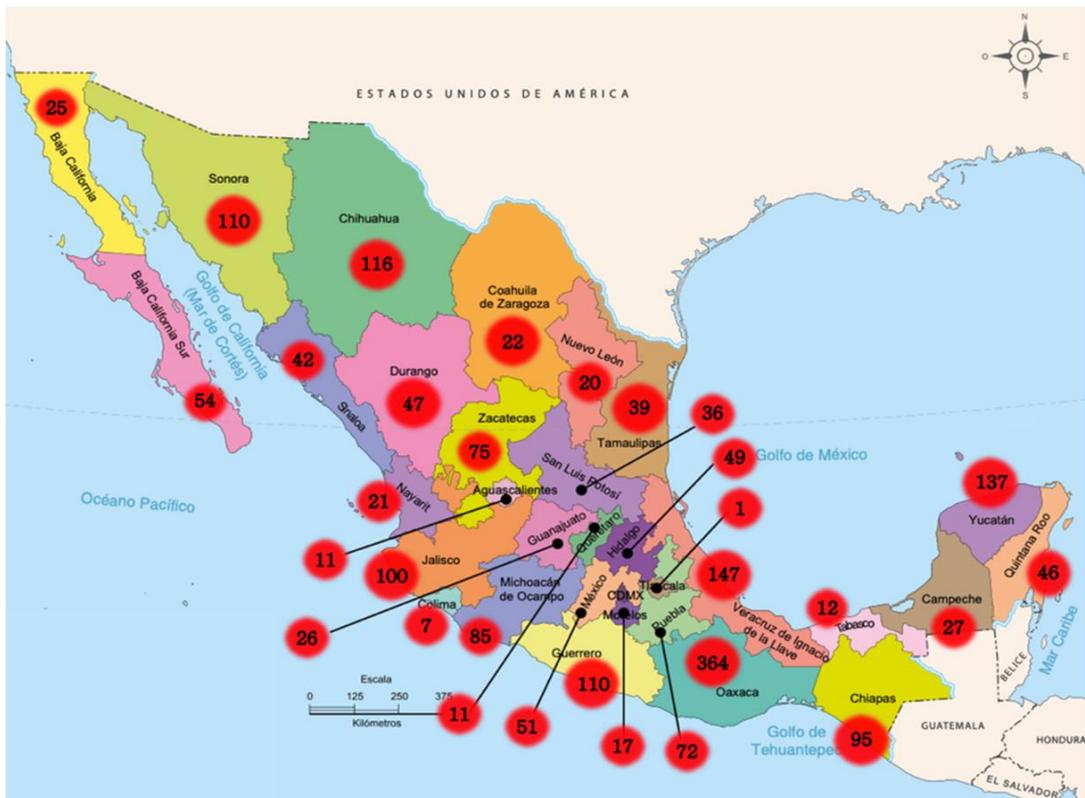


Figura 20. Mapa de la república mexicana con el número de sitios no controlados (SNC) por Entidad federativa

Fuente: elaboración propia adecuado con datos obtenidos del Atlas Nacional de Riesgos del CENAPRED, 2021

Con base la investigación realizada se encontró que derivado de los datos del número de sitios no controlados o vertederos a cielo abierto presentados por el CENAPRED se presenta una disparidad entre los datos del número de sitios no controlados proporcionados tanto por CENAPRED e INEGI, además de la falta de datos de las instancias ambientales estatales, tanto del Estado de México como del Estado de Hidalgo. Esta disparidad debe corregirse unificando la información del número de sitios a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), motivando a que los municipios cumplan con su obligación de informar fehacientemente a esta Secretaría.

3. ESTABLECIMIENTO DE LAS BASES DE DISEÑO DE OBRAS DE INGENIERÍA PARA LA CLAUSURA AMBIENTAL

El establecimiento de las bases para el diseño de obras de ingeniería engloba principalmente los pasos a seguir un correcto desarrollo de la planificación, ejecución, y, monitoreo de una obra de clausura y saneamiento de sitios de disposición final (SDF) sean estos vertederos a cielo abierto o sitios no controlados, y también aplicables para rellenos sanitarios, estas bases de diseño parten desde un primer punto a desarrollar, el cual es el realizar una visita al sitio, donde se identificarán y evaluarán, entre otros aspectos, la ubicación del sitio, presencia de cuerpos de agua superficiales, y escurrimientos de lixiviados. Posteriormente y con base a estas observaciones se deberá realizar el proyecto ejecutivo para la clausura y saneamiento, tomando en cuenta el establecimiento de los parámetros a considerar para el proyecto de clausura y saneamiento del sitio de disposición final (SDF).

3.1. DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA AMBIENTAL PARA LA CLAUSURA DE SITIOS NO CONTROLADOS (SNC O VCA)

El conjunto de cada uno de los aspectos a desarrollar dará como resultado un manual que contenga una metodología de fácil aplicación para la clausura de vertederos a cielo abierto o sitios no controlados (SNC) que este en cumplimiento con la normativa mexicana.

Dicha metodología se desarrolla con el objetivo que sirva de base para la elaboración de proyectos integrales para la clausura, o transición a sitios controlados de vertederos a cielo abierto o sitios no controlados. Esta transición deberá evaluarse por las autoridades ambientales y por los cuerpos técnicos a cargo del manejo de sitios de disposición final de cada entidad o municipio.

CAPÍTULO VI

METODOLOGÍA AMBIENTAL PARA EL CIERRE Y CLAUSURA DE SITIOS NO CONTROLADOS (VERTEDEROS O TIRADEROS A CIELO ABIERTO, O BASURALES)

Las figuras (como son diagramas, diagramas de flujo, imágenes, esquemas, renders, y modelos 3D) que se muestran en este capítulo son de elaboración propia, elaboradas con base a la experiencia y al conocimiento adquirido en la participación de planificación, desarrollo y ejecución de proyectos de rellenos sanitario y vertederos a cielo abierto o sitios no controlados.

1. PROCESO PREVIOS A LA CLAUSURA

1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SITIOS NO CONTROLADOS

En el caso de los sitios de disposición final de residuos sólidos, cada uno tiene sus propias características, sin embargo, se debe de establecer un parámetro para clasificar a los sitios no controlados, pero, sobre todo, para dar una adecuada estructuración al sitio durante su clausura ambiental.

Para este caso la clasificación de los sitios se dará en términos del espesor promedio de los residuos al que se le denominará *altura*, independientemente de la superficie que abarque el sitio. A continuación, se muestra la clasificación de sitios por altura:

- I. SNC tipo 1) de 0.00 m a 4.00 m de altura
- II. SNC tipo 2) mayor a 4.00 m hasta 8.00 m de altura
- III. SNC tipo 3) mayor a 8.00 m de altura

1.2. RECONOCIMIENTO DEL SITIO

Previo a cualquier otra actividad, se debe realizar un reconocimiento del sitio con el objetivo de identificar su ubicación, el número aproximado de municipios o localidades que disponen sus residuos ahí, y la cantidad neta diaria de residuos que entran por día. Dado que es común que los sitios carezcan de instalaciones y control para el registro de ingreso de los vehículos, también es común que no cuenten con un sistema de pesaje de los mismos; afortunadamente, el cálculo de los residuos que ingresan se puede realizar considerando la capacidad de los vehículos, o con un levantamiento topográfico y el dato de la densidad de los residuos.

Como parte de las actividades de la visita de reconocimiento del sitio o recorrido visual del sitio, se deben identificar las vías de acceso y las colindancias que éste tiene, así como la identificación del lugar, haciendo referencia sobre si se trata de un lugar accidentado, una planicie, o un valle. Así mismo, se debe identificar la distancia aproximada de la zona habitacional más cercana y su población, si existe un complejo educativo en las inmediaciones, si pasa alguna línea de gasoducto por la zona, si hay pozos de extracción de agua potable, cuerpos naturales de agua, barrancas, barrancas secas (únicamente conducen agua en temporada de lluvias), ríos, humedales, etc. Todo lo anterior sin olvidar identificar correctamente el tipo de terreno sobre el que se encuentra.

Posterior al recorrido del sitio, se deberá llenar un formato, así como tomar anotaciones de las características observadas durante el mismo. Este reconocimiento tiene el objetivo de conocer los potenciales estudios y análisis a llevarse a cabo, el tipo de maquinaria que se empleará, si el material de la zona es apto para realizar los trabajos de clausura ambiental y el método de trabajo a implementar.

Para complementar este reconocimiento del sitio, se presenta la Tabla 6, que muestra diversos parámetros para hacer una evaluación de campo que ayude a la realización del proyecto ejecutivo y a la toma de decisiones para la clausura ambiental del sitio.

Tabla 6. Análisis de Parámetros de evaluación en campo del SDF de RSU

Análisis de Parámetros de evaluación en campo del SDF de RSU						
Datos Generales y Clasificación del Sitio:						
No.	Fenómeno	Parámetros de evaluación				
		Muy Alto	Alto	Medio	Bajo	Muy Bajo
1.0	Vulnerabilidad					
1.2	Vulnerabilidad Social:					
2.0	Riesgos naturales					
2.1	Sismicidad					
2.2	Fallas y Fracturas en el terreno					

Análisis de Parámetros de evaluación en campo del SDF de RSU						
Datos Generales y Clasificación del Sitio:						
No.	Fenómeno	Parámetros de evaluación				
		Muy Alto	Alto	Medio	Bajo	Muy Bajo
2.3	Inestabilidad de laderas, cerros, cortes (deslizamientos, flujos y caídos o derrumbes)					
2.4	Inundación					
2.5	Precipitación					
2.6	Tormenta eléctrica					
2.7	Granizo					
2.8	Ondas gélidas					
2.9	Ondas cálidas					
2.10	Nevadas					
2.11	Zonificación Geotécnica					
3.0	Riesgos Antropogénicos					
3.1	Incendio					
3.2	Explosión					
3.3	Contaminación, epidemia, intoxicación, plaga y radioactividad					
3.4	Accidentes, conflicto social, concentraciones masivas, sabotajes e interrupción de servicios					
3.5	Inestabilidad en taludes del sitio					
3.6	Afloramiento de Lixiviados					
3.7	Contaminación en cuerpos de agua superficiales					
3.8	Persistencia de malos olores					
4.0	Instalaciones expuestas en un radio de 500 m alrededor del sitio					

Análisis de Parámetros de evaluación en campo del SDF de RSU						
Datos Generales y Clasificación del Sitio:						
No.	Fenómeno	Parámetros de evaluación				
		Muy Alto	Alto	Medio	Bajo	Muy Bajo
4.1	Equipamientos					
4.2	Infraestructura					
4.3	Servicios					
4.4	Centros Educativos					
4.5	Viviendas					
4.6	Población					

Fuente: elaboración propia

Para la evaluación y llenado de los apartados *2.3 al 2.10*, el equipo evaluador deberá consultar el cuadernillo “*Mapas De Índices De Riesgo A Escala Municipal Por Fenómenos Hidrometeorológicos, 2012*” elaborado por el CENAPRED y el Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) o bien consultar los atlas de riesgo que el CENAPRED tiene en su sitio web.

Para la evaluación y llenado de los apartados *2.1 Sismicidad* y *2.11 Zonificación geotécnica* incluida en el rubro de Riesgos Naturales de la incluida en la *Tabla 6. Parámetros de evaluación en campo de análisis del sitio*, se toma los criterios de la publicación “*Sismología de México*” publicada por el Servicio Geológico Nacional (SGM) en marzo 2017.

Para el caso del numeral *2.1 Sismicidad* se hará la evaluación y llenado del apartado con la Figura 21 la cual se encuentra en la publicación del SGM en su sección *Zonas Sísmicas En México*, este mapa muestra el nivel de riesgo que ocupa cada Entidad federativa y con lo cual se llenará dicho apartado.

VULNERABLES ANTE SISMOS

El mapa muestra los grados de peligro y vulnerabilidad calculados por el Cenapred ante temblores a los que están expuestos los estados de la República mexicana.



Figura 21. Zonas Sísmicas en México. Riesgo y Vulnerabilidad ante Sismos en las Entidades Federativas de México

Fuente: Imagen tomada de la publicación *Sismología de México*, Servicio Geológico Nacional (SGM). Marzo 2017. Mapa del Atlas Nacional de Riesgos, CENAPRED.

En el caso del numeral *2.11 Zonificación geotécnica* la publicación del SGM en su sección *Regiones Sísmicas En México*, se clasifican las zonas sísmicas en A, B y C, y D, de esta manera con base a estas definiciones se podrá llenar el apartado señalado, la descripción de las zonas es la siguiente:

- **Zona A:** son zonas donde no se tienen registros históricos de sismos, ni reportes de sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones de suelo mayores a un 10% aceleración de la gravedad. (SGM, 2017)
- **Zona B y C:** se refiere a zonas donde se registran sismos no tan frecuentemente o zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de aceleración del suelo. (SGM, 2017)
- **Zona D:** son zonas donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy fuerte y las aceleraciones del suelo llegan a sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad. (SGM, 2017)

Para los numerales 3.1 al 3.4 y numeral 4.0 se deberán consultar los Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, en caso de que la Entidad no cuente con ello, se deberá realizar la evaluación con base a los procedimientos que marca la “*Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, 2021*” elaborado por la Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, Centro Nacional De Prevención De Desastres (CNPC) y CENAPRED.

Para los numerales 3.5 al 3.8 los criterios se tomarán con base a la inspección física del sitio, ponderándolos de la siguiente manera:

Para el numeral 3.5 *Inestabilidad en taludes del sitio* el criterio será el siguiente considerando que los taludes no están compactados ni conformados y que la forma que tienen está dada por ángulo de reposo de los residuos:

Para taludes de hasta 2.00 metros de altura, el parámetro será *Muy Bajo*.

Para taludes mayores a 2.00 metros y de hasta 4.00 metros de altura sin compactar el parámetro será *Bajo*.

Para taludes mayores de 4.00 metros y de hasta 8.00 metros de altura sin compactar el parámetro será *Alto*.

Para taludes mayores de 8 metros de altura sin compactar el parámetro será *Muy Alto*.

Para el numeral 3.6 *Afloramiento de Lixiviados* el criterio será el siguiente:

El parámetro será *Muy Bajo* cuando haya poco afloramiento de lixiviado y se encuentre retenido en alguna zona del sitio.

El parámetro será *Bajo* cuando haya afloramiento moderado y se encuentre retenido en alguna zona del sitio.

El parámetro será *Alto* cuando haya afloramientos descontrolados y disperso en zonas fuera del sitio.

El parámetro será *Muy Alto* cuando haya afloramiento descontrolado en taludes y no haya retención en el sitio

Para el numeral 3.7 *Contaminación en cuerpos de agua superficiales* el criterio será el siguiente:

El parámetro será *Muy Bajo* cuando no haya trazas de escurrimientos de lixiviado a los cuerpos de agua.

El parámetro será *Bajo* cuando se identifique que hubo trazas de escurrimientos de lixiviado a los cuerpos de agua.

El parámetro será *Alto* cuando haya escurrimientos esporádicos de lixiviado a los cuerpos de agua.

El parámetro será *Muy Alto* cuando haya un escurrimiento constante de lixiviado a los cuerpos de agua.

Para el numeral *3.8 Persistencia de malos olores* el criterio será el siguiente:

El parámetro será *Muy Bajo* cuando no haya percepción de olores desagradables.

El parámetro será *Bajo* cuando haya poca percepción de olores desagradables.

El parámetro será *Alto* cuando haya percepción esporádica de olores desagradables.

El parámetro será *Muy Alto* cuando la percepción de olores desagradables sea constante.

1.3. IDENTIFICACIÓN Y MITIGACIÓN DE RIESGOS

Una vez realizado el procedimiento de conocimiento de riesgos y llenada la Tabla 8. “*Parámetros de evaluación en campo de análisis del sitio*” donde se evaluarán parámetros establecidos, también se identificarán riesgos que pueden presentarse en el sitio. Con base en estos riesgos, se deben tomar acciones para mitigarlos, las cuales deben incluirse en el proyecto de clausura y saneamiento.

Los riesgos identificados en el sitio de disposición final pueden clasificarse como agudos, crónicos, biológicos, naturales y humanos, con base en estos riesgos se plantean las acciones para su mitigación y prevención, de modo tal que se logre minimizar el riesgo en los sitios de disposición final y no se conviertan en un peligro. Estas medidas de mitigación pueden ser aplicadas para las clausuras de vertederos y la apertura de sitio que lo sustituirá, por lo tanto, estas medidas se tomarán en cuenta cuando se esté elaborando el proyecto ejecutivo.

En la Tabla 7 se establecen una clasificación por tipo de riesgo, así como las causas generadoras identificadas, las consecuencias que estos conllevan, y las acciones o medidas de mitigación del riesgo las cuales es recomendable que se consideren en el proyecto de clausura y saneamiento.

Tabla 7. Tipo, generadores, consecuencias y medidas de mitigación de riesgos en sitios de disposición final

Riesgos, Consecuencias y Medidas De Mitigación De Riesgos En Sitios De Disposición Final			
Tipo de Riesgo	Generador	Consecuencias	Medidas de Mitigación
Riesgos Agudos	<ul style="list-style-type: none"> - Combustibles - Biogás - Aceites y lubricantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Explosiones - Ondas térmicas - Intoxicación - Daños al medio biótico - Daños al medio abiótico 	<ul style="list-style-type: none"> - Almacenamiento adecuado de combustibles - Almacenamiento adecuado de aceites y lubricantes - Sistemas de control de biogás
Riesgos Crónicos	<ul style="list-style-type: none"> - Lixiviado - Biogás - Emisiones de CO₂ - Generación de polvo 	<ul style="list-style-type: none"> - Incendios - Daños a la salud - Emisión de gases efecto invernadero (GEI) - Contaminación de cuerpos de agua - Contaminación del suelo 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas de control de biogás - Sistema de control y tratamiento de lixiviados - Compactación de residuos sólidos - Cobertura diaria de residuos confinados - Mantenimiento preventivo a equipos - Impermeabilización de los sitios
Riesgos Biológicos	<ul style="list-style-type: none"> - Fauna nociva - Contaminantes aerobiológicos - Generación de malos olores 	<ul style="list-style-type: none"> - Daños a la salud - Daños a las cadenas tróficas - Generación de partículas PM10 y PM2.5 	<ul style="list-style-type: none"> - Manejo adecuado de residuos - Compactación de residuos - Cobertura diaria de residuos confinados - Riego de terracerías en época de estiaje - Implementación de control de fauna nociva
Riesgos Naturales	<ul style="list-style-type: none"> - Sismos - Lluvias extremas - Nevadas - Incendios externos - Vientos extremos - Tornados 	<ul style="list-style-type: none"> - Deslizamientos - Inundación del sitio - Alta generación de lixiviados - Tolvaneras - Licuefacción de material de cobertura 	<ul style="list-style-type: none"> - Correcta elección del terreno para el sitio de disposición final - Estudios sísmicos - Estudios climatológicos - Estudios de retornos de lluvias - Compactación de los residuos

Riesgos, Consecuencias y Medidas De Mitigación De Riesgos En Sitios De Disposición Final			
Tipo de Riesgo	Generador	Consecuencias	Medidas de Mitigación
			<ul style="list-style-type: none"> - Compactación de cobertura diaria en residuos confinados Configuración de taludes - Construcción de drenaje pluvial - Barreras forestales - Implementación de riego de terracería en época de estiaje - Construcción o consideración de franjas de amortiguamiento - Identificación de zonas de evacuación - Marcaje de zonas de puntos de reunión para personal en caso de sismo
Riesgos Humanos	<ul style="list-style-type: none"> - Mala selección del sitio para construir el sitio de disposición final - Mala operación del sitio - Carencia de estudios - Uso indebido de maquinaria - Presencia de pepenadores - Generación de fauna nociva - Falta de implementación de protocolos - Carencia de equipo de protección - Personal inadecuado 	<ul style="list-style-type: none"> - Deslizamientos - Licuefacción de material de cobertura - Alta generación de lixiviados - Liberación de biogás - Incendios - Explosiones - Daños a la salud - Pérdida de vidas humanas 	<ul style="list-style-type: none"> - Selección correcta del sitio para la construcción de SDF - Realización de estudios - Compactación y conformación de residuos - Compactación de cobertura diaria en residuos confinados - Diseño adecuado de taludes - Implementación de manual de operaciones - Reglamento interno del sitio de disposición final - Señalética - Uso de maquinaria adecuada

Riesgos, Consecuencias y Medidas De Mitigación De Riesgos En Sitios De Disposición Final			
Tipo de Riesgo	Generador	Consecuencias	Medidas de Mitigación
	<ul style="list-style-type: none"> - Nula capacitación al personal 		<ul style="list-style-type: none"> - Uso adecuado de maquinaria - Operadores con experiencia - Capacitación de personal - Uso de equipo de protección (EPP) - Control de pepenadores - Señalética

Fuente: elaboración propia

2. PROCESOS LEGALES

El proceso legal por el que debe de transitar un proyecto de clausura y saneamiento de un sitio no controlado, o un relleno sanitario inicia con el requerimiento y orden por parte de la autoridad ambiental. Dicha orden puede ser del nivel de gobierno Local o Federal, recayendo siempre, en el ámbito Municipal, ya que se debe respetar la libertad e independencia de los municipios; sin embargo, los proyectos son autorizados y supervisados por las instancias estatales, salvo que se identifiquen residuos de atención federal como los residuos peligrosos. Posterior a esta indicación de clausura, se debe presentar un proyecto para la misma, el cual puede ser desarrollado por la Administración pública o por un privado. El proyecto podrá ejecutarse una vez aprobado, y debe ser supervisado por las instancias ambientales tanto Locales como Federales. La Figura 22, muestra el proceso referente a los procesos legales que lleva un proyecto de clausura y saneamiento cuando sea desarrollado por la Administración pública.

Derivado de la poca atención, experiencia y recursos para el cierre y clausura de los SDF, una alternativa para concretar un proyecto de este tipo es considerar la participación del sector privado, pudiendo ser bajo el esquema de concesión o contrato público ya sea tradicional de inversión presupuestaria o proyecto para prestación de servicios (PPS), eligiendo el esquema que resulte más conveniente para ambas partes. En la Figura 23 se muestran los procesos que deben seguirse una vez que es otorgado el contrato de concesión o contrato público para el desarrollo de un proyecto de clausura y saneamiento.

Para el cierre y clausura de un sitio de disposición final el proyecto debe cumplir con la normativa que a estos sitios refiere, es decir, la NOM-083-SEMARNAT-2003. La elaboración de estudios ayudará en la elaboración del proyecto y la ejecución de la clausura, por ello de acuerdo con los requerimientos normativos se propone la realización de los estudios enlistados a continuación:

- Estudio topográfico
- Estudio de evaluación geológico, geofísico e hidrológico
- Estudio hidrológico e hidráulico
- Estudio geotécnico
- Estudio de generación y composición de biogás
- Estudio de generación y composición de lixiviado

2.2. CONCESIÓN

El esquema de concesión se aplica debido al monto de inversión que representa realizar proyectos relacionados a clausura de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, puede aplicarse cuando el sitio a clausurar cumpla con condiciones como una dimensión considerable (30 ha), volumen de residuos y volumen aprovechable de biogás; cumpliéndose estas condiciones, se podrá aplicar un proceso licitatorio que dé como resultado la concesión de la clausura, control de biogás, la posible explotación y aprovechamiento de biogás y el tratamiento de lixiviado. El periodo de la concesión para proyectos relacionados a SDF, debe ser por un periodo mínimo acordado de 20 años, o el que sea conveniente para ambas partes.

Para lograr que el proyecto sea atractivo y económica y financieramente viable se deberán buscar esquemas de apalancamiento financiero, así como el ingreso de recursos por venta de bono de carbono, venta de energía eléctrica, u otorgar dentro de la licitación contraprestaciones de servicios como la recolección de residuos, el aprovechamiento de los residuos futuros entre otros.

Para el esquema de concesión a 20 años, la autoridad municipal debe solicitar el apoyo del gobierno local, dado que como municipio solo puede otorgar concesiones con duración máxima a su administración (3 años), por lo que para realizar la concesión a 20 años es necesario que la iniciativa sea discutida y aprobada por el congreso local.

2.3. CONTRATO PÚBLICO

Para el esquema de contrato público, este puede ser bajo el esquema tradicional de inversión presupuestaria o proyecto para prestación de servicios (PPS). Otorgándose varios los contratos cuando se desee la participación privada efectuado las actividades por etapas, como puede ser, la elaboración del proyecto de clausura y saneamiento, la ejecución y desarrollo del proyecto, y la etapa de posclausura como son operación y mantenimiento realizándose esta última etapa a través de un privado o por la Administración pública.

DIAGRAMA DE FLUJO APLICABLE AL PROCEDIMIENTO LEGAL PARA PROYECTOS DE CLAUSURA DE VCA O SNC DESARROLLADOS CON PARTICIPACIÓN DEL SECTOR PRIVADO

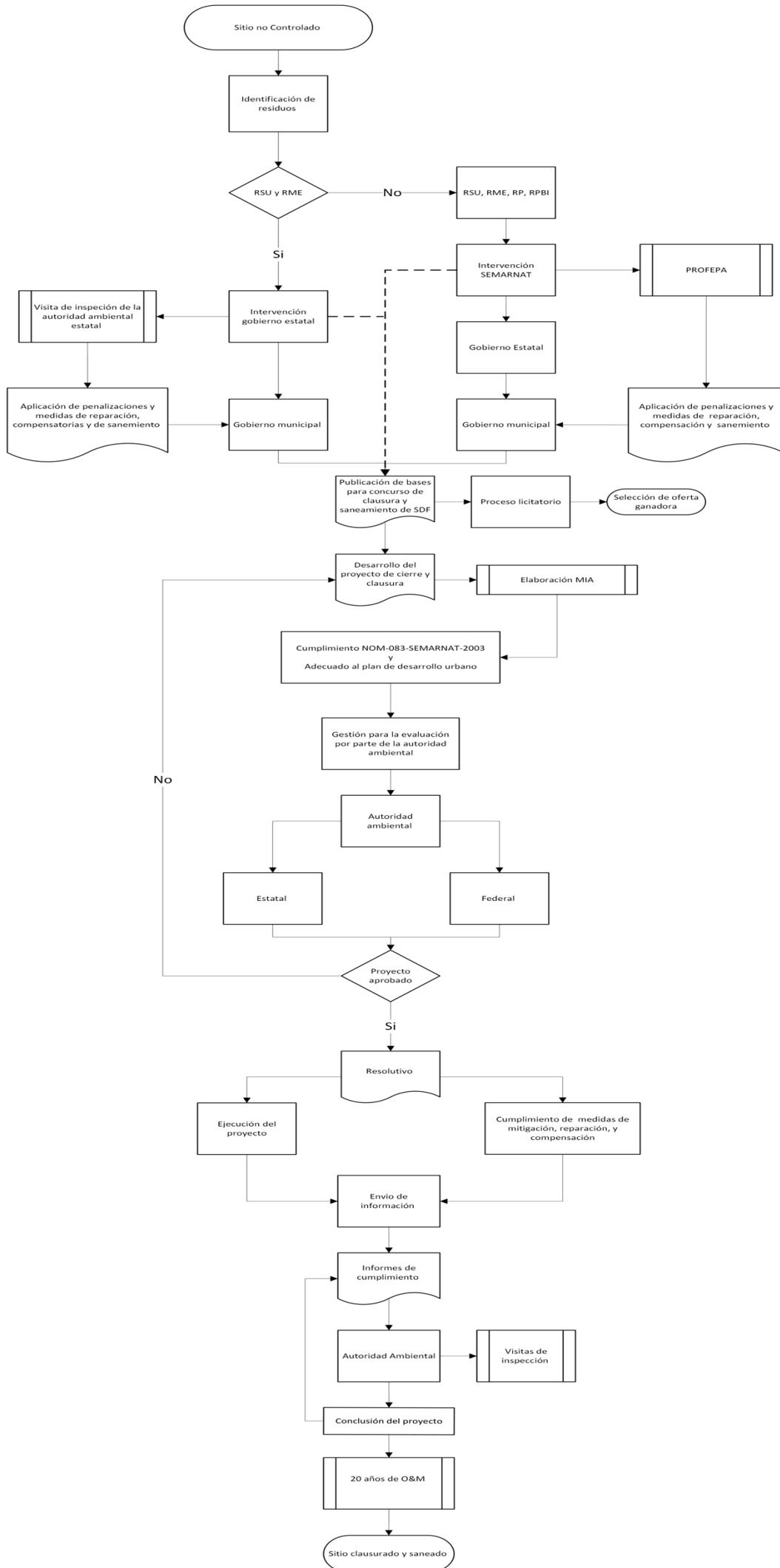


Figura 23. Diagrama de flujo del proceso legal para proyectos de clausura de VCA o SNC con participación del sector privado

Fuente: elaboración propia

3. NORMATIVIDAD APLICABLE

Dentro del marco legal, para la clausura de un sitio no controlado, se debe de cumplir principalmente con la norma NOM-083-SEMARNAT-2003, y con base al cumplimiento de esta norma, se realiza el proyecto que debe presentarse a la SEMARNAT, ya sea a nivel Estatal o Federal.

En un proyecto de clausura y saneamiento debe considerarse un amplio abanico de normas, las cuales pueden ser nacionales e internacionales, las internacionales pueden aplicarse siempre y cuando estas tengan mayores índices y requerimientos más elevados a los de las nacionales, esto con el objeto de tener un proyecto integral, en el que se engloben los aspectos de diseño, construcción y fabricación de los diferentes sistemas de clausura y saneamiento de sitios de disposición final, diseñados con base a las normas y especificaciones enunciados en el capítulo correspondiente. En cualquier caso, los parámetros normativos aplicables podrán modificarse a juicio del proyectista y sea factible su aplicación siempre que se trate de procedimientos y/o estándares internacionales de reconocido prestigio que estén por encima de los estándares de la normativa nacional, ya que en todo caso se deben respetar las leyes locales y federales.

3.1. LISTADO DE LA NORMATIVIDAD APLICABLE

3.1.1. NORMATIVA AMBIENTAL

- Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).
- NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

- NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental – Lodos y biosólidos – Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
- NOM-043-SEMARNAT-1993, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.
- NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
- NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

3.1.2. NORMATIVA APLICABLE AL SISTEMA DE SELLADO

- N-CMT-1-01, Características de los Materiales, Materiales para Terracerías, Materiales para Terraplén. (SCT)
- NOM-008-SCFI-2002, Sistema General de Unidades de Medida

3.1.3. ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES PARA SISTEMA DE SELLADO

- ASTM D698 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort.

3.1.4. NORMATIVA APLICABLE PARA GEOSINTÉTICOS

- N-CMT-6-01-001 – Características de los materiales. Materiales diversos. Geosintéticos. Geotextiles para terracerías.
- M-MMP-6-01 – Métodos de muestreo y prueba de materiales. Materiales diversos. Geosintéticos.

3.1.5. ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES PARA GEOSINTÉTICOS

- ASTM D4873 Standard Guide for Identification, Storage, and Handling of Geosynthetic Rolls and Samples
- ASTM D5887 – Standard Test Method for Measurement of Index Flux Through Saturated Geosynthetic Clay Liner Specimens Using a Flexible Wall Permeameter.
- ASTM D6241 – Standard Test Method for Static Puncture Strength of Geotextiles and Geotextile-Related Products Using a 50-mm Probe.
- ASTM D6768 – Standard Test Method for Tensile Strength of Geosynthetic Clay Liners.
- EN965 – Geotextiles and geotextile-related products. Determination of mass per unit area.
- EN13257: 2016 – Geotextiles y productos relacionados. Requisitos para su uso en los vertederos de residuos sólidos.
- EN13493: 2013 – Barreras geosintéticas. Requisitos para su utilización en la construcción de obras de almacenamiento y vertederos de residuos sólidos.

3.1.6. NORMATIVA APLICABLE PARA TUBERÍAS

- NMX-E-043-SCFI – Tubos de polietileno (pe) para la conducción de gas natural (GN) y gas licuado de petróleo (GLP) – especificaciones y métodos de prueba.
- NMX-E-018-CNCP, Industria del plástico – Tubos de polietileno de alta densidad (PEAD) para la conducción de agua a presión – especificaciones y métodos de ensayo.
- NMX-E-216-SCFI Industria del plástico – tubos de polietileno de alta densidad (PEAD) para sistemas de alcantarillado – especificaciones.

4. CONSIDERACIONES Y ESTUDIOS TÉCNICOS

4.1. ESTUDIO TOPOGRÁFICO

Dentro de los estudios básicos se contempla la topografía del sitio, resaltando los trabajos de localización, orientación dimensionamiento y seccionamiento del terreno; de igual manera, se deberán contemplar e incluir los trabajos correspondientes a la altimetría, secciones, curvas de nivel y perfiles del terreno. En este sentido, el relieve topográfico de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos (RSU), es un parámetro que varía constantemente, debido a la acumulación de los residuos en las áreas para ello destinadas, por ello se debe establecer un banco de nivel fijo (BN) desde donde se realizarán los trabajos correspondientes al estudio topográfico y altimétrico antes y durante los trabajos de saneamiento, remediación y clausura.

4.1.1. BANCO DE NIVEL FIJO

Se deberá construir una red de nivelación conformada, mínimo, por un banco de nivel primarios (BN1). El, o los bancos de nivel, deben encontrarse ubicados dentro y fuera del perímetro del sitio de disposición final, en zonas donde exista terreno natural.

Estos bancos de nivel deberán ser señalados por una placa de acero de 0.20 m x 0.20m colada dentro de una placa de concreto de 0.30 m x 0.30 m x 0.05 m. La placa de acero deberá protegerse con un recubrimiento de pintura y señalado la nomenclatura del nombre del banco de nivel, así mismo se deberá señalar el centro del banco de nivel con un círculo de color rojo

Se deberán colocar bancos de nivel de control auxiliar o secundarios ubicados sobre la zona donde se haya realizado la disposición y confinamiento de residuos sólidos. Deberán colocarse los bancos de nivel secundarios en el perímetro, así como en el centro de la plataforma y en el punto medio de los taludes. Estos bancos de nivel secundarios servirán para la detección, monitoreo y control de los asentamientos por degradación de residuos en la zona del sitio de disposición final.

Estos bancos de nivel deberán ser señalados por una placa de acero de 0.20 m x 0.20m colada dentro de una placa de concreto que irá sobre la capa de cubierta vegetal de 0.30 m x 0.30 m x 0.05 m. La placa de acero deberá protegerse con un recubrimiento de pintura y señalando la nomenclatura del

nombre del banco de nivel, así mismo se deberá señalar el centro del banco de nivel con un círculo de color rojo.

4.2. ESTUDIO HIDROLÓGICO

Se debe obtener la información de la hidrología de la zona donde se ubique el sitio, esto con el objetivo de determinar las características de pendientes y drenajes naturales, así como el escurrimiento existente del cual se debe tener en cuenta para el diseño de las obras de ingeniería en el tema de escorrentías pluviales. Los niveles de inundabilidad del terreno, esto con el mismo propósito de diseño de obras de desvío o de contención de agua pluvial, ya que estas obras de ingeniería deben de garantizar el desvío de la escorrentía superficial fuera del sitio, tomando en cuenta los canales de flujo existentes (si es que los hay) o su diseño, así como el área y características de la cuenca como el número de años de periodo de registro de precipitación y periodos de retorno, entre otros.

4.3. BALANCE HÍDRICO

Este estudio ayudará a determinar la cantidad de agua que entra en forma de lluvia y sale en forma de vapor, infiltraciones o escurrimientos en un espacio territorial, así como los periodos de retorno de las lluvias y sus intensidades, mediante el estudio de balance hídrico es posible evaluar de manera cuantitativa los recursos hídricos y las modificaciones ocasionadas por actividades antropogénicas. Estas mediciones cuantitativas ayudarán a determinar los trabajos a realizar, así como a dar cauce al agua pluvial y direccionar los escurrimientos hacia los cuerpos de agua superficiales.

4.4. CONDICIONES GEOLÓGICAS, GEOFÍSICAS Y GEOHIDROLÓGICAS

Esta información es necesaria para saber si existe contaminación de un acuífero en la zona y su profundidad, así como el gasto y dirección del flujo, entre otros, se puede hacer uso de mapas o cartas geológicas local o estatal, en el caso de carecer de la información anterior, será necesario llevar a cabo los estudios geofísicos y/o geohidrológicos que se requieran para generarla.

Para este caso se debe realizar la obtención de testigos de perforación. Se deben hacer las perforaciones necesarias para establecer las formaciones geológicas y sus estratos, estos testigos deben ir desde la superficie hasta las porciones superiores del lecho rocoso u otras capas confinadas que pueden variar de 0.00 m hasta 60.0 m u 80.0 m, dependiendo del tipo de suelo,

ubicándose de acuerdo a las condiciones específicas del proyecto, por lo que se recomienda tanto aguas arriba como aguas abajo del sitio. Con estas mismas perforaciones se puede hacer la determinación del nivel de agua superficial para obtener los niveles hidrológicos y piezométricos en los acuíferos existentes en el sitio, con estos estudios se realiza la determinación de los factores ya mencionados; de esta manera será posible determinar el potencial de contaminación hacia el suelo y del acuífero en la zona, en caso de que ésta subyace al vertedero.

La realización de este estudio debe proporcionar los siguientes resultados:

- Profundidad de aguas freáticas y espesor de los acuíferos superficiales
- Determinación de la dirección del flujo de los acuíferos superficiales y su conductividad hidráulica
- Conductividad hidráulica de las capas confinantes
- Espesor de las capas de suelo confinantes, y si existe, el área donde los equipos de control superficiales y profundos estén hidráulicamente conectados
- Las curvas potenciométricas del acuífero profundo, determinando su dirección y transmisibilidad
- Formación rocosa, basaltos fracturados en la cercanía del SDF y la interacción hidráulica entre los acuíferos y es estrato rocoso
- Las zonas de recarga superficial de los acuíferos por medio de filtración y percolación de agua de lluvia y las posibles rutas del agua de lluvia

Debe darse la importancia a los datos sobre estos estudios característicos, para el establecimiento de una idoneidad ambiental, obteniendo la valoración del grado de contaminación, y con ello realizar el diseño de las obras de ingeniería necesarias para asegurar una captación, control y manejo de forma idónea del lixiviado y de los gases generados en el sitio.

4.5. ESTUDIO GEOTÉCNICO

El tipo de suelo es un factor relevante para el desarrollo de la metodología, dado que esta característica ayudará a determinar el tipo de obra que se debe realizar para la captación y conducción de los lixiviados, esto debido a la permeabilidad del suelo.

Al conocer el tipo de suelo sobre el que está el sitio de disposición final, nos ayudará a determinar si es necesario el realizar estudios de sismicidad y la carga que podemos ejercer sobre el mismo, así como el grado de

compactación que se podrá dar a los residuos, así mismo determinaremos la existencia de fallas.

El mapa de principales tipos de suelo publicado en 1999 por el INEGI nos da una representación de la distribución de los tipos de suelo que hay en la República Mexicana, la cual fue elaborada bajo la base referencial mundial del recurso suelo de la FAO (WRB por sus siglas en inglés). El mapa se muestra en la Figura 24.

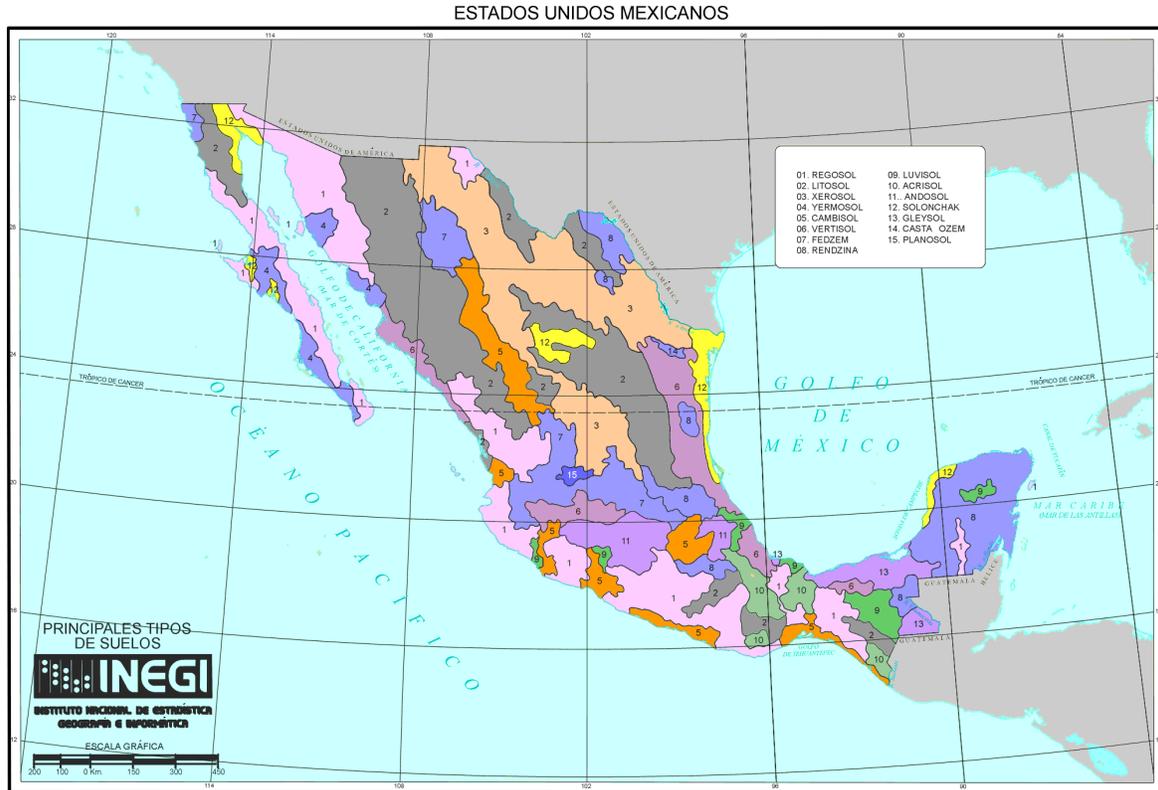


Figura 24. Carta de suelos dominantes de la República Mexicana

Fuente: Mapa de principales tipos de suelos, escala 1:4000000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. INEGI, 1999

En la Tabla 8 se describen los distintos tipos de suelo de la República Mexicana que muestra la Figura 24, así como sus especificaciones, las cuales ayudarán a complementar el estudio geotécnico.

Tabla 8. Tipos de suelos presenten en el territorio de la República Mexicana

Tipos de Suelo			
No.	Tipo de Suelo	Símbolo	Especificaciones
1	Regosol	RG	Tipo de suelo que se encuentra cubierto por un manto de alteración. Presente en cualquier zona sin permafrost.
2	Litosol (Leptosol)	LP	Tipo de suelo con un espesor muy delgado poco atractivo para el cultivo.
3	Xerosol	SN	Tipo de suelo de regiones secas con cantidades muy variables de materia orgánica. Tienen generalmente una capa superficial clara y delgada, debajo de ella puede haber acumulación de minerales arcillosos y/o sales.
4	Yermosol	Y	Tipo de suelo de regiones desérticas con pocas cantidades de materia orgánica. Tienen generalmente una capa superficial clara y delgada debajo de ella puede haber acumulación de minerales arcillosos y/o sales.
5	Cambisol	CM	Tipo de suelo con fertilidad media y propensa a la erosión.
6	Vertisol	VR	Tipo de suelo de color negro, con contenido de arcilla expansiva (montmorillonita).
7	Phaeozem (Fedzem o Faozem)	PH	Tipo de suelo con una alta acumulación orgánica y de gases en su superficie.
8	Rendzina	E	Tipo de suelo con menos de 50 cm. de espesor que están encima de rocas duras ricas en cal. La capa superficial es algo gruesa, oscura y rica en materia orgánica y nutrientes.
9	Luisol	LV	Tipo de suelo en el que la arcilla fue filtrada para colocarse en la parte profunda del suelo y está limpia de arcilla en la superficie. Presentes en glaciales, aeólicos y aluviales.
10	Acrisol	AC	Tipo de suelo con características muy ácidas, procedentes de la arcilla alterada.

Tipos de Suelo			
No.	Tipo de Suelo	Símbolo	Especificaciones
11	Andosol	AN	Tipo de suelo de origen volcánico, oscuro y muy poroso.
12	Solonchak	SC	Tipo de suelo con alta concentración salina, permanente o estacionalmente inundadas.
13	Gleysol	GL	Tipo de suelo con mal drenaje de agua, por lo que tienden a tener acumulaciones de agua.
14	Kastan□ozem (Casta Ozem)	KS	Tipo de suelo color pardo oscuro, muy orgánico y asociado a climas cálidos.
15	Planosol	PL	Tipo de suelo llano, que presenta inundaciones en ciertas estaciones.

Fuente: Elaboración propia adaptada de datos de la Carta edafológica: escala 1:250000 catálogo de símbolos con base a la WRB (por sus siglas en inglés) / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. INEGI, 2017

4.6. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Este estudio granulométrico se empleará en el análisis que se realice al material térreo que se empleará para las capas de cobertura que cubrirán los residuos conformados, y en caso de que el proyecto ejecutivo lo determine, se empleará para la capa sello a base de material térreo.

Para este estudio es recomendable conocer el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) incluyendo su identificación y descripción, para ello en la Tabla 9, se encuentra la clasificación realizada por Casagrande, ya que, si bien los análisis se hacen en laboratorio, servirá para dar una idea previa de si es factible o no el uso del material que compone el suelo.

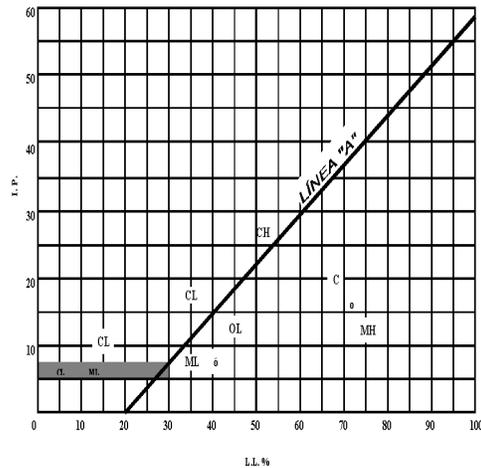
Este tipo de análisis consiste en separar y clasificar el material que conforma el suelo por tamaños de partículas. A partir de la distribución de los granos se puede determinar la graduación del material, un material bien graduado tiende a comportarse con una alta impermeabilidad; una cantidad del 10% de partículas menores que pasa a través de la malla No. 200 en arenas y gravas, representa un suelo altamente impermeable.

Los suelos gruesos cuando carecen de finos son suelos con alta permeabilidad. A medida que una arena se hace más fina y uniforme decrece en manera considerable su permeabilidad.

Tabla 9. Sistema Unificado De Clasificación De Suelos (S.U.C.S.)

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ⊕	Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No.200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE ½ cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GW Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	DETERMINESE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla No. 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos del 5%: GW, GP, SW, SP; más del 12%: COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA CC: entre 1 y 3. NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW. LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7. Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles. $Cu = D_{60} / D_{10}$ mayor de 6; $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ entre 1 y 3. No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4. Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7. Frontera que requieren el uso De símbolos dobles.
			GP Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	
			GM * Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	
			SM * Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla	
			GC Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla	
			SW Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	
			SP Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	
			SM * Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	
			SC Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.	
			SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 ⊕	
CL Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.				
OL Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.				
MH Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos				
CH Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.				
OH Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.				
P Turbas y otros suelos altamente orgánicos.				
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS				

CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)



⊕⊕ CLASIFICACIÓN DE FRONTERA – LOS SUELOS QUE POSEAN LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS GRUPOS SE DESIGNAN CON LA COMBINACIÓN DE LOS DOS SÍMBOLOS; POR EJEMPLO, GW–GC, MEZCLA DE ARENA Y GRAVA BIEN GRADUADAS CON CEMENTANTE ARCILLOSO.

⊕ TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD.

* LA DIVISIÓN DE LOS GRUPOS GM Y SM EN SUBDIVISIONES d Y u SON PARA CAMINOS Y AEROPUERTOS ÚNICAMENTE, LA SUB-DIVISIÓN ESTA BASADA EN LOS LÍMITES DE ATTERBERG EL SUFLUJO d SE USA CUANDO EL L.L. ES DE 28 O MENOS Y EL I.P. ES DE 6 O MENOS. EL SUFLUJO u ES USADO CUANDO EL L.L. ES MAYOR QUE 28.

Fuente: elaboración propia adaptada de la clasificación de Casagrande del libro de *Mecánica de Suelos*. 2005. Juárez Badillo, & Rico Rodríguez. p.p.195

4.7. PERMEABILIDAD DEL SUELO

La permeabilidad en el suelo es la facilidad con la que un líquido pasará a través de los poros y vacíos que se tengan en la estructura del suelo, esta característica los clasificará como suelos permeables o impermeables. Esta permeabilidad está dada por el tamaño de la partícula que conforma la estructura del suelo.

En la Tabla 10 se presentan los coeficientes de permeabilidad que encontraremos en los distintos tipos de suelo, basado en la clasificación de Casagrande.

Tabla 10. Coeficiente de permeabilidad de suelos

Coeficiente de Permeabilidad de Suelos			
Tipo de Suelo	Grado de Permeabilidad	Coeficiente de Permeabilidad k (cm/s)	Capacidad Drenante
Grava Limpia	Alto	1×10^{-1}	Buena
Arena Limpia	Medio	1×10^{-3}	Buena
Grava Arenosa	Medio	1×10^{-3}	Buena
Arena Fina	Bajo	1×10^{-3} a 1×10^{-5}	Franca pobre
Limos	Bajo	1×10^{-3} a 1×10^{-5}	Franca pobre
Arena limo arcillosa	Muy bajo	1×10^{-1} a 1×10^{-7}	Pobre, prácticamente imperceptible
Arcilla homogénea	Muy bajo a prácticamente impermeable	$< 1 \times 10^{-7}$	Prácticamente imperceptible

Fuente: elaboración propia adaptada del libro de Mecánica de Suelos. Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso., México: Limusa, 2005. p.198.

Como se puede observar, dependiendo del tipo de suelo que se tenga en el sitio, este es determinante para el diseño de los sistemas de captación de lixiviado, estos sistemas de los métodos de captación se diseñarán con el objetivo de captar la mayor cantidad de lixiviado existente en el sitio, ya sea para evitar y frenar los escurrimientos, así como para reducir o evitar las infiltraciones y con ello darles un tratamiento adecuado.

4.8. CONDICIONES DE MONITOREO SÍSMICO

Esta condición de monitoreo sísmico se podrá y deberá aplicar en sitios de disposición final (SDF) regulares o irregulares que posean alturas mayores a 8.00 m en el que se vaya a realizar la clausura ambiental y se encuentre en una zona altamente sísmica, o que presente indicios de fallas ocasionadas por movimientos telúricos de los que se tenga evidencia o registro histórico, esto se podrá identificar con cartas geológicas y registros del Sistema Sismológico Nacional (SSN), además de realizar estudios del comportamiento dinámico del sitio.

En este estudio se realiza el monitoreo del movimiento que producen las ondas sísmicas antes y después de su propagación. Para esto se deben colocar sensores en el subsuelo, lo que significa hacer una serie de perforaciones para la instalación de sensores a diferentes profundidades en un sitio de terreno natural apartado de la estructura del sitio, de tal modo que se pueda monitorear el comportamiento de la onda sísmica en los diferentes estratos hasta su llegada a la superficie del terreno. Se deben también instalar sensores sobre la estructura o celda de confinamiento de residuos del sitio a diferentes alturas, para con esto poder hacer la evaluación de la amplitud de la onda y su movimiento sísmico al propagarse por la estructura.

Las estaciones de registro serán las encargadas de guardar la información sísmica del sitio. Estas estaciones generalmente están equipadas por una antena GPS (Sistema de Posicionamiento Global), un sistema que registra las ondas sísmicas y acelerógrafos que van colocados a una profundidad que pueden llegar hasta los 100 m.

4.9. ESTUDIO GEOFÍSICO AMBIENTAL

Es recomendable la realización de un estudio de geofísica ambiental en el cual se incluya un modelo geofísico y un modelo geoelectrico, estos modelos arrojarán características relevantes del sitio como la resistividad y capacidad de carga del suelo; para el caso los residuos confinados puede arrojar características como el espesor y la saturación, además de mostrar las zonas con filtración, escurrimientos y estancamientos de lixiviados, así como las zonas con concentración y generación de biogás y las zonas con materiales de relleno, lo cual ayuda a que con base a estos resultados se pueda diseñar el sistema de control y monitoreo de biogás y lixiviado. Este estudio puede ser recomendable para los sitios de disposición final (SDF) a clausurar o sanear,

sean estos sitios controlados (SC) o vertederos a cielo abierto (VCA) o sitios no controlados (SNC).

Es recomendable que para este estudio se realicen tomografías eléctricas con configuración electródica para elaborar un corte geoelectrico, que genere un modelo de capas a través de líneas geofísicas que muestren las elevaciones, profundidad y espesor tanto de los residuos confinados como de los horizontes de composición del suelo y subsuelo, y las zonas con presencia de biogás y lixiviado,

4.10. ANÁLISIS DE LIXIVIADO Y BIOGÁS

Para el proceso de elaboración del proyecto de clausura ambiental de un vertedero a cielo abierto o sitio no controlado, es necesaria la realización de ciertos análisis fisicoquímicos en muestras de diversa índole tomadas en el sitio de disposición final, consistentes en lixiviados, biogás y agua subterránea.

El muestreo y análisis de lixiviados permitirá obtener una caracterización particular de éstos en el sitio donde fueron generados, lo cual a su vez servirá como información básica para determinar si es necesario su tratamiento y, en su caso, el tipo de tratamiento a implementar.

La caracterización del biogás permitirá conocer la composición de este gas, estableciendo los elementos y compuestos que lo conforman y, por lo tanto, el nivel de riesgo presente en el sitio debido a este elemento, incluyendo la eventual presencia de vapores orgánicos tóxicos en el biogás. Esta información es necesaria para definir el sistema de control ya sea por destrucción térmica pasiva o activa, o para un potencial de aprovechamiento del biogás, así como para establecer las bases de diseño de los sistemas de captación y control del mismo.

4.11. ANÁLISIS DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS DEPOSITADOS EN LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL

4.11.1. ANÁLISIS ESTEQUIOMÉTRICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Este tipo de análisis se puede realizar con el objetivo de obtener la caracterización de los residuos ya depositados, el grado de degradación y el factor de emisiones que genera el sitio clausurar, este último ayudará a la toma

de decisiones en cuanto a la proyección de la instalación del sistema de control y monitoreo de biogás, ya que, en caso de realizar este análisis, ayudará en base al factor de emisiones a determinar con una mejor precisión esta parte del proyecto, determinando la instalación de un sistema de destrucción pasiva o activa, o la posibilidad del aprovechamiento del biogás.

Para este análisis se debe realizar el muestreo de los residuos depositados mediante la extracción de corazones, considerando que en caso de que se trate de sitios no controlados la técnica de extracción de corazones será compleja debido a la falta de compactación de los residuos, por lo que se pueden sustituir la extracción de corazones con la toma de muestra por calas realizadas a través de una excavación de 1 m³ prosiguiendo mediante el procedimiento de cuarteo a la obtención de la muestra. Para el caso de sitios controlados que tengan una compactación mínima se podrá realizar la extracción de corazones de los residuos confinados. Una vez tomadas estas muestras de residuos se deberán llevar a laboratorio para la realización del análisis.

Con base a los resultados del análisis se sabrá el tipo y porcentaje de cada tipo residuo (subproducto), el porcentaje de fracción orgánica e inorgánica depositada y su nivel de degradación, así como también el porcentaje de humedad y la masa de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno (CHON) contenida en los residuos. Una vez conociendo estos compuestos se podrá determinar las fracciones volumétricas de CO₂ y CH₄, lo que dará como resultado la cantidad de emisiones generadas por los residuos confinados y por ende el potencial de generación de biogás.

4.11.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN SITIO

La caracterización de los residuos es un análisis de la composición, cuantificación de subproductos y peso volumétrico de las fracciones que componen a la totalidad de residuos sólidos urbanos generados por una población. Esta caracterización en caso de realizarla determinará el tipo de residuos que se ha depositado en el sitio de estudio y también con el conocimiento de la composición de los residuos se podrá determinar la generación de biogás desde el inicio de operación del sitio y proyecciones a futuro; este cálculo se puede realizar con la aplicación del Modelo Mexicano de Biogás, elaborado por la USEPA.

La realización de esta caracterización tiene dos objetivos, el primero, conocer la composición del residuo, así como sus subproductos y, el segundo, el potencial de generación de biogás. Para ambos debe realizarse un muestreo *in situ* y aplicar los procedimientos que indica la siguiente normatividad:

Norma Mexicana NMX-AA-15-1985. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Muestreo-Método de Cuarteo.

Norma Mexicana NMX-AA-19-1985. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Peso Volumétrico "*IN SITU*".

Norma Mexicana NMX-AA-22-1985. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales establece la selección y el método para la cuantificación de subproductos contenidos en los Residuos Sólidos Municipales.

La caracterización de residuos adquiere una gran relevancia en el caso de que el proyecto tenga como objetivo la rehabilitación de un sitio de disposición final, dado que ayudará a estimar la vida útil del sitio con el volumen de residuos a disponer considerando los resultados que arroje el estudio y con una visión de aprovechamiento de residuos valorizables y así disminuir el porcentaje de los residuos a confinar, mejorándose la densidad que se dará en el proceso de compactación y conformación del sitio.

5. PROCESOS OPERATIVOS

5.1. ACONDICIONAMIENTO DE RESIDUOS

En los sitios de disposición final irregulares denominados vertederos a cielo abierto (VCA) o sitios no controlados (SNC), no se tiene ningún control en cuanto al área definida donde se habrá de depositar los residuos, por lo que es común encontrarse con una dispersión de residuos por toda el área que abarca el sitio. Por otro lado, aunque se llegue a tener un control de la definición de zonas de tiro, los residuos dispuestos carecen de una compactación adecuada, lo que se refleja en impactos ambientales negativos, tales como una elevada que facilita la filtración del agua pluvial generando una lixiviación, dando como consecuencia la presencia y el aumento en la generación de lixiviados, mismos que al llegar a la base del sitio, se presentará el escurrimiento o la infiltración de estos al suelo y subsuelo. En sitios con alturas de más de 4.00 m se incurre en el riesgo de un deslizamiento de residuos que traería consigo riesgo para las poblaciones cercanas y pepenadores que seleccionan materiales, entre otros. De todo lo anterior, el plan de trabajo de clausura ambiental considera la conformación y nivelación del sitio.

Dentro de los trabajos de acondicionamiento de residuos, se debe ubicar y delimitar la zona donde se concentran los residuos, para lo cual es necesario realizar trabajos de empuje de residuos con el apoyo de maquinaria, preferentemente *bulldozer*. Una vez que se haya determinado el punto de concentración de los residuos, se deberá determinar la altura a la que se desea llegar con una estabilidad segura, definiendo el número de bermas y taludes que se construirán con base en el proyecto ejecutivo, siguiendo las recomendaciones de la clasificación del sitio en la sección “Clasificación de los Sitios No Controlados” y tomando en cuenta alturas máximas de taludes de 5 metros y la construcción de bermas se establezca con un ancho entre 7.00 a 10.00 metros.

5.2. CORTE Y EMPUJE DE RESIDUOS

Este trabajo debe ser realizado con *bulldozer* de tipo oruga o catarina flotante con un peso mínimo recomendable de 22 toneladas; pueden poseer cuchilla topadora modificada para evitar la volcadura de los residuos hacia el área del motor, o con cuchilla topadora sin modificar cuidando la capacidad de empuje de ésta y del equipo. Los equipos mencionados deben contar con guardas laterales y frontales para la protección del motor. El uso de estos equipos también depende de la experiencia y habilidad de los operadores.

Cabe señalar que los residuos, al tener largos periodos de tiempo depositados, empiezan a sufrir asentamientos y a obtener una compactación de manera natural, por lo que tales factores de composición y compactación generarán una humedad interna en los residuos, esto aumentará su densidad y dificultará las actividades de corte y empuje de los mismos, así mismo este factor de humedad favorecerá a lograr un grado alto compactación en las áreas de concentración, confinamiento y conformación final.

Para llevar a cabo el empuje de los residuos, se debe realizar, antes que todo, el descopete² de residuos hasta alcanzar el nivel base de trabajo establecido para iniciar con el empuje y acarreo de los mismos, procedimiento que se hace con la cuchilla frontal del bulldozer, elevándola a una altura aproximada de 0.20 metros del nivel de piso de trabajo, de forma que los residuos son acarreados hasta las estaciones de acumulación o zonas de conformación. Como los acarreos de residuos no pueden ser mayores a 50.00 metros, se establecerán estaciones cada 50.00 metros o menos con el objetivo de hacer más eficiente el rendimiento de los equipos.

Corte, Empuje y Acarreo de Residuos

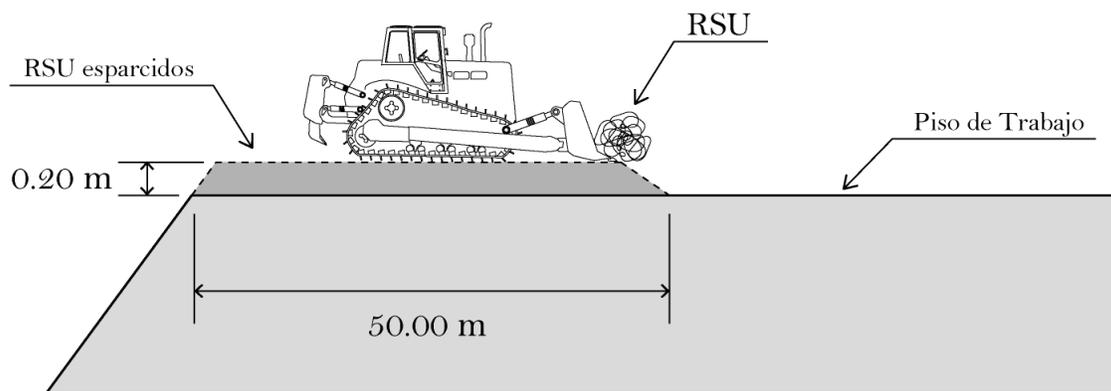


Figura 25. Diagrama de corte, empuje y acarreo de residuos

Fuente: elaboración propia

² Descopete. – Es la actividad o acción de reducir altura a un montículo de material térreo, rocoso o residuos que este únicamente acumulado y tenga un ángulo de reposo propio del material, dicha actividad se realiza con maquinaria que este equipada con cuchilla topadora (bulldozer) para reducir la altura y pueda ser empujado el material con mayor facilidad.

5.3. CONFORMACIÓN Y COMPACTACIÓN DE LOS RESIDUOS

Una vez acumulados los residuos en la zona de confinamiento se realizará la conformación y compactación de los mismos, el cual se inicia acomodando los residuos de la forma que indique el proyecto, para posteriormente iniciar la compactación de los mismos en la forma como se indica en este manual.

La conformación de los residuos incluye la compactación de los mismos y se realizará por áreas y niveles establecidos en los proyectos. Para estas tareas, se establecerán tres métodos de trabajo, tomadas de los métodos de operación de rellenos sanitarios: método de área, método de zanja, o método combinado.

La nivelación realizada en la conformación se hace con la finalidad de optimizar materiales de cobertura. Para lograrlo se bandearán los residuos ya conformados con bulldozer sobre orugas en sentido transversal las veces que sean necesarias, siendo recomendable de 4 a 5 pasadas, con un traslape de huella de 1/4 (un cuarto) del ancho de la zapata, y se deberá tener una tolerancia de más de 0.10 m y menos de 0.05 m, alcanzando una superficie sensiblemente uniforme. Estas actividades deberán realizarse tanto en taludes, bermas y plataformas.

Traslape de Huella (Compactación de Residuos)

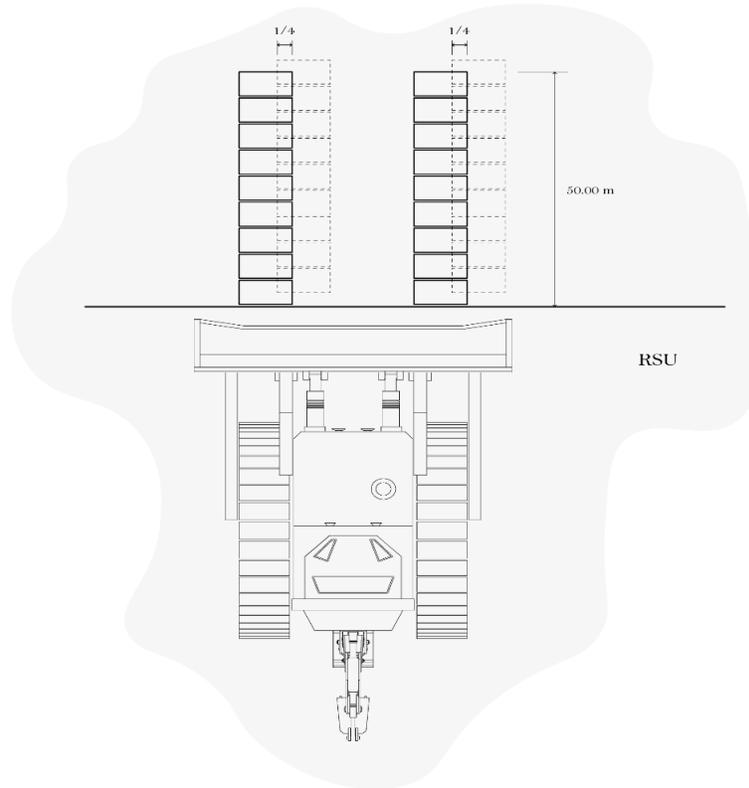


Figura 26. Diagrama de traslape de huella de bulldozer en la compactación de residuos

Fuente: elaboración propia

5.3.1. MÉTODO DE ÁREA

Este método se aplicará cuando el sitio se encuentre en un terreno plano y los residuos estén dispuestos en forma de montículos irregulares. Así, los residuos se conformarán y compactarán respetando las alturas y pendientes recomendadas para los taludes.

En este método, el bulldozer trabajará los residuos de forma ascendente. Esto quiere decir que iniciará la conformación de los residuos de abajo hacia arriba delimitando el pie y hombro de talud hasta la altura proyectada, llevando los residuos excedentes hasta la plataforma superior donde se realizará el extendido, conformación y compactación de los mismos. Para dar inicio a este procedimiento se deberán tener los residuos cortados y abundados, para que el bulldozer pueda empujarlos de forma ascendente, llegando hasta el hombro

del talud de la zona donde se esté trabajando, y se repetirá la operación hasta formar una capa uniforme de residuos.

La forma en que el equipo irá empujando los residuos será el mismo mencionado en el apartado *Corte y Empuje de Residuos*, adicionando que el bulldozer irá esparciendo los mismos a lo largo del recorrido en capas de no más de 0.60 m, llegando al punto final con una mínima cantidad de residuos. Para lo anterior, el bulldozer deberá traslapar un cuarto de huella de la zapata para realizar la compactación de los residuos.

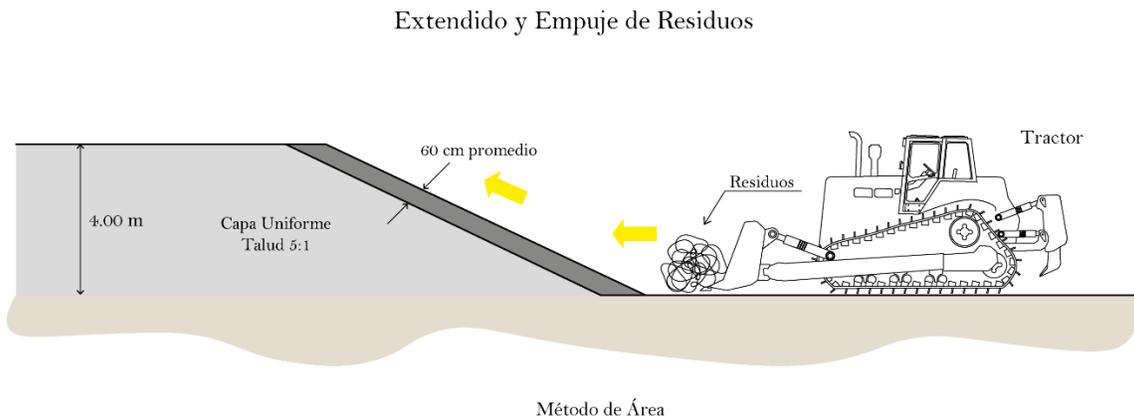


Figura 27. Diagrama de extendido y empuje de residuos por método de área
Fuente: elaboración propia

5.3.2. MÉTODO DE ZANJA

Este método se utiliza en sitios con terrenos accidentados o en sitios que estén en una barranca o depresión. Para este método el sistema de trabajo será de forma descendente. El bulldozer iniciará los trabajos de la parte superior a la inferior, generándose una capa estable que le permita continuar con los trabajos (conformación de bermas y taludes), conformando una zona de rodamiento o cama estable para evitar que el equipo se embanque (atasque) o deslice, lo cual es altamente probable, dado que se trata de sitios sin grado de compactación alguno.

Para este método, el bulldozer primero deberá realizar el corte de los residuos definiendo el hombro del talud mientras desciende con los residuos cortados hasta el pie del mismo, repitiendo la operación hasta formar una capa uniforme, y respetando las pendientes recomendadas y establecidas en el proyecto.

Una vez alcanzados los niveles finales, se deberá realizar la compactación de los residuos al grado de que *el bulldozer* pueda transitar con facilidad para el empuje de los residuos restantes y su conformación final, debiendo realizar un bandeo en sentido transversal las veces que sean necesarias, con el traslape de huella de 1/4 del ancho de la zapata, y siempre respetando los niveles de tolerancia de entre 0.10 y 0.05 m para la recepción del material de cobertura o para la conformación de bermas y taludes.

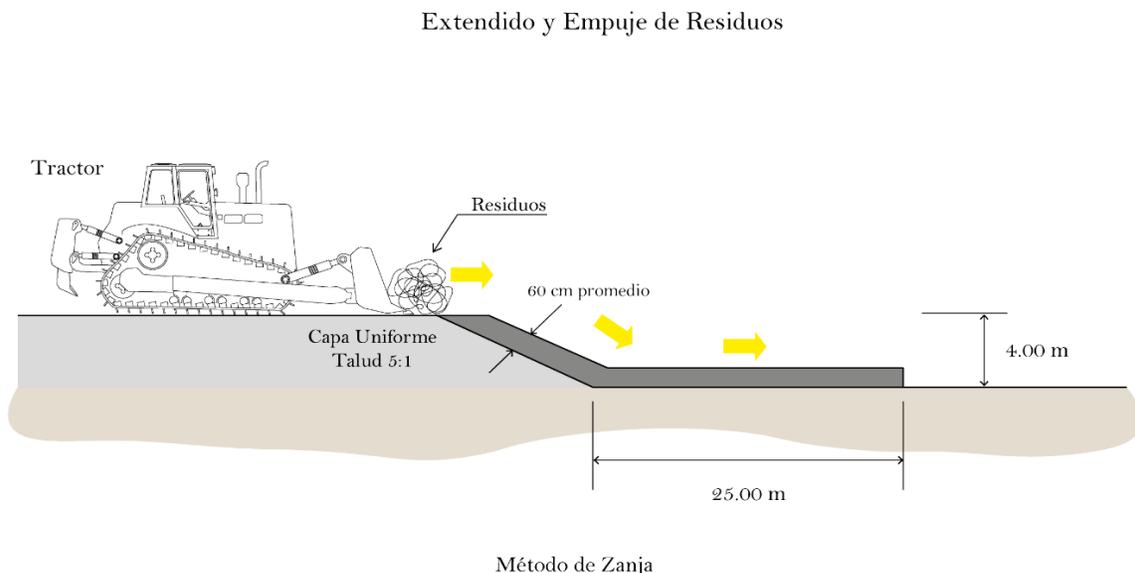


Figura 28. Diagrama de extendido y empuje de residuos por método de zanja

Fuente: elaboración propia

5.3.3. MÉTODO COMBINADO

Habrá casos donde se requiera una combinación de métodos, como cuando el sitio de disposición final se encuentre en terrenos accidentados o mixtos, o aquellos en los que al llegar al grado de compactación de las zonas bajas aún queden residuos en las zonas superiores y deba implementarse el método de área, con el cual se construir  otro u otros niveles que irán de la base 0.00 m del terreno a la altura proyectada. No debe olvidarse la altura recomendada de 4.00 m para los taludes, con pendientes con proporción de 3:1 (horizontal-vertical).

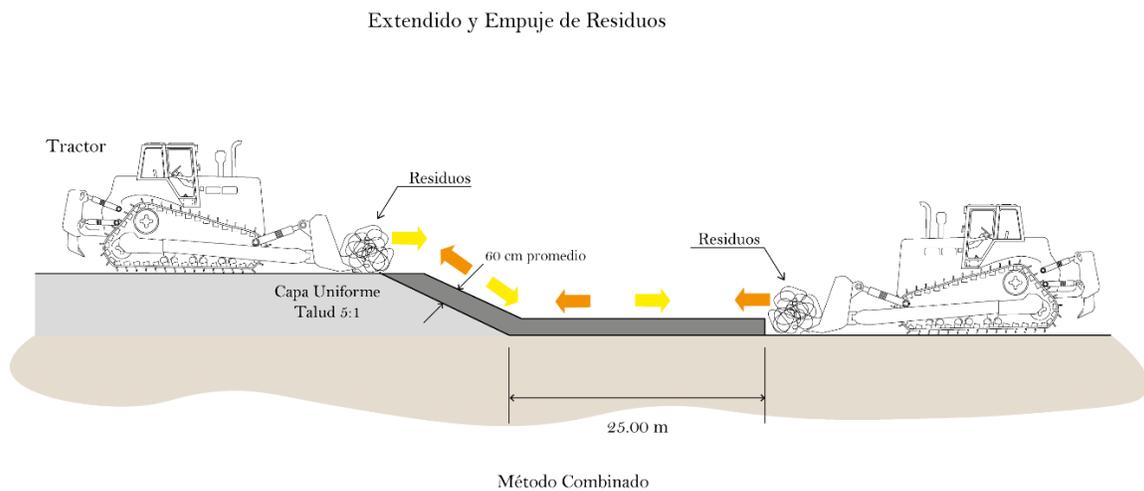


Figura 29. Diagrama de extendido y empuje de residuos por método combinado

Fuente: elaboración propia

5.4. TALUDES

La construcción de estas estructuras se realizará a través de la conformación de los residuos, con el método que se haya establecido en el proyecto, hasta alcanzar los niveles finales determinados. Para una mejor compactación y estabilidad de los residuos los taludes se podrán trabajar con una pendiente 5:1 y terminarlos siempre con una inclinación 3:1 (horizontal-vertical).

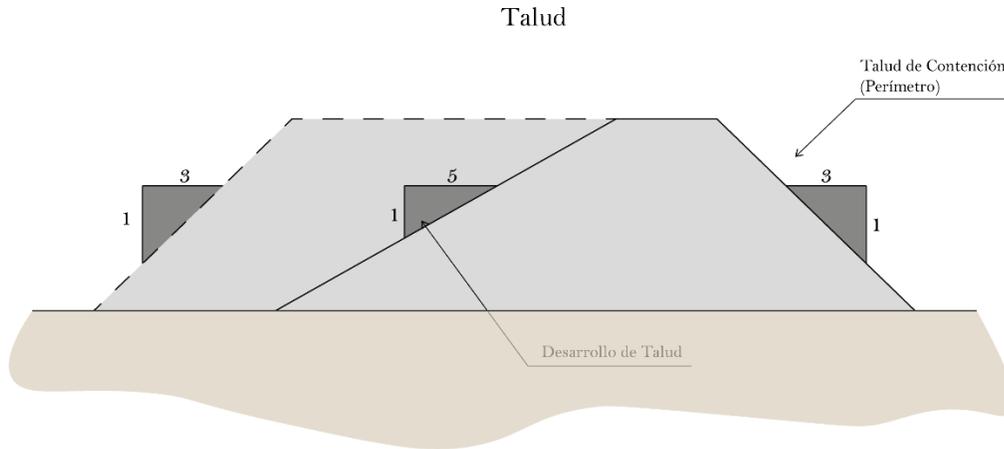


Figura 30. Diagrama de configuración de taludes

Fuente: elaboración propia

En el proceso de construcción de taludes, independientemente de la altura del sitio, se iniciará con la preparación de la superficie mediante un talud corrido de la altura máxima al nivel cero (0.00), con el objetivo de dar estabilidad al sitio e iniciar con la construcción o conformación de los demás taludes.

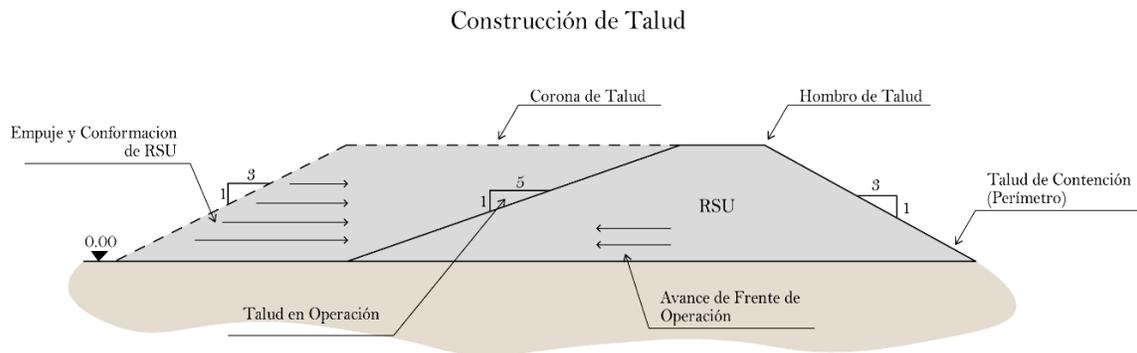


Figura 31. Diagrama de método de construcción de taludes

Fuente: elaboración propia

Con relación a los criterios para el diseño y configuración de taludes de los SNC, pueden realizarse estudios geotécnicos sobre los residuos ya depositados, los cuales formarán la estructura de los taludes. Entonces, y con base en los datos obtenidos, se podrá determinar la configuración de los taludes.

Los residuos que llevan un mayor tiempo depositados tienen una mayor densidad debido a la consolidación por tiempo de depósito, lo que representa una resistencia a la compactación futura, sin embargo, esta característica lo convierte en una buena base para el desplante y construcción de estructuras nuevas de taludes y bermas. Así mismo, la presencia de lixiviados es mayor en los residuos de reciente disposición que en aquellos residuos con mayor tiempo de permanencia en el vertedero a cielo abierto (VCA) o sitio no controlado (SNC).

Ante la falta de estudios particulares y específicos para la configuración de taludes en el sitio de disposición final (SDF) a clausurar, este manual establece criterios generales recomendados que derivan de la correlación empírica, en los que establece que, los taludes sean de una pendiente 3:1 (horizontal-vertical). Lo antes dicho quiere decir que la inclinación del talud será de tres veces la altura del mismo. Por cuestiones de estabilidad, se establece una altura máxima de talud de 5.00 metros, con una altura idónea de 4.00 metros y con un desarrollo de talud de 10.00 a 12.00 metros.

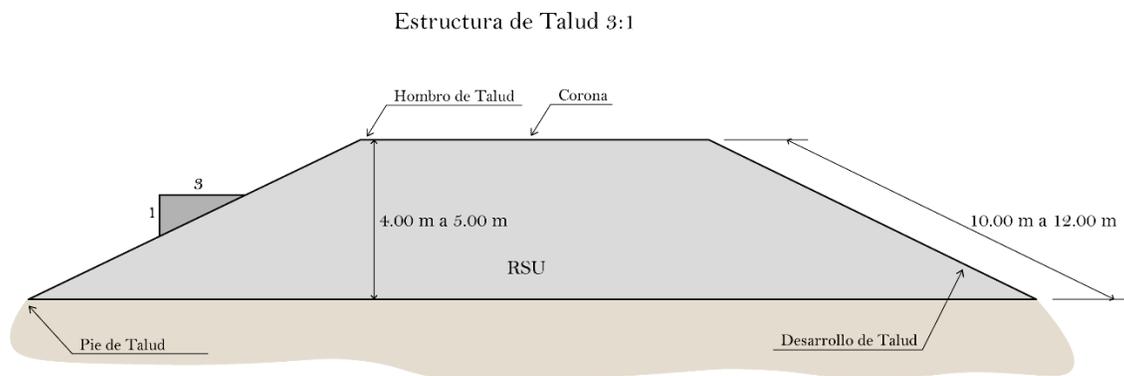


Figura 32. Diagrama de configuración de talud proporción 3:1
Fuente: elaboración propia

En taludes con pendientes de 2:1 o 2.5:1 (horizontal-vertical), se recomienda una altura de 4.00 metros y un desarrollo de talud de 11.00 metros.

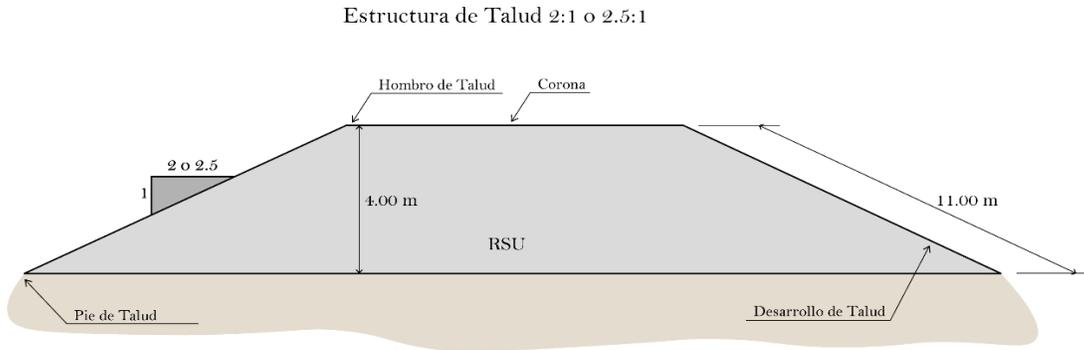


Figura 33. Diagrama de configuración de talud proporción 2:1 o 2.5:1
Fuente: elaboración propia

5.5. BERMAS

Las bermas son estructuras que permiten mitigar los puntos de falla de desplazamiento de los taludes. Esta plataforma se complementa con el talud, ya que interrumpe la continuidad de éste al favorecer la estabilidad estructural. La berma es considerada como una superficie horizontal con una pequeña pendiente al pie del talud. El ancho de esta estructura se recomienda sea de entre 7.00 y 10.00 metros.

Así mismo, dependiendo de la configuración del proyecto, las bermas se pueden emplear como caminos secundarios o principales dentro del sitio de disposición final (SDF), así mismo podrán albergar la infraestructura hidráulica para el desalojo de las aguas pluviales y conservación de la estructura.

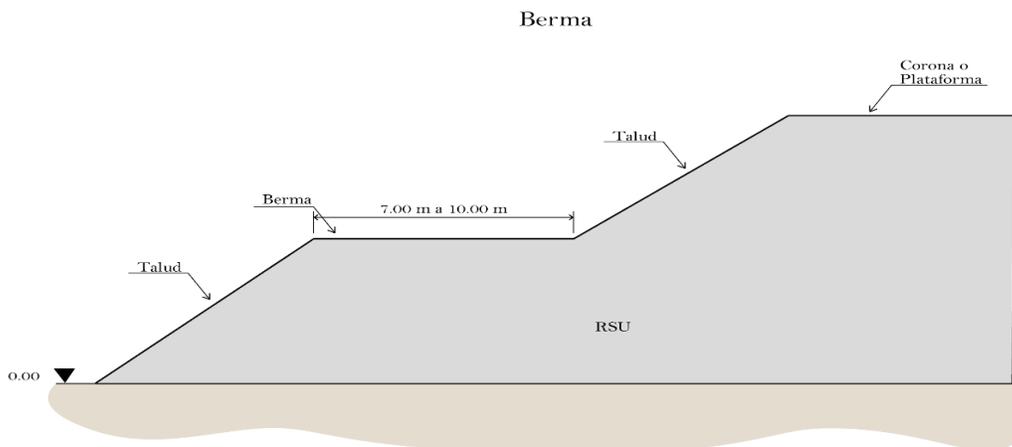


Figura 34. Diagrama de configuración de berma
Fuente: elaboración propia

5.6. PLATAFORMA

Una vez estabilizado el sitio, conformados y compactados los residuos en los taludes y las bermas, se tendrá que realizar la conformación y compactación de la plataforma final. En esta estructura se realizará el esparcido y empuje final de los residuos por sobre toda el área de la plataforma, en capas de un promedio de 0.60 m, en un rango de 0.20 m mínimo a 0.60 m máximo de espesor, y de una manera uniforme, de modo que el bulldozer vaya empujando los residuos y depositándolos sobre la superficie de la plataforma con acarreos y recorridos no mayores a 50.00 m.

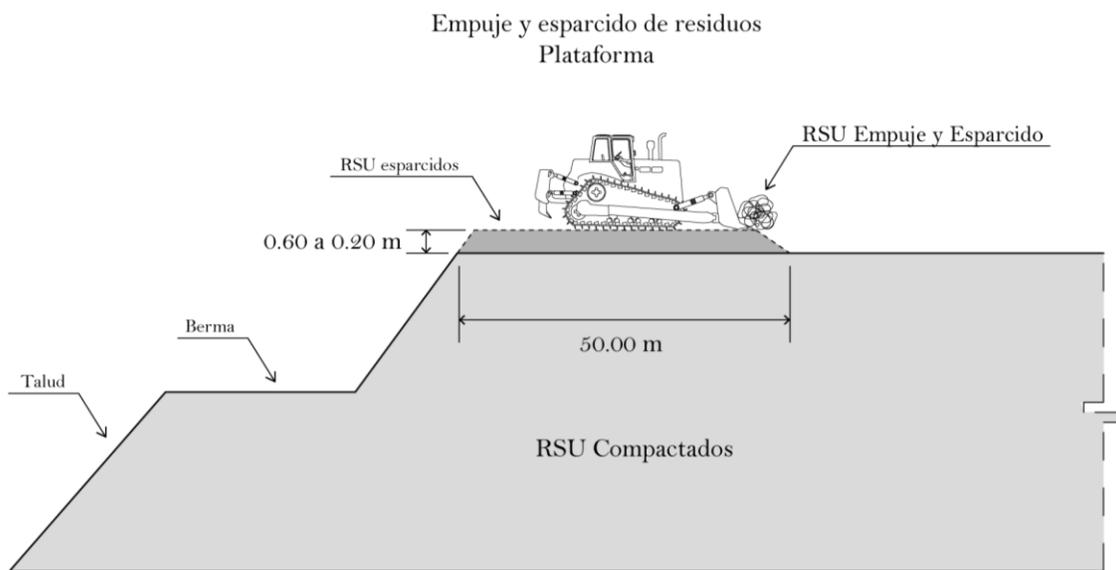


Figura 35. Diagrama de método de empuje y esparcido de residuos en plataforma

Fuente: elaboración propia

En esta etapa de la clausura y acondicionamiento de la plataforma superior del sitio, se deberán alcanzar los niveles finales indicados en proyecto, por lo que esto implica realizar un bandeado transversal las veces necesarias, con un traslape de huella de 1/4 del ancho de la zapata, y respetar las tolerancias en el espesor que será de más de 0.10 m y menos de 0.05 m, con la finalidad de lograr una superficie relativamente uniforme, dejándola preparada para la recepción de material de cobertura. De igual modo, sin dejar de respetar la conformación y los hombros de los taludes.

Traslape de Huella (Compactación de Residuos)

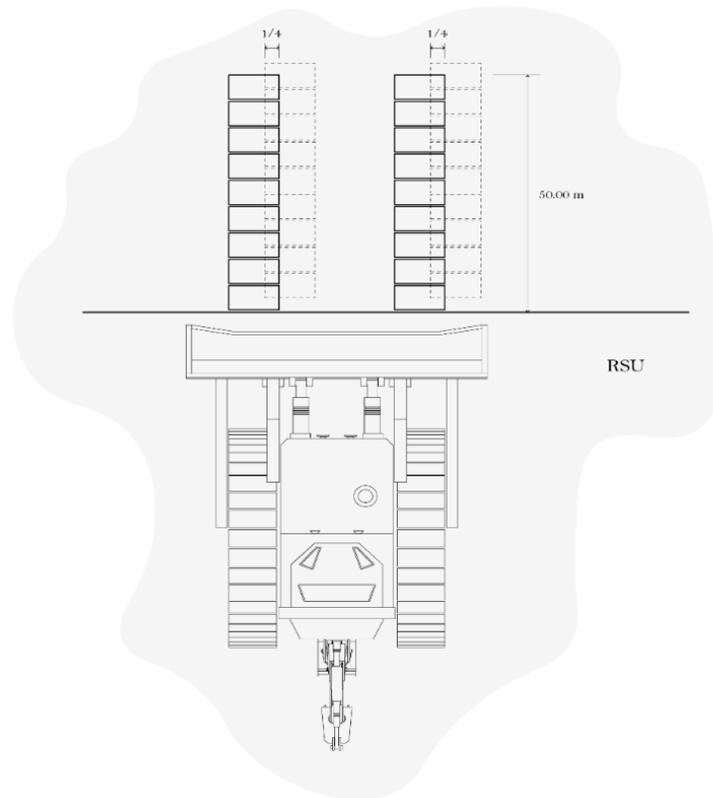


Figura 36. Diagrama de traslape de huella de bulldozer en la compactación de residuos en plataforma

Fuente: elaboración propia

A esta plataforma superior y final, se le deberá dar una pendiente que funcione para la evacuación del agua proveniente de las precipitaciones pluviales. La pendiente debe ser de al menos del 1% del centro de la plataforma a los hombros de los taludes perimetrales.

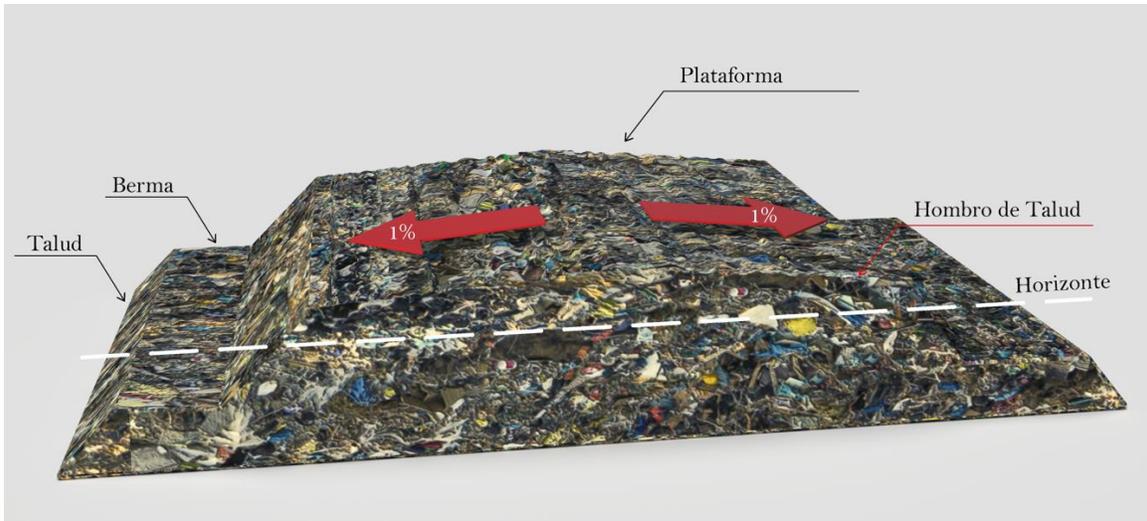


Figura 37. Diagrama de la configuración de un SDF con residuos compactados
Fuente: elaboración propia

6. SISTEMA DE SELLADO O SISTEMA DE CUBIERTA FINAL

En cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, en la que quedan recogidas las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, y en particular en su Apartado 9 “*Clausura del sitio*”, así como aludiendo al Apartado 9.1, “*Cobertura final de clausura*”, se debe garantizar el cumplimiento de los siguientes puntos:

- Se aíslen los residuos
- Se minimice la infiltración de líquidos en las celdas
- Se controle el flujo de biogás generado
- Se minimice la erosión
- Se brinde un drenaje adecuado

La fase de construcción de la cobertura final es probablemente una de las más significativas y cruciales en todo el proceso de clausura. De ello depende en gran medida, el eficiente control de los elementos que afectan al ambiente, como puede ser la formación de lixiviados, la cual está en relación directa con la precipitación pluvial, y de ello que una cobertura altamente impermeable sea indispensable ante la disyuntiva entre generar más lixiviados que son altamente contaminantes (cuya captación y tratamiento son difíciles y costosos), o resolverlo con una buena capa sello y un adecuado proyecto de canalización y descarga de aguas pluviales. Por otra parte, la baja permeabilidad de la cobertura es un excelente factor de eficiencia para los sistemas de captación de biogás.

Dentro de los requisitos de control, una de las legislaciones más estrictas es la de La EPA-California (California Environmental Protection Agency), la cual plantea criterios y requerimientos básicos de clausura para la construcción de cubiertas permanentes como a continuación se exponen:

- 1) La capa de sello debe construirse inmediatamente sobre la parte superior de una superficie de trabajo; esta superficie denominada capa base debe ser lo suficientemente firme para proporcionar un área de trabajo estable.
- 2) El espesor mínimo de la capa base es de 0.60 m. Debe construirse con material de relleno y encontrarse dentro de un intervalo de entre 95% y 98% de compactación relativa y de máxima densidad seca, determinada

mediante ensayos a realizar siguiendo especificaciones contenidas en ASTM D-698 (American Society for Testing and Materials)

- 3) La capa sello debe tener un mínimo de 30 cm y debe estar construida por un sello arcilloso con permeabilidad no superior a 1.0×10^{-6} cm/s
- 4) La capa sello debe ser protegida por una capa de protección para la erosión de al menos 20 cm de espesor y compactada a una densidad relativa no menor a 95%
- 5) La capa de erosión debe ser protegida por una cubierta vegetal, de al menos 10 cm de espesor o un estrato que permita el desarrollo vegetativo.
- 6) La superficie final debe ser cubierta por una capa de cobertura vegetal, que está formada con un pasto resistente de acuerdo con la zona de ubicación del relleno.

Puesto que todos los sitios de disposición final sufren asentamientos diferenciales, debido a la degradación natural de los residuos sólidos dispuestos, las cubiertas finales son expuestas a elementos naturales como vientos, lluvias y sequías. De lo anterior, surge la necesidad de que la cubierta final del sitio de disposición final (SDF) deberá conservarse en buenas condiciones mediante un programa de mantenimiento.

Las posibles grietas superficiales generadas por la condición de drenaje adverso originado por los asentamientos deben ser reparadas oportunamente. Se le debe dar mantenimiento a la cubierta vegetal para prevenir la erosión excesiva. Las madrigueras de animales deben ser selladas y se deben conservar limpios los canales de drenaje. La cubierta final debe ser protegida de las actividades humanas, excavaciones no autorizadas, el tráfico vehicular fuera de los caminos establecidos y asentamientos humanos ilegales.

El sistema de sellado o cubierta final estará conformado por las siguientes capas:

- Capa Base o Capa de Cobertura
- Capa Sello
- Capa de Erosión
- Cubierta Vegetal

Por tanto, para la selección y configuración del sistema de sellado se deberá tomar considerando como base los resultados que, de un estudio de balance

hídrico, el cual dé a conocerlos volúmenes de precipitación pluvial (lluvia media) y los periodos de retorno, así como la disponibilidad de material de la zona.

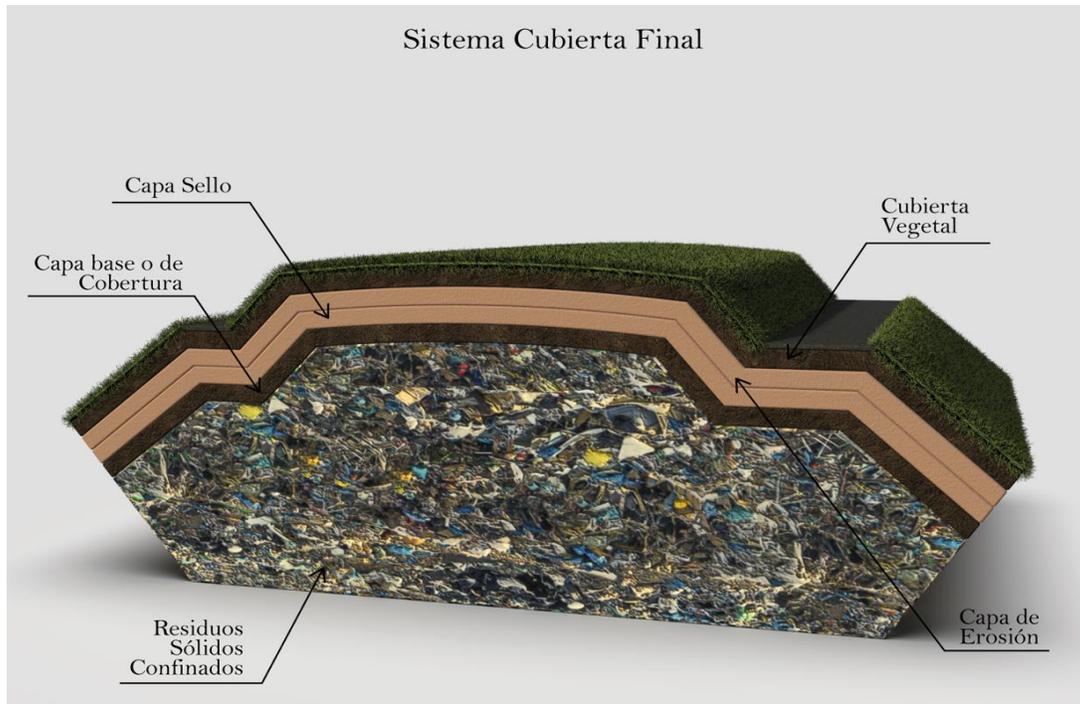


Figura 38. Diagrama del sistema de sellado o sistema de cubierta final
Fuente: elaboración propia

6.1. CAPA BASE O CAPA DE COBERTURA

La capa base o capa de cobertura es una capa que cumple la función de aislar los residuos, es por ello que se coloca sobre aquellos residuos ya compactados, con el objetivo de controlar la dispersión de los mismos, así como el contacto de fauna nociva con los residuos confinados. Esta capa debe ser lo suficientemente firme para proporcionar un área estable de trabajo que sirva para la construcción de las siguientes capas.

Esta capa de cobertura se puede construir con material natural o material sintético, o ambos, como lo indica la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003.

Para el caso del material térreo, y con fundamento en las recomendaciones de este manual, el material a utilizar para la construcción de esta capa base no requiere de características específicas, ya que puede emplearse el propio material de la zona, material de relleno o cualquier material apropiado que se tenga en el sitio, con la única condicionante de que este material debe lograr una compactación relativa recomendable de entre el 85% y 95% Próctor.

Para la construcción de la capa base también se recomienda un espesor que oscile entre 0.30 m a 0.60 m de material compactado tanto en plataforma, como en bermas y taludes. En caso de optar por un espesor de 0.60 m, se deberá construir en dos capas independientes de 0.30 m cada una.

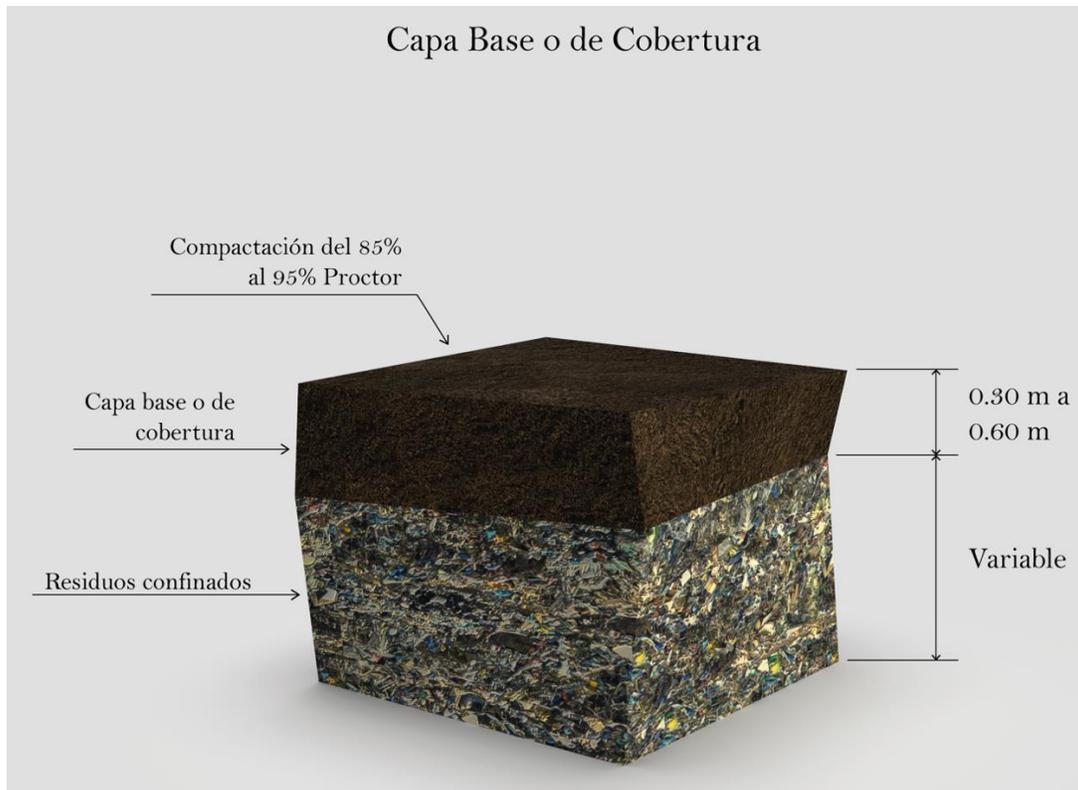


Figura 39. Diagrama de estratificación de capa base o de cobertura

Fuente: elaboración propia

Para la construcción de la capa base, una vez colocado el material en el sitio se realizará el extendido del mismo sobre los residuos sólidos conformados. Dicho procedimiento debe realizarse, preferentemente, en capas con un espesor promedio de 0.35 m de material abundado con equipo tipo bulldozer que pueda ser asistido por motoniveladora. Una vez extendido, se deberá aplicar la humedad necesaria para realizar la compactación y obtener una capa compactada al ámbito recomendado del 85% al 95% Próctor, y con un espesor final de 0.30 m, esto hasta alcanzar el espesor de 0.30 o 0.60 m, según se haya elegido en el proyecto. Para garantizar una buena superficie de drenaje y su gradiente, la pendiente debe ir del 1% al 3% del centro de la plataforma hacia los hombros de los taludes perimetrales. Es importante que la colocación del material sea en capas de 0.35 m abundado; con ello se asegura que la compactación recibida por el bulldozer dé como resultado una superficie firme para la construcción de la capa sello.

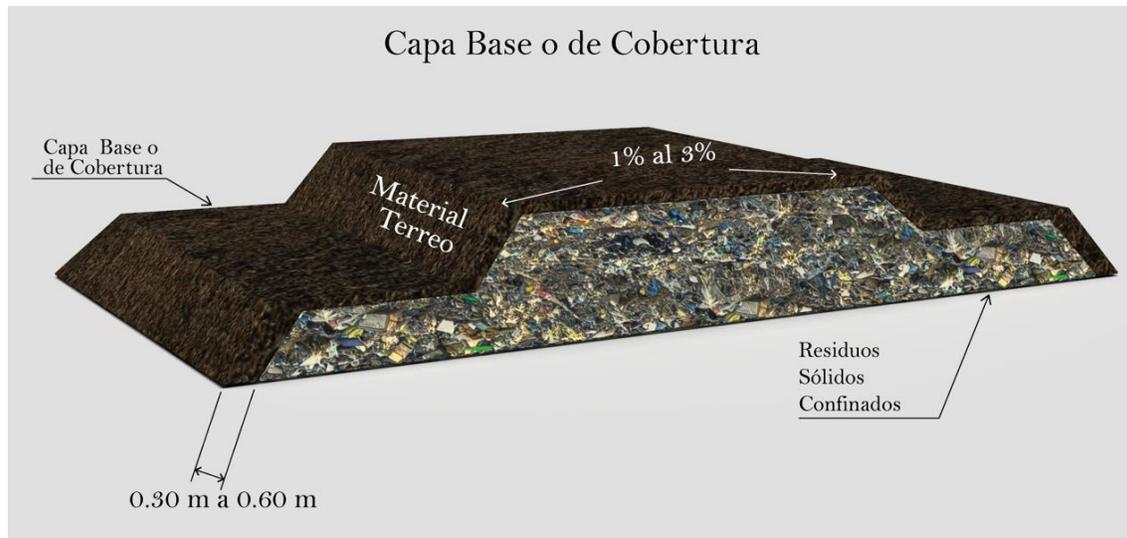


Figura 40. Diagrama de conformación de capa base o de cobertura

Fuente: elaboración propia

Una vez terminada la capa base o capa de cobertura, sobre ésta se podrá construir la capa sello.

6.2. CAPA SELLO

Uno de los aspectos más importantes para la clausura de vertederos y rellenos sanitarios, es la cubierta final, en la cual se busca formar una capa continua de baja permeabilidad, llamada *capa sello*, que actúe como sello hidráulico para aguas pluviales y escorrentía superficial. Esta capa va construida sobre la capa base o capa de cobertura.

La capa sello puede ser:

- Mineral
- Sintética
- Mixta

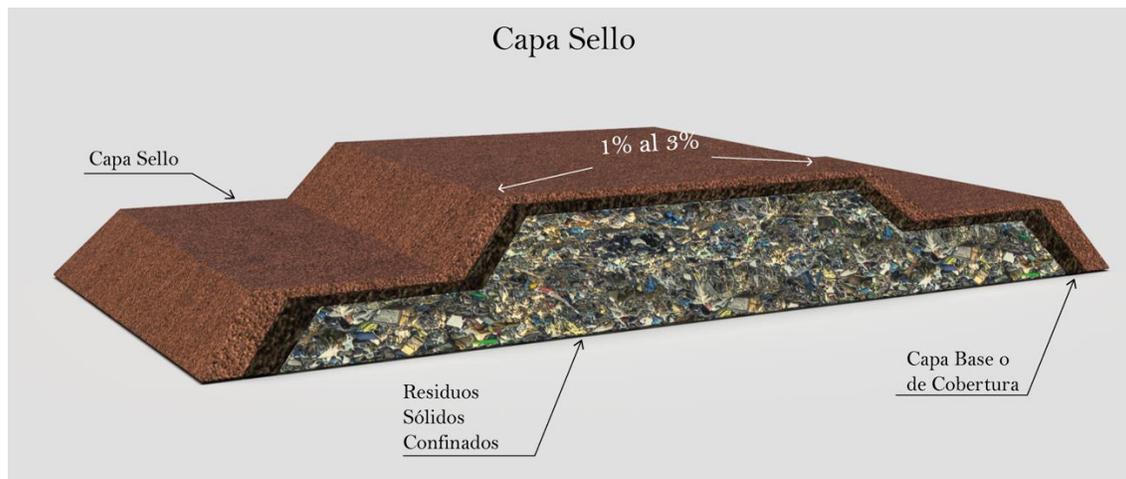


Figura 41. Diagrama de conformación de capa sello

Fuente: elaboración propia

6.3. CAPA DE EROSIÓN

El objetivo de la capa de erosión es proteger la capa sello de la exposición de los elementos naturales y el tráfico vehicular. En particular, la capa de erosión protege la capa sello del resquebrajamiento por disección durante época de estiaje y de la erosión en la época de lluvias.

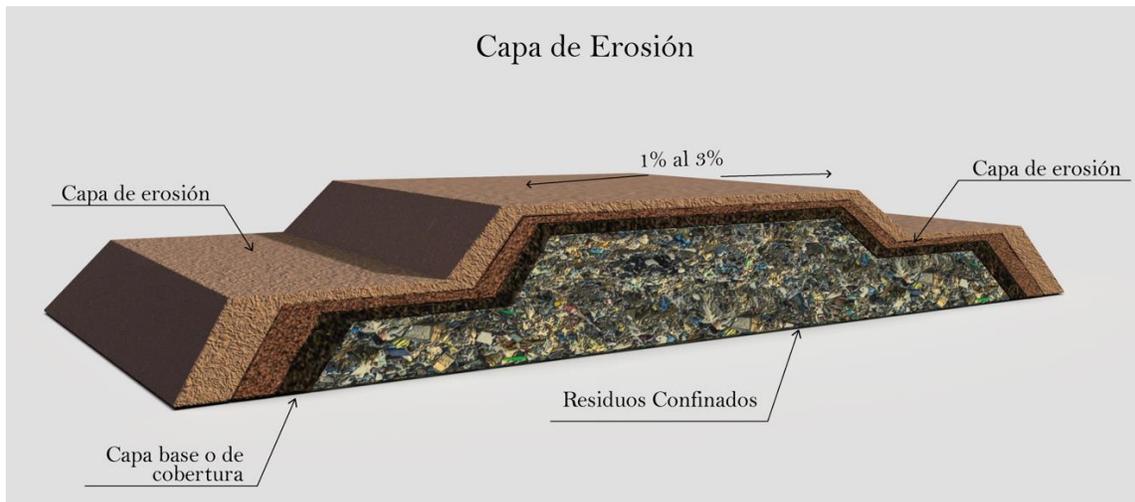


Figura 42. Diagrama de conformación de capa de erosión

Fuente: elaboración propia

7. SISTEMA DE CAPA SELLO CON SISTEMA DE CAPA DE EROSIÓN

7.1. CAPA SELLO MINERAL CON MATERIAL TÉRREO LIMO-ARCILLOSO

La construcción de la capa de sello a base de material limo-arcilloso compactado tanto en plataforma, como en bermas y taludes, debe hacerse de manera que la capa final conste de un espesor 0.30 m compactado.

Para este tipo de cobertura se recomienda utilizar material con las características de la Tabla 11.

Tabla 11. Características de material limo-arcilloso para capa sello

Características de material limo-arcilloso		
Malla No.	% Que Pasa en Peso	
	MÍNIMO	MÁXIMO
3/8"	100%	100%
No. 4	70%	100%
No. 40	30%	70%
No. 100	10%	50%
No. 200	5%	30%
Límite de Consistencia		
Límite Líquido	25%	60%
Límite Plástico	20%	35%
Límite de Plasticidad	5%	15%
Contratación Lineal	2%	5%

Fuente: elaboración propia

La capa sello se recomienda sea de 0.30 m con una compactación relativa de al menos 95% de la prueba Próctor o al grado de compactación donde se alcance una permeabilidad de 1×10^{-7} cm/s.

El extendido del material se realizará preferentemente con equipo tipo bulldozer, en capas con un espesor de 0.35 m de material abundado en promedio. La capa sello se colocará sobre la capa base conservando las pendientes que conforman a la misma, las cuales van del de 1% al 3% del centro de la plataforma a los hombros de los taludes perimetrales, cuidando que tanto los taludes, como la superficie horizontal de celda queden cubiertos. Al cubrir los taludes finales, estos deberán conservar la proporción de talud que se haya

establecido en el proyecto, que para efecto de este manual debe ser de 3:1, 2:1 o 2.5:1 (horizontal-vertical).

Una vez extendido el material, se realizará el bandeado con bulldozer las veces que sean necesarias. En el caso de superficies horizontales, se debe compactar uniformemente en ambos sentidos mediante vibrocompactador con rodillo liso o compactador pata de cabra, aplicando la humedad necesaria para realizar la compactación hasta obtener una capa compactada de 0.30 m de espesor.



Figura 43. Diagrama de estratificación de capa sello con material limo-arcilloso (Tepetate)

Fuente: elaboración propia

El control de la nivelación debe ser llevado a cabo mediante levantamientos topográficos, y los niveles de permeabilidad deben ser comprobados mediante laboratorio y pruebas *in situ*.

7.1.1. CAPA DE EROSIÓN PARA CAPA SELLO MINERAL CON MATERIAL TÉRREO LIMO-ARCILLOSO

Para la capa de erosión sello se propone un espesor mínimo de 0.20 m de material arcilloso compactado. Tal material no requiere características específicas, ya que para esta capa cualquier tipo de suelo es aceptable, siempre y cuando sea moderadamente cohesivo y sin desperdicios, contaminación o piedras. Este material debe ser compactado en un intervalo del 85% al 90% Próctor

La capa de erosión requiere de las siguientes especificaciones y procedimientos constructivos:

El sobretamaño del material a colocar no debe exceder un tercio (1/3) del espesor de la capa, es decir, si será de 0.20 m, el sobre tamaño de las partículas de suelo a colocar no deben ser mayores a 0.06 m. La humedad del material al inicio de la compactación deberá ser equivalente a la humedad óptima, o sea $\pm 2\%$ PVSM. En caso de que el material contenga materiales indeseados con el tamaño de partícula mencionado anteriormente, estos deberán ser removidos manualmente y retirarse del área de trabajo.

Previo a la colocación del material para la capa de erosión, la cara expuesta de la capa sello deberá estar limpia, uniforme y carente de materiales indeseables. Si la superficie de la capa sello se ha dañado por lluvias o por tránsito, deberán ser restauradas.

El extendido del material se realizará con bulldozer y puede ser asistido por motoniveladora; una vez extendido se deberá aplicar la humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM. Después, será necesario revolver el material con la motoniveladora o con un arado de discos hasta que la humedad se aprecie homogéneamente distribuida en toda la capa.

Una vez incorporada la humedad se tenderá y se bandeará el material con ayuda de bulldozer en capas con un espesor promedio de 0.25 m de material abundado, se bandeará las veces que sean necesarias, sin olvidar cerrar huella, hasta obtener una capa compacta de 0.20 m, con una compactación que oscile en un rango recomendado del 85% al 95% Próctor y un espesor final de 0.20 m.

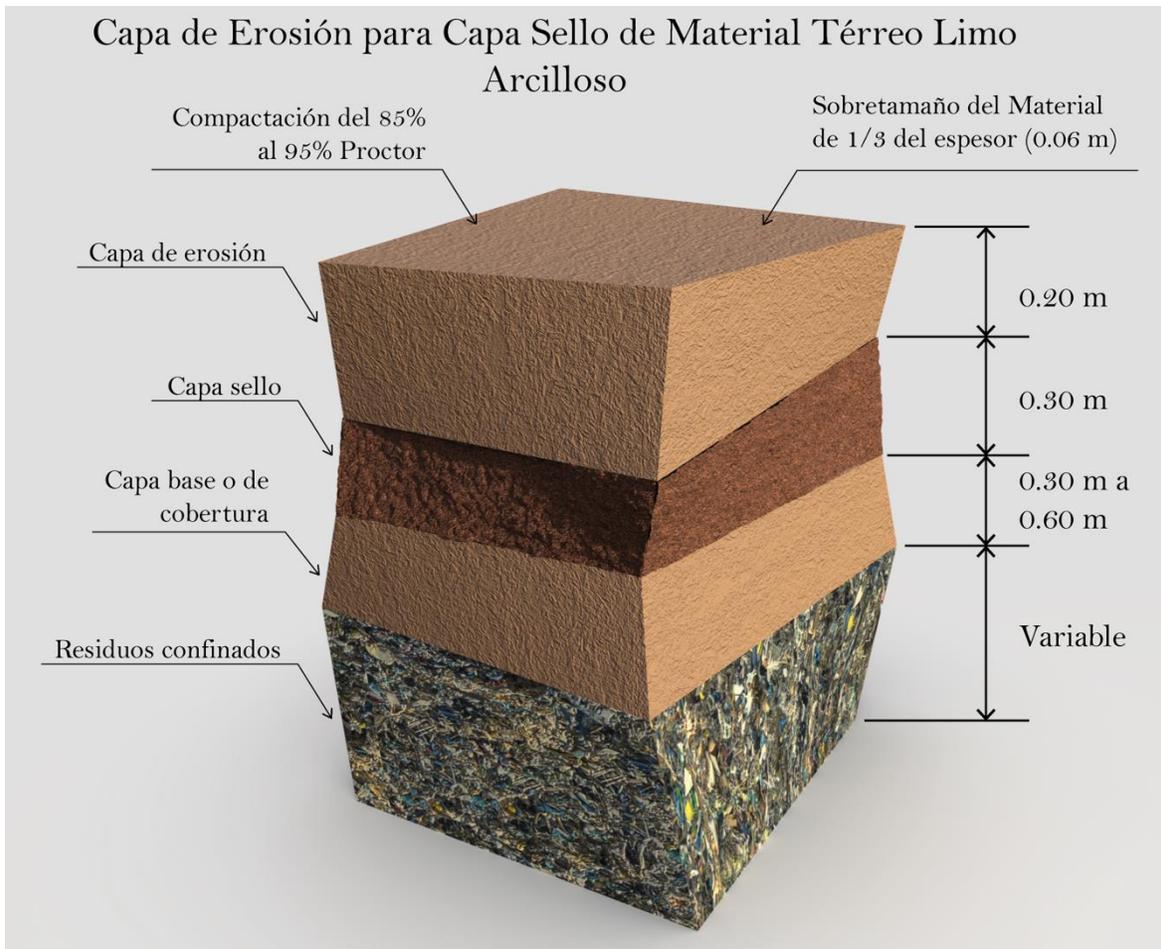


Figura 44. Diagrama de estratificación de capa de erosión para capa sello con material limo-arcilloso

Fuente: elaboración propia

7.2. CAPA SELLO MINERAL CON MATERIAL TÉRREO MEJORADO

i) MATERIAL TÉRREO MEJORADO CON ARCILLA BENTÓNICA (BENTONITA DE SODIO)

La construcción de la capa de sello a base de material térreo mejorado con bentonita se realiza con el material de la zona que no cumpla con las características de permeabilidad de un material limo-arcilloso, el cual puede ser mejorado con bentonita de sodio en las proporciones que se determinen en laboratorio de mecánica de suelos. Una vez establecidos los parámetros de permeabilidad de 1×10^{-7} cm/s, así como el espesor de la capa de material mejorado, este podrá ser colocado, extendido y compactado para cubrir la plataforma, bermas y taludes en los espesores determinados según las pruebas de laboratorio.

Una vez obtenidas las proporciones de material térreo y la arcilla bentonita que mejorará al material térreo, este se deberá mezclar en sitio. Dicha mezcla se puede realizar con motoconformadora hasta lograr una homogenización de ambos materiales aplicando el grado de humedad recomendado por el laboratorio. Una vez lograda la mezcla homogénea, se procederá al extendido y compactación del material.

El proceso de extendido y compactación se realiza de manera similar a la de “capa sello de mineral con material térreo limo-arcilloso” cubriendo plataforma, bermas y taludes. Se recomienda conservar la proporción de talud que se haya establecido en el proyecto, que, para efecto de este manual, se determinó en 3:1, 2:1 o 2.5:1 (horizontal-vertical). De igual modo se recomienda conservar las pendientes que se traían desde la capa base, las cuales van del de 1% al 3% del centro de la plataforma a los hombros de los taludes perimetrales para garantizar una buena superficie de drenaje y su gradiente.

Capa Sello con Material Térreo Mejorado con Arcilla Bentonita

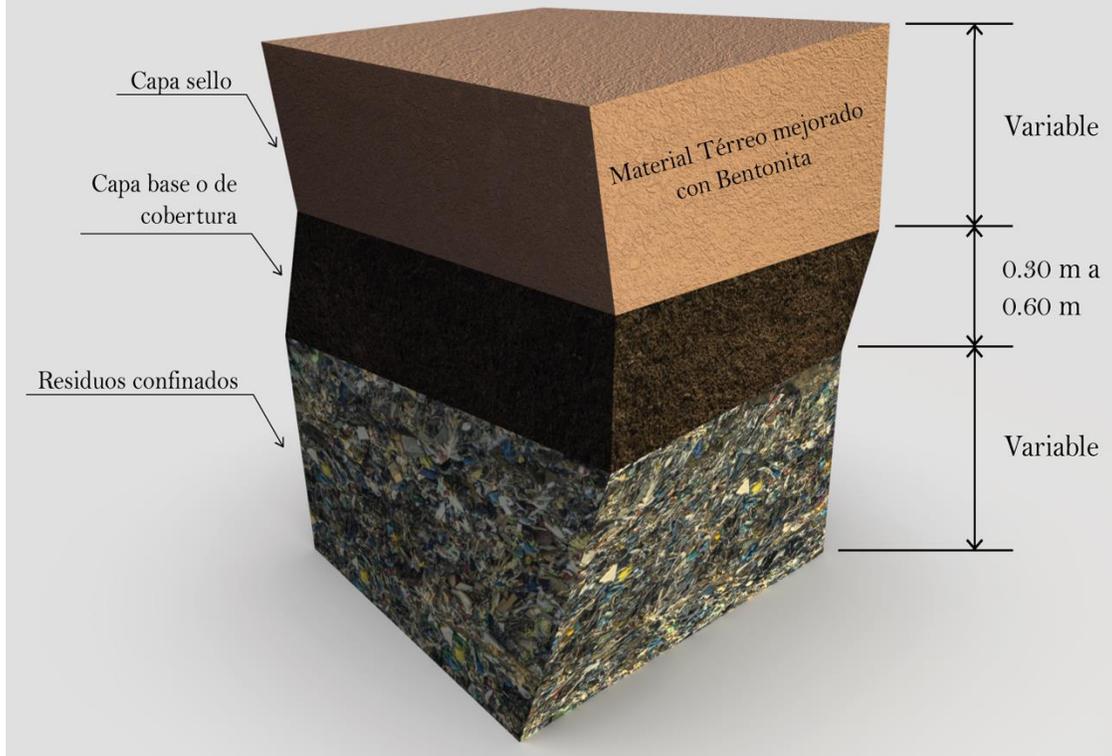


Figura 45. Diagrama de estratificación de capa sello con material térreo mejorado con bentonita

Fuente: elaboración propia

ii) MATERIAL TÉRREO MEJORADO CON ADITIVOS MEJORADORES DE SUELO

La construcción de una capa de sello a base de material térreo con aditivos que ayuden a mejorar y estabilizar el suelo se realiza con material de la zona que no llegue a cumplir con las características de permeabilidad de un material limo-arcilloso, mismo que puede ser mejorado con aditivos estabilizadores multienzimáticos para ayudar a mejorar las características del suelo. Estos aditivos actúan sobre las partículas finas del material térreo a utilizar, incitando a un proceso de cementación catalítica que ayudará a crear una capa de suelo denso con una mayor resistencia y estabilidad, de manera que aumentará la impermeabilidad del suelo y dará mayor capacidad de carga al terreno.

Para el uso de estos aditivos estabilizadores se puede utilizar el que más convenga al proyecto y debe ser aplicado en las proporciones que se determinen tanto por el proveedor del aditivo como por el laboratorio de mecánica de suelos. Así mismo, se deberá aplicar en el modo en que el proveedor lo determine, ya que existen aditivos que se aplican al material térreo antes de ser colocado, extendido y compactado, y otros que se colocan al suelo una vez realizado el extendido y compactado del material. Se debe tener en cuenta que para ambos casos es necesario contar con un carro tanque (pipa) equipada con bomba, manguera y sistema de aspersion para la aplicación del producto.

Una vez determinados en laboratorio los parámetros de permeabilidad de 1×10^{-7} , el espesor de la capa de materia, las proporciones del aditivo y modo de aplicación, se podrá continuar con la colocación, extendido y compactado del material térreo.

El proceso de extendido y compactado se realiza de manera similar al de “capa sello de mineral con material térreo limo-arcilloso”, cubriendo plataforma, bermas y taludes. Como con los demás procesos, se recomienda conservar la proporción de talud que se haya establecido en el proyecto.

Capa Sello con Material Térreo Mejorado con Aditivos Mejoradores de Suelo

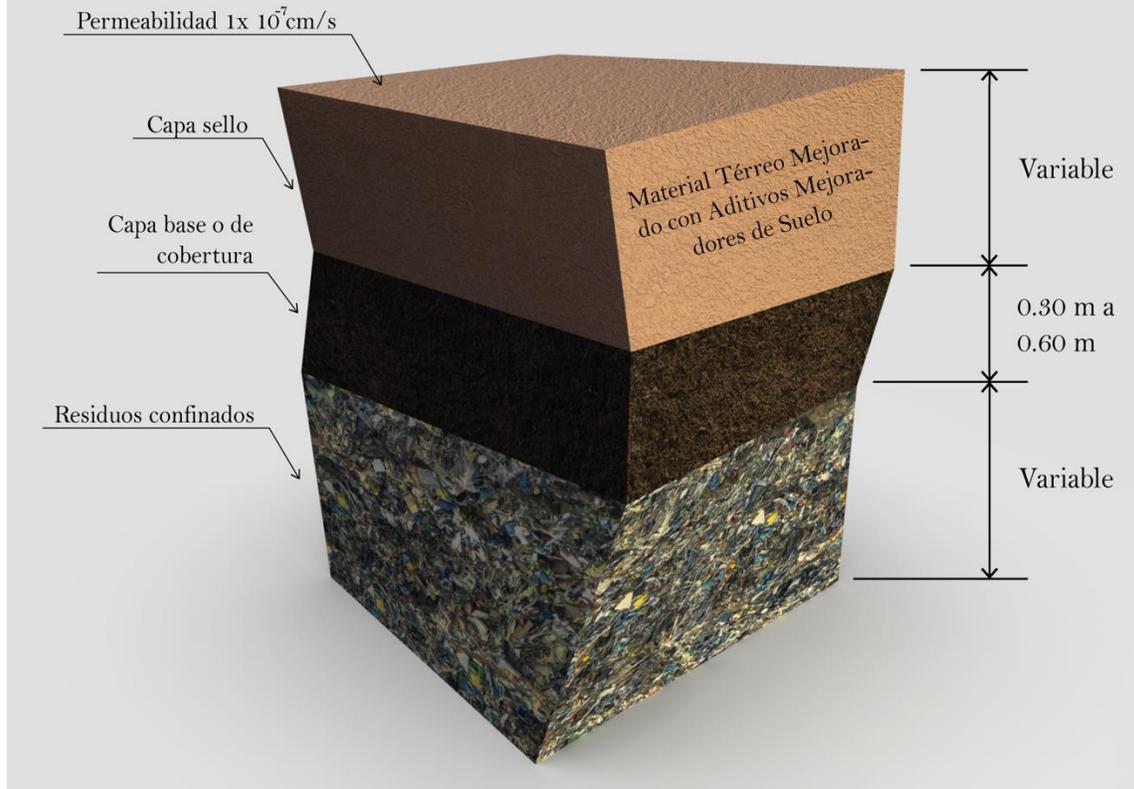


Figura 46. Diagrama de estratificación de capa sello con material térreo mejorado con aditivos mejoradores de suelo

Fuente: elaboración propia

7.2.1. CAPA DE EROSIÓN PARA CAPA SELLO MINERAL A BASE DE MATERIAL TÉRREO MEJORADO

Para la capa de erosión de las capas sello construidas a base de material térreo mejorado, se propone una capa de mínimo 0.20 m de espesor de material arcilloso compactado. El material para esta capa de erosión no requiere características específicas, ya que, para esta capa, cualquier tipo de material terreo puede ser aceptable, siempre y cuando sea moderadamente cohesivo y sin desperdicios, contaminación o piedras. Este material también debe ser compactado en un rango del 85% al 90% Próctor

La capa de erosión requiere de las siguientes especificaciones y procedimientos constructivos:

El sobretamaño del material a colocar no debe exceder de un tercio (1/3) del espesor de la capa, es decir, si será de 0.20 m, el sobre tamaño de las partículas de suelo a colocar no deben ser mayores a 0.06 m. la humedad del material al inicio de la compactación deberá ser equivalente a la humedad óptima, o sea $\pm 2\%$ PVSM. En caso de que el material contenga materiales indeseados con el tamaño de partícula mencionado anteriormente, estos deberán ser removidos manualmente y retirarse del área de trabajo.

Previo a la colocación del material para la capa de erosión, la cara expuesta de la capa sello deberá estar limpia, uniforme y carente de materiales indeseables. Si la superficie de la capa sello se ha dañado por lluvias o por tránsito, deberán ser restauradas.

El extendido del material se realizará con bulldozer y puede ser asistido por motoniveladora; una vez extendido se deberá aplicar la humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM. Después, será necesario revolver el material con la motoniveladora o con un arado de discos hasta que la humedad se aprecie homogéneamente distribuida en toda la capa.

Una vez incorporada la humedad se tenderá y se bandeará el material con ayuda de bulldozer en capas con un espesor promedio de 0.25 m de material abundado, se bandeará las veces que sean necesarias, sin olvidar cerrar huella, hasta obtener una capa compacta de 0.20 m, con una compactación que oscile en un rango recomendado del 85% al 95% Próctor y un espesor final de 0.20 m.



Figura 47. Diagrama de estratificación de la capa de erosión para capa sello mineral con material térreo mejorado

Fuente: elaboración propia

7.3. CAPA SELLO SINTÉTICA

La capa sello sintética está compuesta por una geomembrana de Polietileno de Alta Densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) que debe ser colocada sobre la capa base. Se recomienda que el espesor sea de 1mm o 40 milésimas de pulgada como mínimo a 2.5 mm o 100 milésimas de pulgada como máximo. Durante la colocación de la geomembrana, esta debe ser protegida de la acción del viento y arrastre mediante anclajes, ya sea por trincheras continuas o aisladas, colocación de bolsas de arena o incluso montones del material que se compactará sobre ella.

De manera opcional y como un sistema de protección a la geomembrana, se puede colocar un geotextil debajo de la geomembrana, este podrá ser de las mismas características del que se coloque en la capa de erosión.

Los lienzos de geomembrana deben unirse mediante soldadura, las técnicas de soldadura pueden ser por extrucción o termofusión siguiendo un orden lógico entre las uniones y garantizando un arreglo lo más paralelo posible. Para el caso de los taludes, se recomienda que las uniones se realicen de manera longitudinal, es decir, de la corona al pie del talud. De igual modo, es recomendable no hacer uniones ni traslapes sobre talud para dar continuidad a la geomembrana, ni traslapar los segmentos de la misma, ni unir trozos para alcanzar a cubrir la longitud del talud. Los únicos traslapes que se recomienda permitir son aquellos en sentido paralelo, entre ancho de rollos.

Extendido y Soldadura de Geomembrana en Taludes

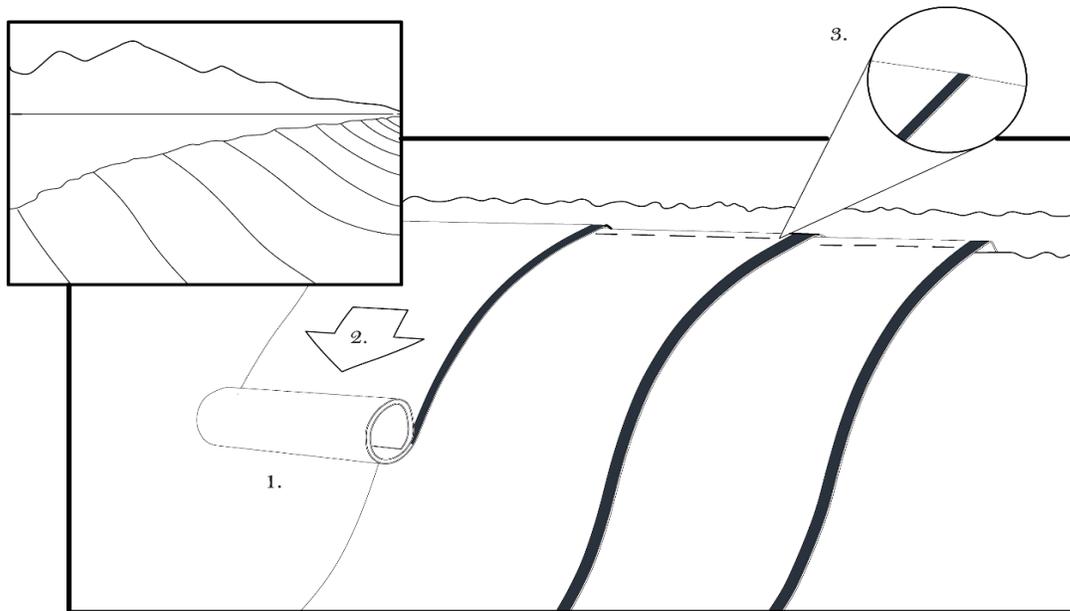


Figura 48. Diagrama de extendido de geomembrana en taludes
Fuente: elaboración propia

Es necesario que para verificar la unión y colocación de la geomembrana se realicen pruebas mediante una empresa verificadora que realice pruebas destructivas en campo. El criterio de la muestra puede ser aleatorio, haciendo una prueba cada 150 m de longitud. Las dimensiones de la muestra pueden ser de 0.25 m por 0.60 m. Se recomienda una prueba de corte utilizando tensiómetro de campo donde el resultado de la resistencia de la unión deberá ser, cuando menos, igual a la resistencia nominal especificada por el fabricante de la geomembrana. En caso de que la unión no alcance esta resistencia, se recomienda rechazarla hasta dos veces; y en caso de que una tercera prueba resulte insatisfactoria, se recomienda cambiar el equipo de aplicación de soldadura o de material, según sea el caso.

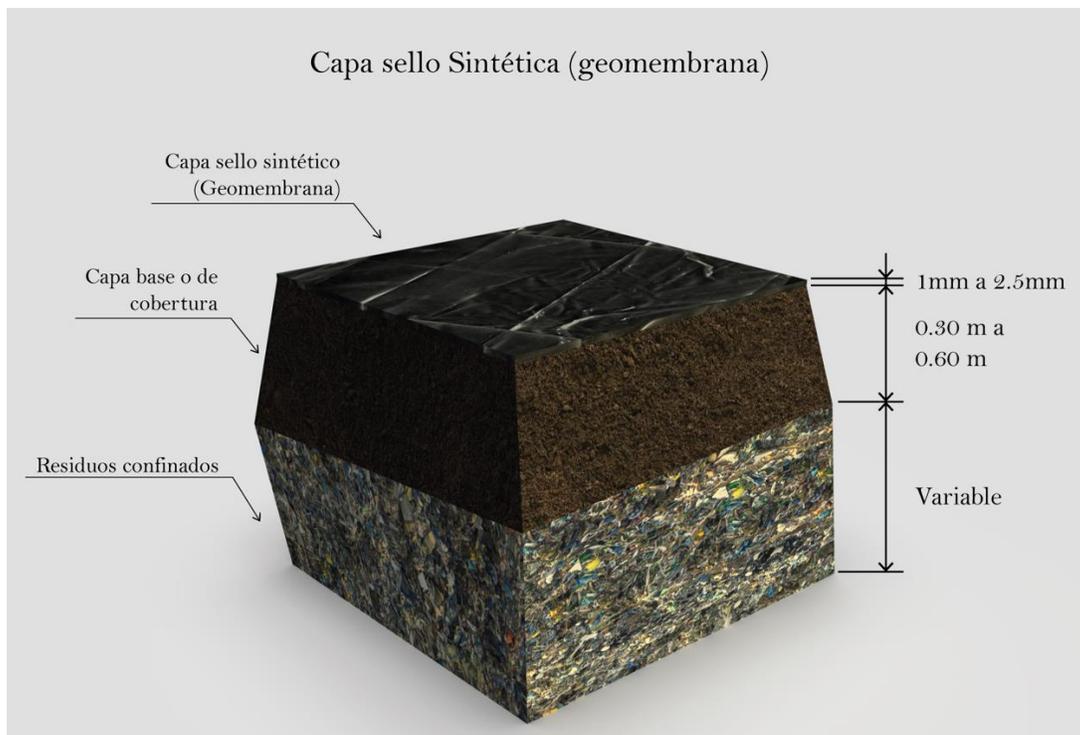


Figura 49. Diagrama de estratificación de capa sello sintética (Geomembrana)

Fuente: elaboración propia

7.3.1. CAPA DE EROSIÓN PARA CAPA SELLO SINTÉTICA

Para la capa de erosión que cubre la capa sello sintética, se establece el uso de una membrana de refuerzo para protección de la geomembrana. Se entiende como membrana de refuerzo a la capa de material geosintético construido a base de geotextil que contribuirá a mantener la estabilidad de la geomembrana de polietileno de alta densidad.

Se deberá procurar, en la medida de lo posible, que los geosintéticos cumplan con las características que especifiquen sus fichas técnicas. Se recomienda un geotextil de un gramaje mínimo de 100 g/m^2 , y se deberá tener consideración en las propiedades de conductividad hidráulica y resistencia a la tensión.

Para la colocación del geotextil, este deberá desenrollarse y extenderse en toda la longitud de plataforma y taludes, previendo las longitudes de los anclajes especificados en el proyecto. Deberá considerarse un traslape mínimo de 0.20 m, mismo que deberá ir cosido o termofusionado con el objetivo de que no haya movimientos entre los paneles contiguos durante la colocación de la capa de cobertura vegetal. Durante el proceso de unión del geotextil, no deben permitirse traslapes sobre los taludes para dar continuidad al mismo, es decir, no se deberá traslapar ni unir trozos del geotextil para alcanzar la longitud del talud (de la corona al pie); los únicos traslapes que deben permitirse deberán ser en sentido paralelo, entre los anchos de los lienzos o rollos.

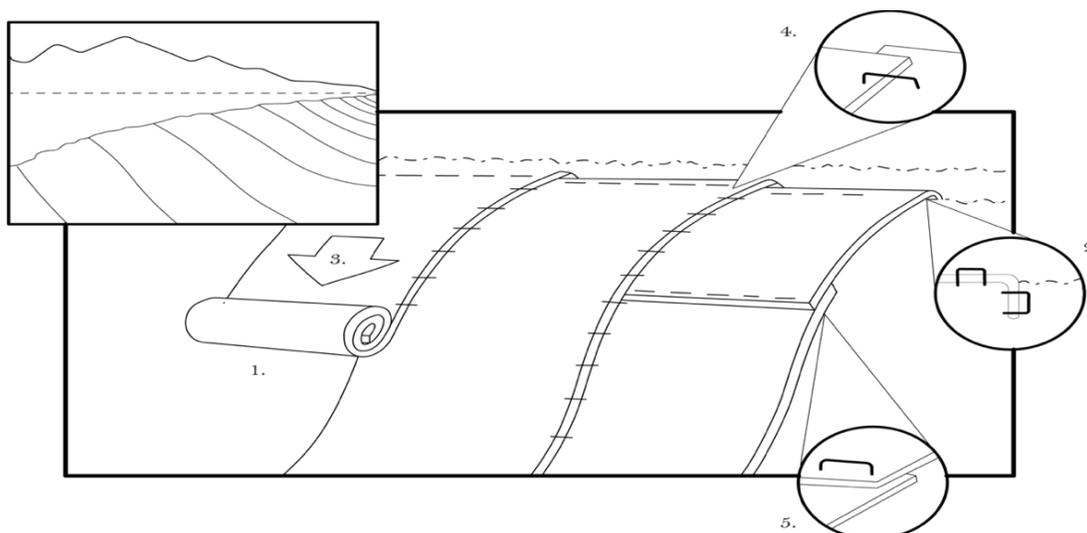


Figura 50. Diagrama de extendido y unión de geotextil para la capa de erosión de la capa sello sintética

Fuente: elaboración propia

Una vez colocado el geotextil, se propone colocar una capa de material de un mínimo de 0.20 m de espesor de material arcilloso compactado; este material no requiere características específicas, ya que para esta capa cualquier tipo de suelo puede ser aceptable, siempre y cuando sea moderadamente cohesivo y sin desperdicios, contaminación o piedras. Este material debe ser compactado en un rango del 85% al 90% Próctor. En caso de que no se coloque esta capa, se recomienda colocar una geored de polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) de abertura romboidal y sobre esta iniciar la colocación y extendido del limo orgánico que servirá de base para la cobertura vegetal.



Figura 51. Diagrama de estratificación de la capa de erosión para capa sello sintética

Fuente: elaboración propia

7.4. CAPA SELLO MIXTA

La capa sello mixta consta de la combinación de material térreo ya sea limo-arcilloso o mejorado con bentonita con una geomembrana de Polietileno de Alta Densidad (HDPE, por sus siglas en inglés).

Si se elige colocar este tipo de capa sello en el sitio de disposición final a clausurar, el material térreo debe cumplir con las recomendaciones que se mencionaron en este capítulo; lo mismo para el material sintético. La colocación de este tipo de capa puede ser en las combinaciones que se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. *Combinaciones de capa sello mixta (elaboración propia)*

Combinaciones propuestas para Capa Sello Mixta			
Combinación 1			
Capa sello	Plataforma	Taludes	Bermas
Mineral	✓		✓
Sintética		✓	
Combinación 2			
Capa sello	Plataforma	Taludes	Bermas
Mineral		✓	✓
Sintética	✓		
Combinación 3			
Capa sello	Plataforma	Taludes	Bermas
Mineral	✓		
Sintética		✓	✓

Fuente: elaboración propia

Sea elegida cualquiera de las combinaciones mencionadas en la Tabla 12, las cubiertas minerales deben seguir las recomendaciones de los apartados de cubierta mineral y sintética, para garantizar un adecuado funcionamiento de la capa sello.

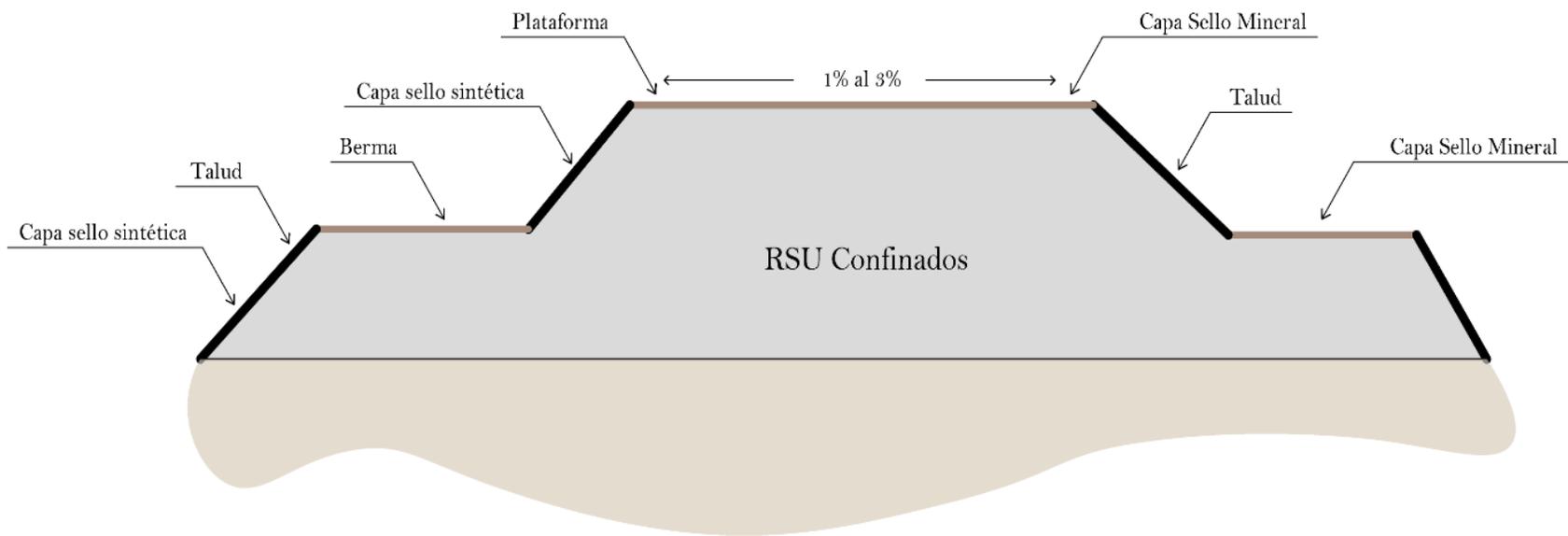


Figura 52. Diagrama de la combinación 1 para capa sello mixta
Fuente: elaboración propia

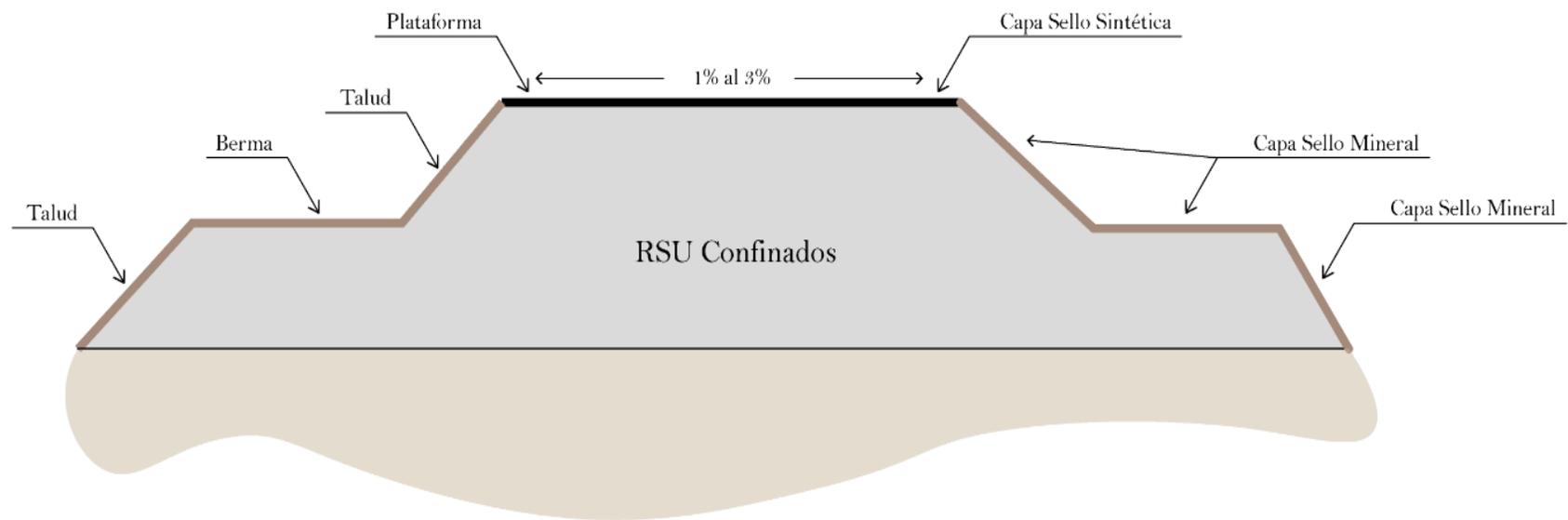


Figura 53. Diagrama de la combinación 2 para capa sello mixta
 Fuente: elaboración propia

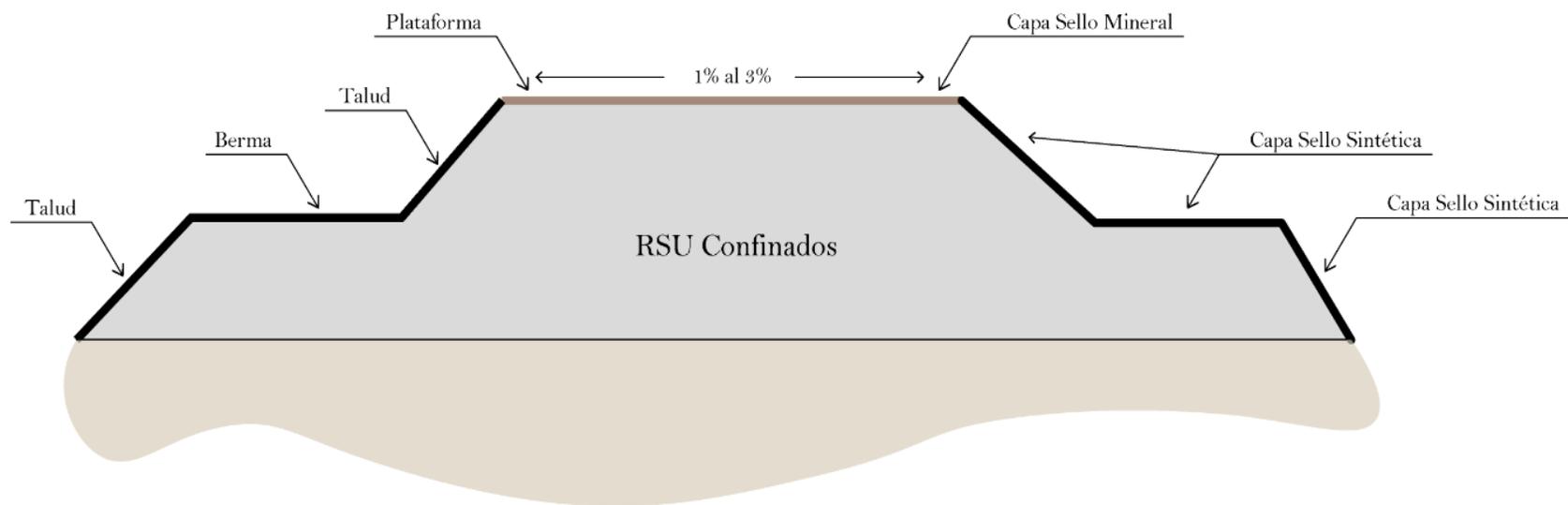


Figura 54. Diagrama de la combinación 3 para capa sello mixta
Fuente: elaboración propia

7.4.1. CAPA DE EROSIÓN PARA CAPA SELLO MIXTA

La capa de erosión para la capa sello mixta se puede realizar con material térreo o material sintético.

i) Alternativa 1. CAPA DE EROSIÓN A BASE DE MATERIAL TÉRREO Y GEOTEXTIL

Para el caso de la Combinación 1 y Combinación 3, donde los taludes tienen una capa sello sintética, la colocación de la capa de erosión se realiza colocando un geotextil en los taludes, el cual se debe realizar, primero, haciendo el anclaje del geotextil en la berma superior e inferior, para después colocar el geotextil de protección de geomembrana en taludes. Una vez colocado el geotextil se procederá a colocar la capa de erosión en plataforma y bermas alcanzando los niveles establecidos por el proyecto.

Para la colocación de la capa de erosión en taludes, se realizará de la siguiente manera:

Se establece el uso de una membrana de refuerzo para protección de la geomembrana. Se entiende como membrana de refuerzo a la capa de material geosintético construido a base de geotextil que contribuirá a mantener la estabilidad de la geomembrana de polietileno de alta densidad.

Se deberá procurar, en la medida de lo posible, que los geosintéticos cumplan con las características que especifiquen sus fichas técnicas. Se recomienda un geotextil de un gramaje mínimo de 100 g/m^2 , y se deberá tener consideración en las propiedades de conductividad hidráulica y resistencia a la tensión.

Para la colocación del geotextil, este se deberá desenrollar y extender en toda la longitud de plataforma y taludes, previendo las longitudes de los anclajes especificados en el proyecto. Deberá considerarse un traslape mínimo de 0.20 m, el cual deberá ir cosido o termofusionado con el objetivo de que no haya movimientos entre los paneles contiguos durante la colocación de la capa de cobertura vegetal. Durante el proceso de cosido o termofusión del geotextil, no deben permitirse traslapes sobre los taludes para dar continuidad al mismo, es decir, no se deberá traslapar ni unir trozos del geotextil para alcanzar la longitud del talud (de la corona al pie); los únicos traslapes que deben permitirse deberán ser en sentido paralelo, entre los anchos de los lienzos o rollos.

Una vez colocado el geotextil en taludes, se podrá colocar la capa de erosión de plataforma y bermas, para lo cual se propone una capa mínima de 0.20 m

de espesor de material arcilloso compactado. Este material no requiere características específicas, ya que para esta capa cualquier tipo de suelo puede ser aceptable, siempre y cuando sea moderadamente cohesivo y sin desperdicios, contaminación o piedras. Este material debe ser compactado en un rango del 85% al 90% Próctor

La capa de erosión a base de material térreo requiere de las siguientes especificaciones y procedimientos constructivos:

El sobretamaño del material a colocar no debe exceder de un tercio ($1/3$) del espesor de la capa, es decir, si será de 0.20 m, el sobre tamaño de las partículas de suelo a colocar no deben ser mayores a 0.06 m, la humedad del material al inicio de la compactación deberá ser equivalente a la humedad óptima, o sea $\pm 2\%$ PVSM. En caso de que el material contenga materiales con un tamaño de partícula distinto del mencionado anteriormente, estos deberán ser removidos manualmente y retirarse del área de trabajo.

Previo a la colocación del material para la capa de erosión, la cara expuesta de la capa sello deberá estar limpia, uniforme y carente de materiales indeseables. Si la superficie de la capa sello se ha dañado por lluvias o por tránsito, deberán ser restauradas.

El extendido del material se realizará con bulldozer y puede ser asistido por motoniveladora. Una vez extendido, se deberá aplicar la humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM. Después de incorporada la humedad, se deberá revolver el material con la motoniveladora o con un arado de discos, hasta que la humedad se aprecie homogéneamente distribuida en toda la capa.

Ya incorporada la humedad, se tenderá y se bandeará el material con ayuda de bulldozer en capas con un espesor promedio de 0.25 m de material abundado, se bandeará las veces que sean necesarias y cerrando huella, para obtener una capa compacta de 0.20 m y con una compactación que oscile en un rango recomendado del 85% al 95% Próctor y con un espesor final de 0.20 m.

Capa de Erosión Térrea y Geotextil

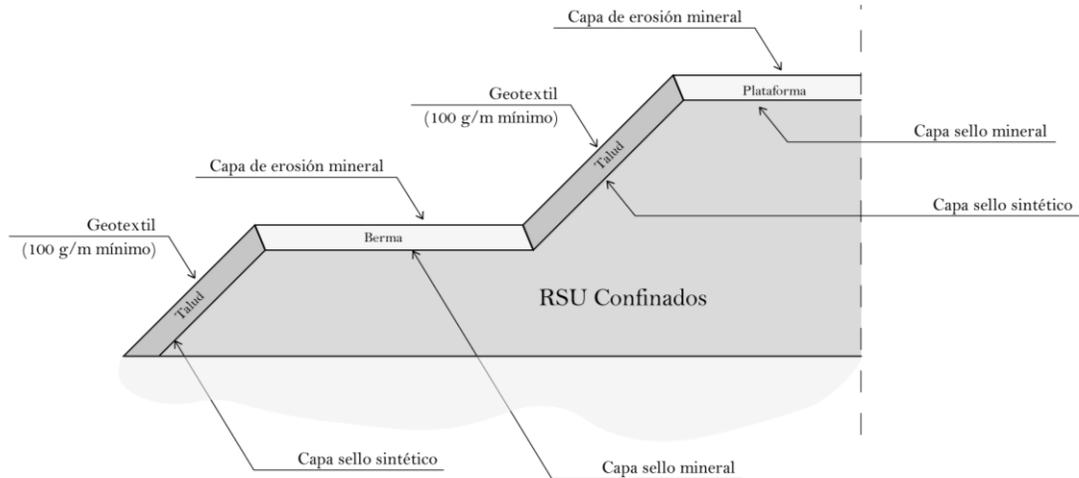


Figura 55. Diagrama de capa de erosión mixta a base de material térreo y geotextil en taludes

Fuente: elaboración propia

ii) ALTERNATIVA 2. CAPA DE EROSIÓN A BASE DE GEOTEXTIL

Para la colocación de la capa de erosión en la capa sello mixta es necesario la colocación de geotextil, ya sea que se tenga capa sello sintética a base de geomembrana de HDPE en taludes o no. El proceso de colocación de esta capa de erosión es el siguiente.

La capa de material geosintético construido a base de geotextil contribuirá a mantener la estabilidad de la geomembrana de polietileno de alta densidad y conservar la humedad y la permeabilidad dada a la capa sello conformada por material térreo compactado.

Se deberá procurar en la medida de lo posible, que los geosintéticos cumplan con las características que especifiquen sus fichas técnicas, se recomienda un geotextil de un gramaje mínimo de 100 g/m^2 , y se deberá tener consideración en las propiedades de conductividad hidráulica y resistencia a la tensión.

Para la colocación del geotextil, se comienza por desenrollarlo y extenderlo en toda la longitud de plataforma y taludes, previendo las longitudes de los anclajes especificados en el proyecto. Deberá considerarse un traslape mínimo de 0.20 m que deberá ir cosido o termofusionado para que no haya

movimientos entre los paneles contiguos durante la colocación de la capa de cobertura vegetal. Durante el proceso de cosido o termofusión del geotextil, no deben permitirse traslapes sobre los taludes para poder dar continuidad a la capa, es decir, no se deberá traslapar ni unir trozos del geotextil para alcanzar la longitud del talud (de la corona al pie). Los únicos traslapes que deben permitirse deberán ser en sentido paralelo, entre los anchos de los lienzos o rollos.

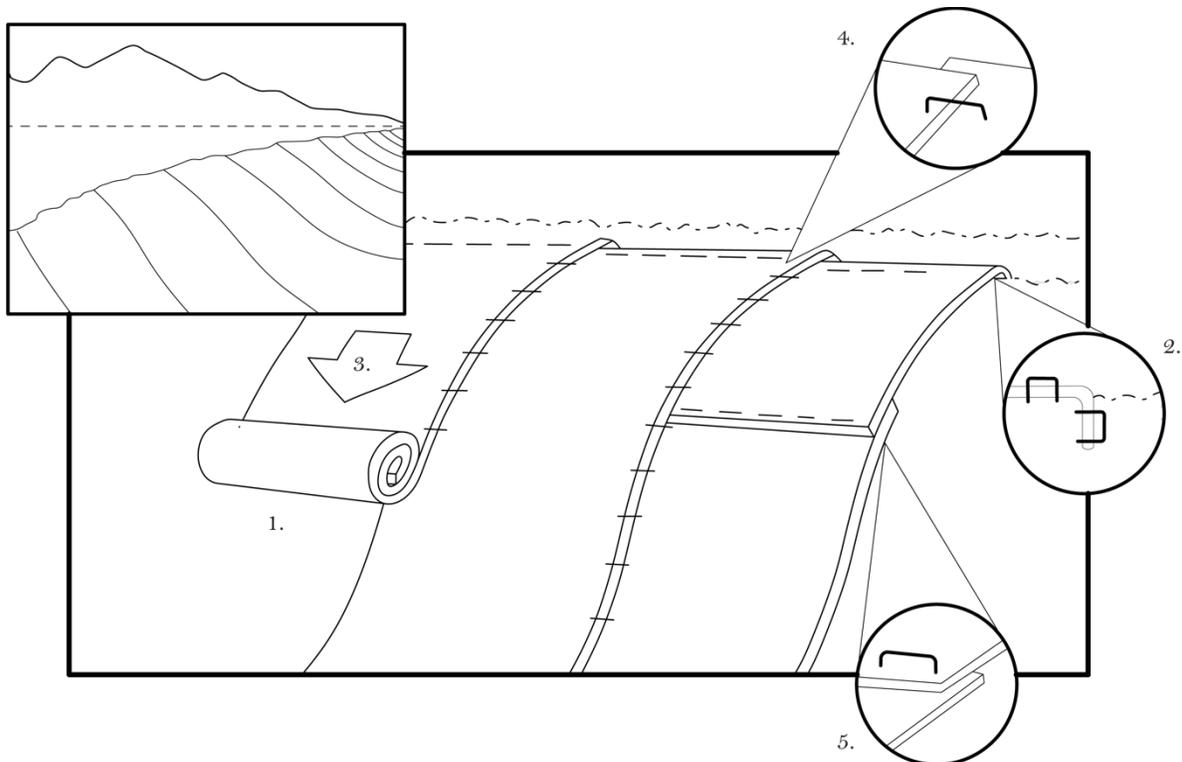


Figura 56. Diagrama de método de extendido y unión de geotextil para la capa de erosión de la capa sello mixta

Fuente: elaboración propia

Una vez instalado el geotextil, se debe colocar una capa de material arcilloso compactado con un mínimo de 0.20 m de espesor. Este material no requiere características específicas, ya que para esta capa cualquier tipo de suelo puede ser aceptable, siempre y cuando sea moderadamente cohesivo y sin desperdicios, contaminación o piedras. Este material debe ser compactado en un intervalo del 85% al 90% Próctor. En caso de que no se coloque esta capa, se recomienda colocar una geored de polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) de abertura romboidal y sobre esta iniciar la colocación y extendido del limo orgánico que servirá de base para la cobertura vegetal.

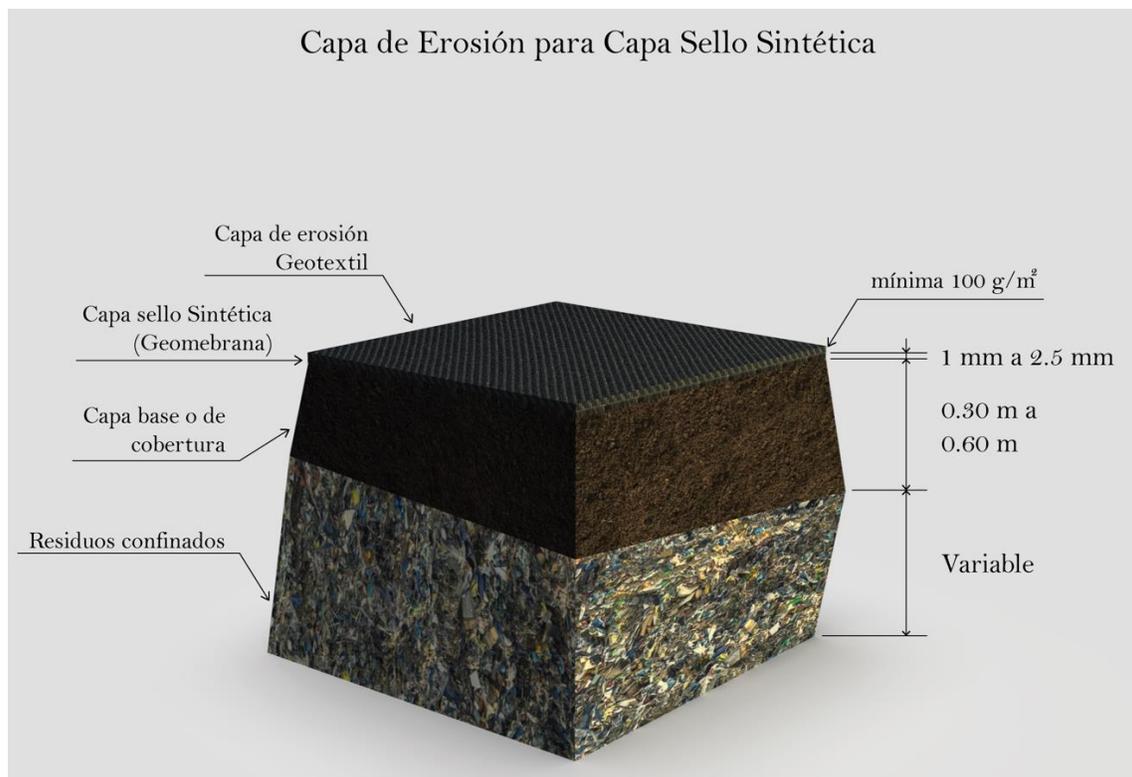


Figura 57. Diagrama de estratificación de capa de erosión a base de geotextil

Fuente: elaboración propia

iii) ALTERNATIVA 3. CAPA DE EROSIÓN A BASE DE CONCRETO ASFÁLTICO PARA BERMAS

Una alternativa de capa de erosión para las bermas es a base de concreto asfáltico, en este caso, este tipo de estructuras funcionan como caminos perimetrales dentro del sitio de disposición final una vez estructurado. Para este sistema de cubierta se deberá realizar el siguiente procedimiento una vez conformada y compactada la capa sello sobre las bermas del sitio.

Sobre la capa sello se colocará una capa denominada sub-base, la cual se recomienda esté conformada por grava controlada, a la cual se le deberá aplicar humedad necesaria para alcanzar compactación de 95% Próctor. La grava controlada deberá ser colocada en capas con un espesor máximo de 0.15 m. Una vez colocada la capa sub-base se debe realizar un riego de impregnación con emulsión asfáltica (también conocido como riego de liga), antes del riego de liga se deberá verificar que la superficie esté libre de todo material como piedras, polvo, baches y encharcamientos, el riego de liga se

deberá realizar con una petrolizadora y se deberá verificar la temperatura de la emulsión asfáltica. Posterior a la colocación del riego de liga, se deberá realizar el tendido del concreto asfáltico, cuyo espesor mínimo recomendado debe ser de 0.07 m. Dicho procedimiento puede realizarse con el apoyo de una pavimentadora autopropulsada que sea capaz se esparcir y precompactar la carpeta asfáltica según el ancho de sección del proyecto. También se recomienda que el concreto asfáltico sea de un agregado máximo de 0.02 m y con un espesor de 0.025 m compactado al 90%; para ello puede ser utilizando un rodillo de 10 Ton para cerrar huella y compactar.

Capa de Erosión a base de Concreto Alfáltico para Bermas

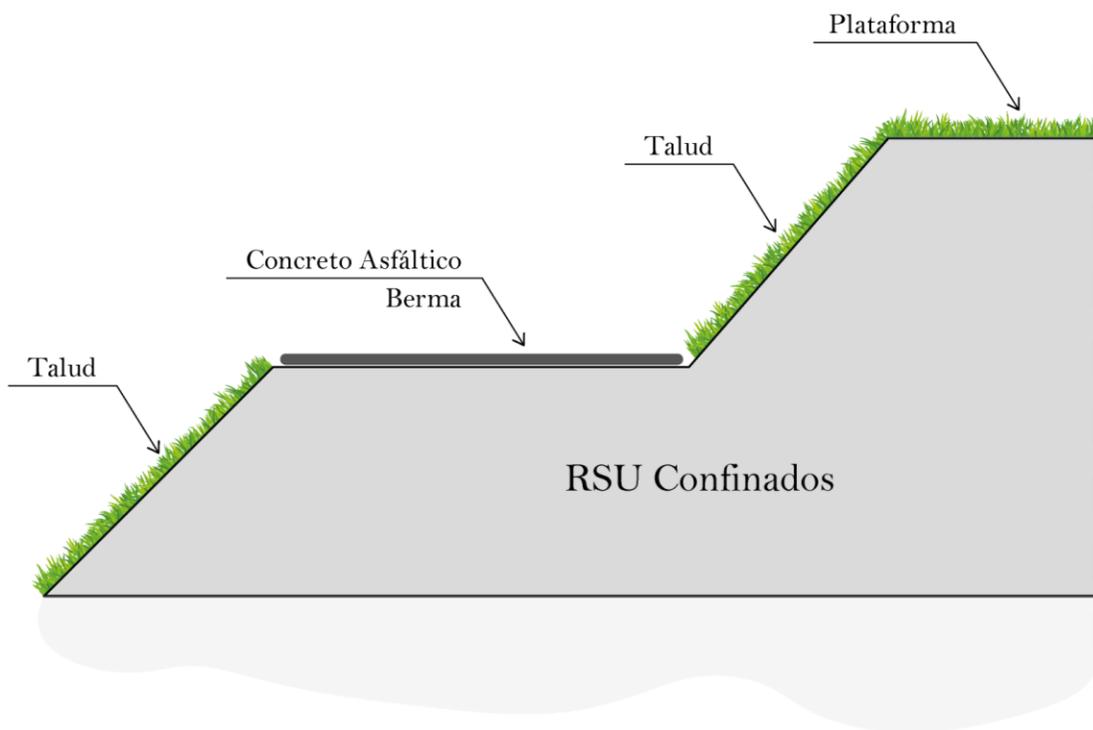


Figura 58. Diagrama de capa de erosión a base de concreto asfáltico para bermas

Fuente: elaboración propia

8. CUBIERTA VEGETAL

Es la etapa final de la estructuración de capas que forma el sistema de sellado o sistema de cubierta final en la cual una capa vegetal tendrá. La función de evitar la erosión de las capas inferiores y dar un aspecto armónico al entorno. Se debe realizar la colocación de una capa vegetal, la cual debe tener un alto contenido de materia orgánica con un espesor mínimo de 0.10 m, y sobre esta debe ser plantado pasto resistente a la desecación y que tenga raíces que no excedan los 0.30 m, por las características de los sitios de disposición final es que se debe limitar el área únicamente al alojamiento del pasto.

Con el objetivo de proteger las capas que componen el sistema de sellado o sistema de cubierta final a fin de prevenir la erosión.



Figura 59. Diagrama del sistema de cubierta final con cobertura vegetal en taludes y plataforma

Fuente: elaboración propia

De igual manera se deben tener en cuenta los siguientes criterios para la colocación de las especies de plantas:

- El espesor de las raíces no debe exceder el espesor del material de cubierta final
- Tolerancia de la cubierta vegetal al biogás
- Resistencia al fuego, insectos u otras plagas
- Adaptación al clima imperante (temperatura, lluvia, sequía, viento)
- Rápida germinación y crecimiento
- Mantenimiento mínimo
- Autopropagación y resistencia
- Alto porcentaje de cobertura en superficie

Está cubierta vegetal deberá contar con un plan de mantenimiento que incluya riego en temporada de estiaje, mismo que debe ser de un promedio de 8 litros/m² para evitar generación de lixiviados. De igual forma, es necesaria una poda, al menos una vez al mes, durante la temporada de lluvias.

8.1. . MATERIAL ORGÁNICO (TIERRA VEGETAL)

La cobertura vegetal consistirá en una capa formada por material orgánico (OH), limo orgánico (MH), o digestato procedente de alguna planta de composta, cuyo espesor debe oscilar entre 0.10 m y 0.30 m sin especificación de compactación.

Podrá colocarse sobre la capa de erosión una geored de polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) de abertura romboidal en taludes para dar una mejor adherencia del material térreo, la cual dará mayor estabilidad y mejor interacción entre la capa de erosión y la cobertura vegetal y podrá funcionar como una capa drenante.

El extendido de la capa orgánica compuesta por tierra rica en elementos orgánicos se realizará con bulldozer, bandeando el material con cuatro pasadas cerrando huella. Para este trabajo se podrán utilizar bulldozer de 14 a 17 toneladas de peso. El bulldozer deberá extender el material hacia el pie del talud o de manera contraria, del pie del talud hacia arriba, dosificando el material de tal manera que la hoja topadora y las orugas no dañen la capa de erosión.

Las características físicas recomendadas para el material térreo a emplear son:

- Porcentaje de finos $\geq 50\%$

- Límite líquido $\geq 50\%$
- Límite plástico $\geq 20\%$
- Peso volumétrico seco máximo 1.30 t/m^3
- Contenido de agua óptimo 35%
- Límites de consistencia con variación de $+5\%$

Una vez colocada la materia orgánica, se colocará el pasto enraizado que mejor se adecue a las condiciones del sitio, y que puede ser de semillas autóctonas. Este pasto debe ser sembrado sin otro tipo de vegetación y puede ser colocado en rollo; es decir, un pasto que está ligeramente crecido y que se implanta sobre la tierra. Se recuerda que el pasto tiene un periodo de adaptación de aproximadamente un (1) mes. En caso de haber huecos donde el pasto no haya enraizado, se deben renovar estos tramos. Otra alternativa es la colocación de pasto en semilla; para tal procedimiento, debe verificarse que la semilla germine y que el crecimiento sea similar en todas las áreas donde fue sembrada, de no ser así, se deberá volver a sembrar para evitar huecos de tierra libre. Al final, la capa de pasto proporcionará una protección contra la erosión por lluvias.

8.2. MANTA ORGÁNICA VEGETAL

Otra de las alternativas para la cubierta vegetal es la colocación de una manta orgánica vegetal con un refuerzo de polipropileno a la cual se le realice el sembrado de semillas de pasto autóctono en conjunto con un sustrato orgánico. Este tipo de mallas permiten un buen trabajo en los taludes, dado que las semillas tienen una mayor adherencia y hay una mayor retención de la tierra vegetal o digestato base desde que la malla funciona a manera de geored, además de tener las siguientes ventajas:

- Retienen el agua de riego o de lluvia al absorberla
- Protege a la semilla y al suelo
- Reduce la velocidad del agua de escurrimiento porque actúa como cojín para el movimiento superficial de la escorrentía evitando erosión en las capas inferiores
- Modera la temperatura del suelo conservando la humedad del mismo para nutrir la cubierta vegetal
- Estimula el rápido crecimiento de la raíz aireando y moderando el desarrollo de la vegetación
- Se mantiene fijada al suelo durante condiciones de viento intermitentes y fuertes.

Para la colocación de esta capa vegetal, se prepara primero, una capa de 0.10 m de espesor conformada por tierra rica en elementos orgánicos, extendida con bulldozer, y bandeando el material con cuatro pasadas cerrando huella. Posteriormente, se coloca la manta orgánica vegetal con un refuerzo de polipropileno sobre el sembrado de semilla del pasto autóctono para colocar encima otra capa de 0.10 m de material orgánico (OH), limo orgánico (MH) o digestato para la protección de la semilla, extendiendo y bandeando el material con cuatro pasadas cerrando huella con bulldozer.

Cobertura Vegetal en Sistema de Capa Sello Limo - Arcilloso

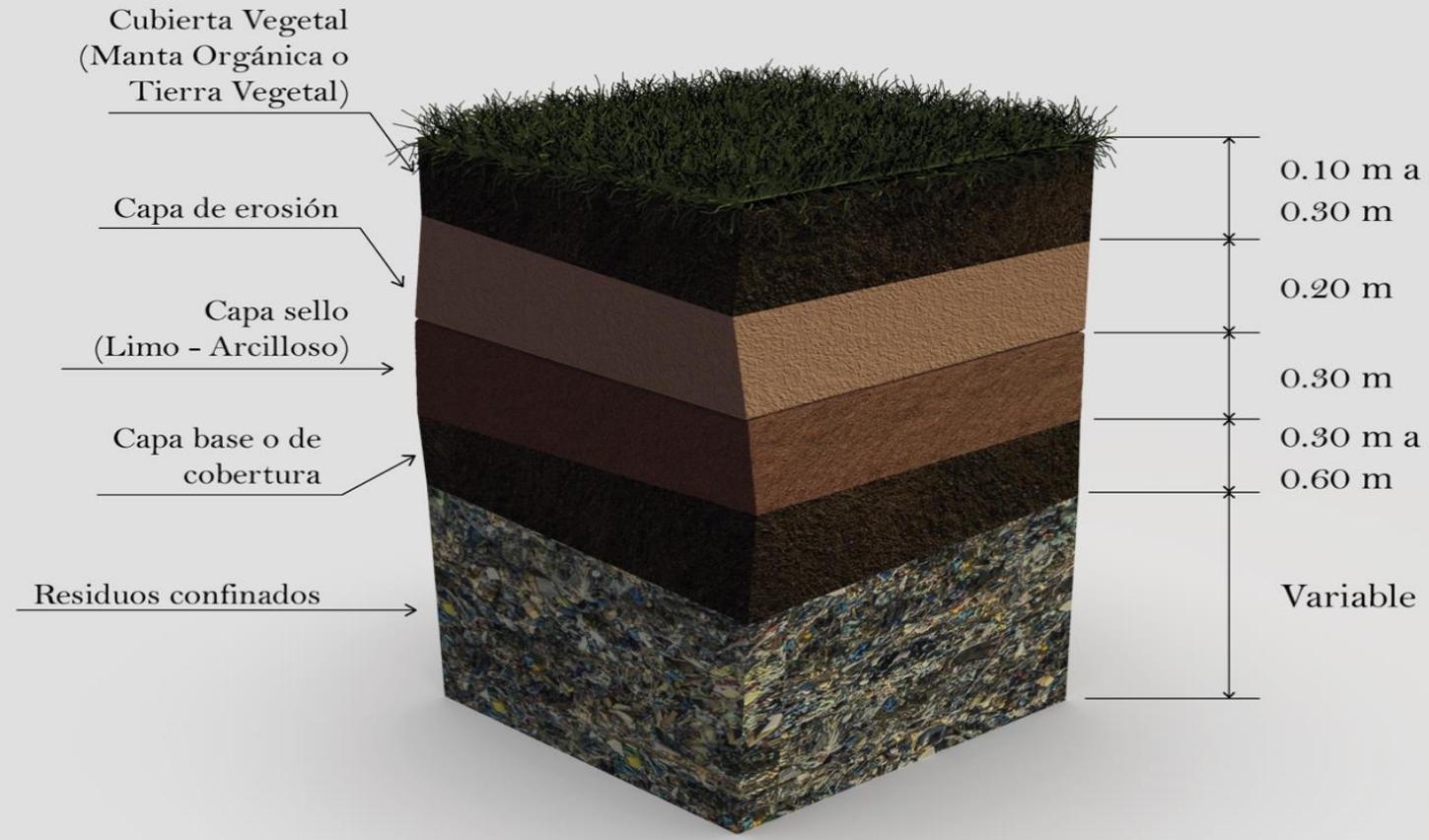


Figura 60. Diagrama de estratificación de cobertura vegetal en sistema de capa sello con material limo-arcilloso

Fuente: elaboración propia

Cobertura Vegetal en Sistema de Capa de Sellado Sintética

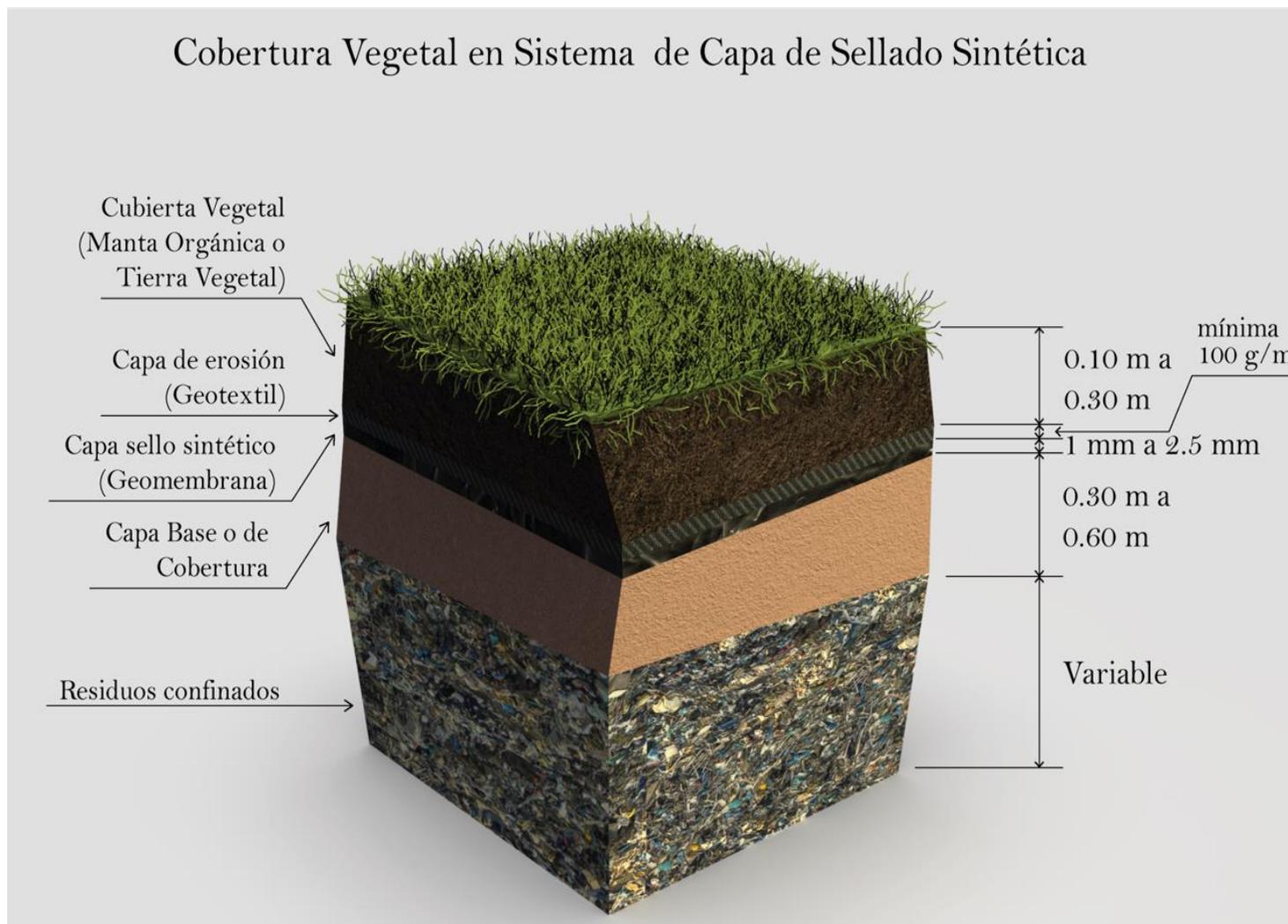


Figura 61. Diagrama de estratificación de cobertura vegetal en sistema de capa sello sintética
Fuente: elaboración propia

Capa Vegetal en Sistema de Capa Sello de Material Térreo Mejorado

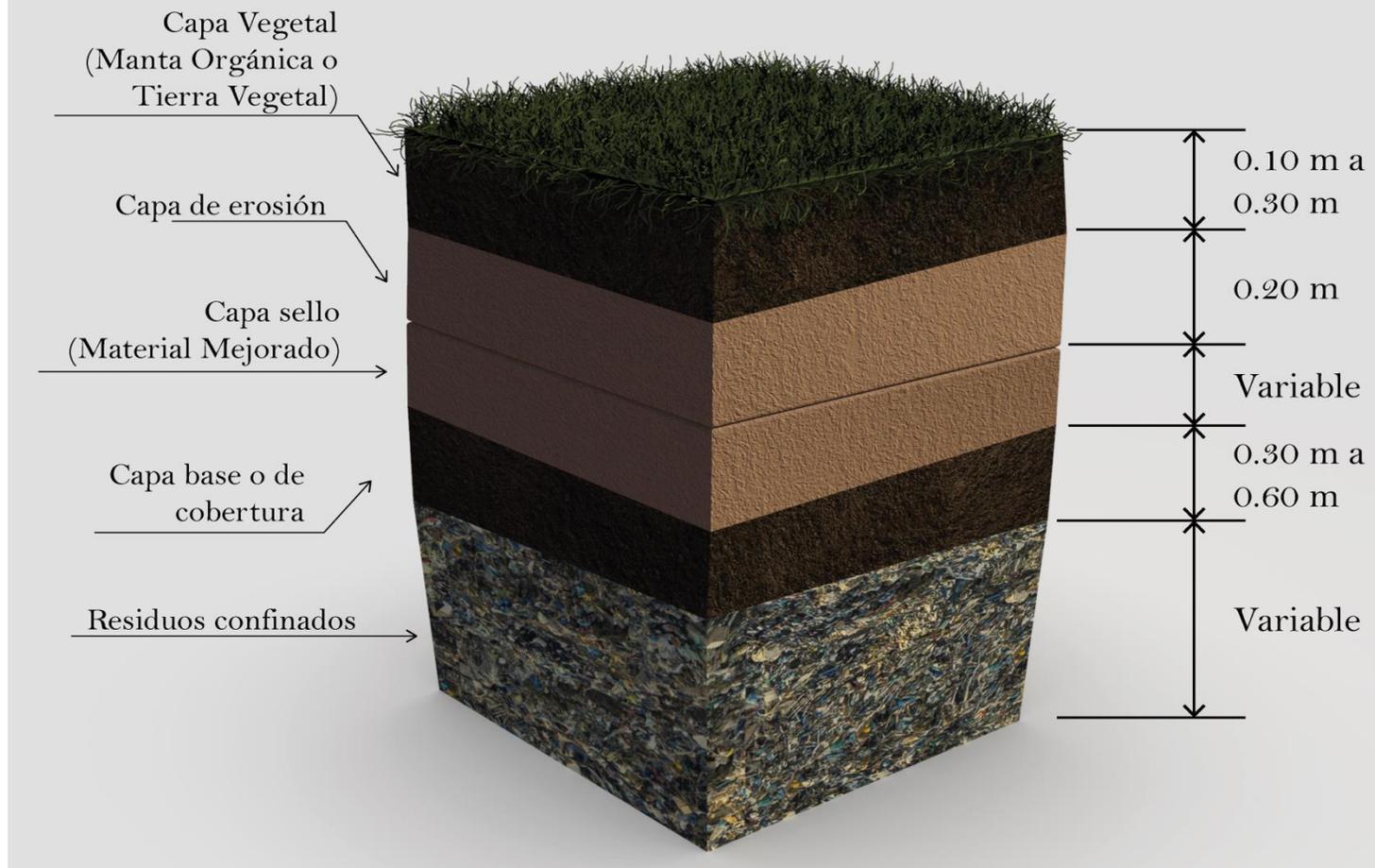


Figura 62. Diagrama de estratificación de cobertura vegetal en sistema de capa sello de material térreo mejorado
Fuente: elaboración propia

DIAGRAMA DE FLUJO APLICABLE AL PROCEDIMIENTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE SELLADO O SISTEMA DE CUBIERTA FINAL

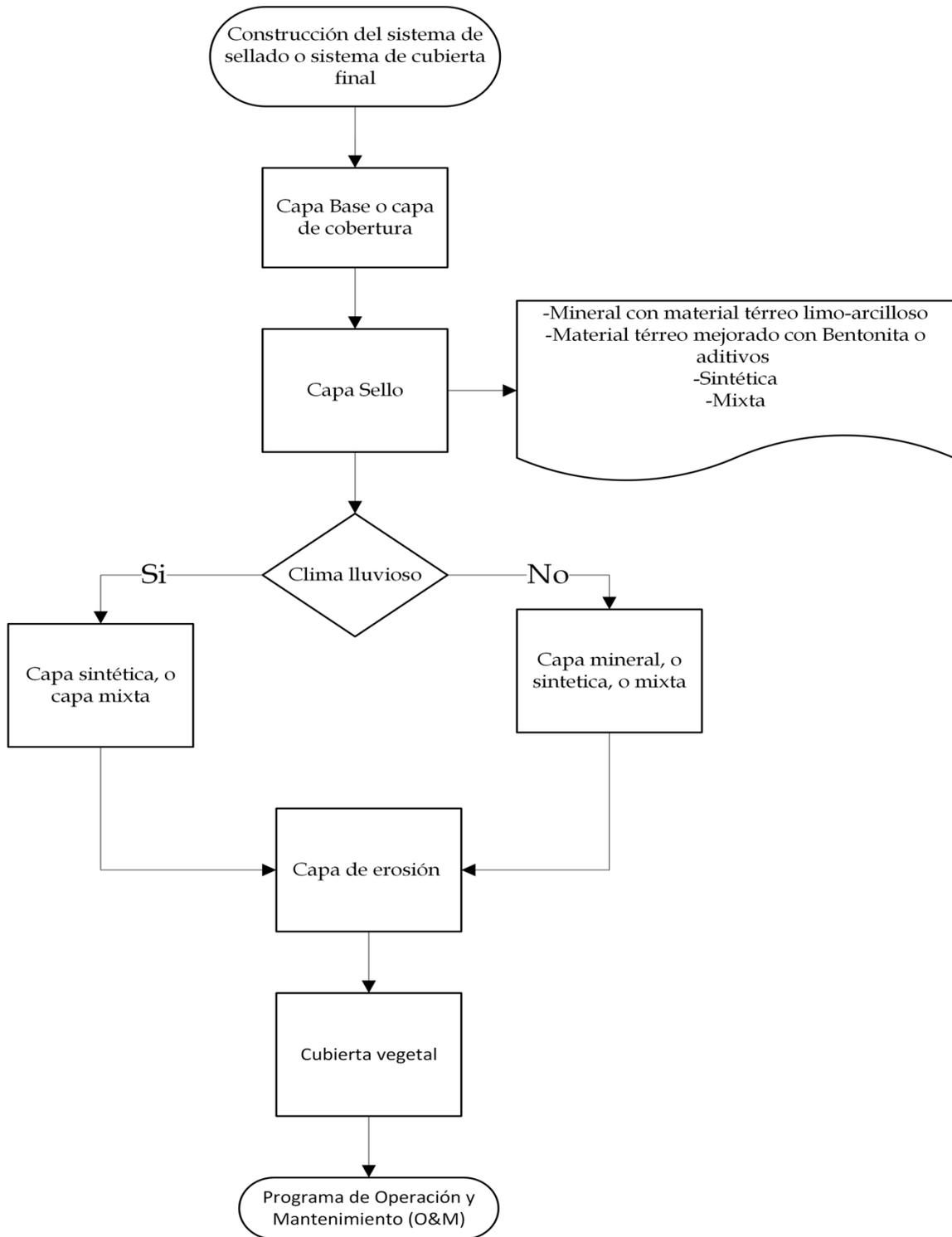


Figura 63. Diagrama de flujo del procedimiento de construcción del sistema de sellado o sistema de cubierta final

Fuente: elaboración propia

9. SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DE BIOGÁS Y LIXIVIADO

Los sistemas de control de biogás y lixiviado se deberán construir una vez esté conformada la estructura de clausura del sitio y los residuos sólidos depositados hayan alcanzado el grado deseado de compactación, lo anterior, con el objetivo de tener definida la configuración topográfica y dar seguridad a la superficie de trabajo de las siguientes etapas.

Los sistemas de monitoreo y control de biogás y lixiviado se pueden realizar en estructuras tanto verticales como horizontales, mismas que se podrán construir antes o después de la colocación de la capa sello. Es recomendable realizar el procedimiento mencionado antes de colocar la capa sello y destinar, dentro del mismo sitio, una zona para disponer de los residuos generados por los trabajos para la colocación de los sistemas. En particular, las excavaciones se pueden realizar a la par que se va colocando la capa sello, dejando libre la zona de confinamiento de los residuos producto de excavación o perforación. En caso de que se tome la opción de iniciar la construcción de los sistemas de biogás y lixiviado, una vez colocada la capa sello, se deberá localizar un sitio de disposición final de RSU donde se dispongan los residuos producto de los trabajos realizados.

Es importante tomar en cuenta la interacción entre el agua y el aire para ocupar los vacíos adentro de la masa de residuos confinados, ya que, cuando hay una mayor presencia de agua, se reduce la porosidad, afectando las rutas de movilidad para que el biogás circule y pueda escapar.

Generalmente, los diseños de redes de captación de biogás y lixiviado se hacen tomando en cuenta que el volumen de lixiviados no aumentará debido a la colocación del sistema de sellado aplicado, sin embargo, en los proyectos de cierre y clausura, se debe considerar una solución integral que no aumente la cantidad de lixiviados, sino que disminuya los niveles para su extracción y tratamiento.

9.1. SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DE BIOGÁS

Uno de los principales agentes contaminantes producto de la degradación de los residuos sólidos es el biogás, cuyo control y tratamiento no pueden omitirse, o se correría el riesgo de que se convierta en uno de los principales contaminantes al ser un gas de efecto invernadero y el sitio de disposición final, siga siendo un pasivo ambiental. El biogás se genera, en primer lugar, por la descomposición de la fracción orgánica de los residuos confinados. El biogás

generado por la degradación de los residuos puede considerarse como un combustible natural, no fósil, de alto poder calorífico cuyo principal componente es el metano (CH₄), el cual en proporción equivalente es igual a 25 moléculas de dióxido de carbono (CO₂) por cada molécula de metano (CH₄). La composición del biogás se describe en la Tabla 13.



Figura 64. Proceso de generación y liberación de biogás
Fuente: elaboración propia

Tabla 13. Composición del biogás

Composición del Biogás	
Componente	Porcentaje (%)
Metano (CH ₄)	50–70
Dióxido de Carbono (CO ₂)	30–45
Nitrógeno (N)	1–2
Oxígeno (O)	0–1
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)	0.1–0.40
Vapor de Agua	

Fuente: elaboración propia

El biogás generado es producto de la degradación biológica de los residuos, los gases que se producen en mayor proporción son metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), otro componente es el ácido sulfhídrico (el cual se forma de la mezcla de sulfuro de hidrógeno con el vapor de agua) y nitrógeno.

El gas metano busca salida del interior de las celdas hacia la atmósfera, generando GEI y siendo una latente amenaza de riesgo de explosividad (en espacios cerrados), riesgo que se potencializa cuando el biogás migra fuera del sitio de disposición final y se acumula en estructuras cerradas dentro y fuera del sitio. Las estructuras de mayor potencial para acumular biogás dentro del sitio de disposición final (SDF) son oficinas, bodegas y almacenes. Un riesgo potencial de explosión existe cuando el gas se acumula en los espacios cerrados y la concentración de la sustancia alcanza valores entre el 5% y el 15% por volumen, aumentando el riesgo de convertirse en fuente de ignición.

9.2. MIGRACIÓN DE BIOGÁS

A la migración de biogás, además de presentarse de manera vertical en sitios de disposición final (SDF), sitios no controlados (SNC) y sitios controlados (SC) con ausencia de una impermeabilización en la base, puede sumársele la migración del biogás de manera lateral a través del suelo por difusión molecular (transporte del biogás debido al gradiente de concentración de la sustancia dentro del SDF), así como por gradientes de presión de gas desarrollados debido a las variaciones en las degradaciones de los residuos. El biogás migra, principalmente, debido a los gradientes de presión, y, generalmente, se mueve desde el SDF, donde es generado, hacia áreas de menor presión, o sea donde hay mayor ausencia de residuos a lo largo de trayectorias de poca resistencia.

El alcance de la migración lateral de biogás depende de dónde estén localizadas las trayectorias de poca resistencia, pero también de la permeabilidad del suelo adyacente del SDF. Por lo regular, en suelos de alta permeabilidad, como los arcillosos, se tiene una baja migración lateral, sin embargo, en suelos relativamente permeables, que pueden estar formados por gravas y arenas con un porcentaje bajo de sedimentos y arcillas, la migración lateral de biogás es mayor.

Los conductos potenciales para la migración lateral del biogás en los SNC, SC y SDF sin una capa impermeable en su base pueden ser:

- Fisuras en la cama de rocas minerales
- Fallas geológicas

- Túneles y cavernas naturales o construidos con anterioridad
- Tuberías de instalaciones de servicio subterráneas
- Cuerpos de agua subterráneos

9.3. CRITERIOS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DEL BIOGÁS

Las principales razones para el control de biogás son:

- Alta contaminación atmosférica y su importante contribución al efecto invernadero.
- Captar el biogás desde la parte interior del SDF para limitar las emisiones de olores desagradables para la población circundante.
- Controlar la migración lateral de gases en los límites del SDF.
- Evitar que la presión del biogás sea tal que ocasione una fuerte migración lateral y /o afecte al medio biótico que rodea al sitio.
- Posible riesgo de intoxicación y explosividad en zonas habitacionales en las áreas circundantes al SDF.
- Prevención de emisiones que pongan en peligro la salud de la población por sus características fisicoquímicas.
- Proveer una fuente de energía para un futuro proyecto de aprovechamiento de biogás en caso de existir la cantidad suficiente del componente.

Si el biogás generado en el sitio de disposición final es suficiente, según aquellos estudios de generación y calidad del gas, se podrán, entonces, presentar un proyecto específico que cumpla con los criterios ambientales vigentes para su aprovechamiento energético, por ejemplo, transformándolo en energía eléctrica. De no contar con sistemas de aprovechamiento, los SDF deben quemar el biogás a través de sistemas centrales o individuales después de su captación.

A continuación, se presentan las alternativas técnicamente viables para el control del biogás, cuyo sistema de monitoreo y control puede realizarse por métodos pasivos o activos, ambos conformados por etapas de extracción, conducción y destrucción térmica (quema) del biogás, e incluyen los siguientes aspectos:

- Localización y perforación de pozos de captación y extracción de biogás

- Tuberías de conducción, válvulas de seccionamiento y trampas de condensado
- Sopladores para la extracción de biogás
- Quemadores para la incineración del biogás

Los sistemas de monitoreo y control del biogás mencionados en el párrafo anterior se describen a continuación:

9.4. SISTEMA PASIVO DE CONTROL Y MONITOREO DE BIOGÁS

El sistema pasivo consiste en la construcción y colocación de pozos verticales u horizontales (zanjas o trincheras) centrales y perimetrales que induzcan de manera natural el flujo de los gases hacia la superficie (atmósfera) para lograr una captación, y en donde el biogás es controlado mediante la destrucción térmica pasiva.

Este sistema funciona mediante el principio de presión natural y el mecanismo de convección, los cuales favorecen el movimiento del biogás a través de los estratos de residuos sólidos confinados, siendo este uno de los sistemas de control más económicos y recomendable cuando las características del suelo corresponden a los de uno de baja permeabilidad.

9.5. SISTEMA ACTIVO DE CONTROL Y MONITOREO DE BIOGÁS

El sistema activo consiste en una serie de pozos verticales u horizontales unidos mediante una red de tuberías que permiten la captación y conducción del biogás con ayuda de un extractor (soplador) que permita controlar el movimiento del biogás mediante una presión negativa inducida (succión); de esa manera, el biogás es extraído del sitio de disposición final y se conduce hacia un quemador central para su destrucción térmica (quema o incineración) o hacia un sistema de aprovechamiento.

Este es el sistema más recomendado para el control de los gases en un SDF. Además de ser una de las mejores alternativas cuando se tienen problemas de migración hacia las áreas colindantes como suele suceder con los sitios no controlados.

9.6. CRITERIOS PARA DETERMINAR EL RADIO DE INFLUENCIA Y CANTIDAD DE POZOS DE BIOGÁS

Para lograr una localización con mayor grado de exactitud de los pozos de biogás que conformen el sistema de control y monitoreo de biogás y lixiviado en un SDF, sin importar que se trate de un RS, SC, VCA o SNC, este manual recomienda realizar un estudio de geofísica ambiental, el cual conste de un modelo geofísico y un modelo geoelectrico que expliquen las características del sitio de disposición final. Para lograr resultados confiables se recomienda que para el estudio se realicen sondeos con configuración electrodica para la obtención de tomografías eléctricas, las cuales ayudarán a la identificación de las zonas con mayor volumen de biogás y lixiviado. Gracias a que esta configuración considera factores como el corte geoelectrico para generar un modelo de capas a través de líneas geofísicas con las que es posible explicar de manera más gráfica y exacta, las elevaciones, profundidad y espesor de los horizontes de composición del suelo y subsuelo, así como su resistividad y capacidad de carga. Del mismo modo, el estudio muestra las capas de residuos y sus características, como, por ejemplo, muestra las zonas con filtración y escurrimientos de lixiviados, o zonas donde se pueda hallar estancamientos mostrando si los residuos están o no saturados. Además, muestra las zonas con concentración y generación de biogás y materiales de relleno, lo que da como resultado las bases de diseño y determinación de las zonas donde haya migración y volumen de biogás que esté siendo liberado a la atmósfera y se requiera su control y monitoreo, realizando únicamente la construcción pozos necesarios de los sistemas de control y monitoreo de biogás y lixiviado.

Este estudio recomendado ayudará a la ubicación exacta de las zonas donde se debe controlar y monitorear el biogás y lixiviado, sin embargo, si no se realiza se puede hacer la ubicación, perforación e instrumentación de los pozos de los sistemas de control y monitoreo a través de los siguientes criterios:

Los pozos de biogás deben ubicarse a cierta distancia entre sí, de tal manera que sus zonas o radios de influencia se traslapen. Para ello, existen tres tipos de arreglos que se pueden utilizar para la ubicación de los pozos verticales de extracción de biogás.

El primer arreglo consiste en colocar los pozos en los vértices de un triángulo equilátero como se muestra en la Figura 65. Con este arreglo se conseguiría un traslape de las zonas de influencia del 27%.

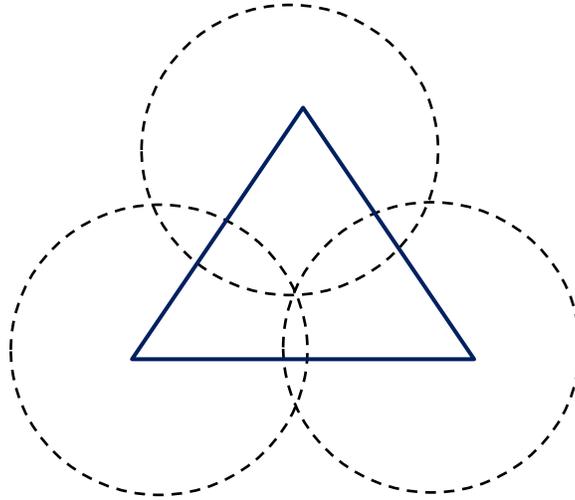


Figura 65. Diagrama de arreglo triangular para determinación de radio de influencia para ubicación de pozos de biogás

Fuente: elaboración propia

El segundo arreglo consiste en la colocación de los pozos en los vértices de un cuadrado como se muestra en la Figura 66. Con este arreglo se logra conseguir un traslape de las zonas de influencia del 60%.

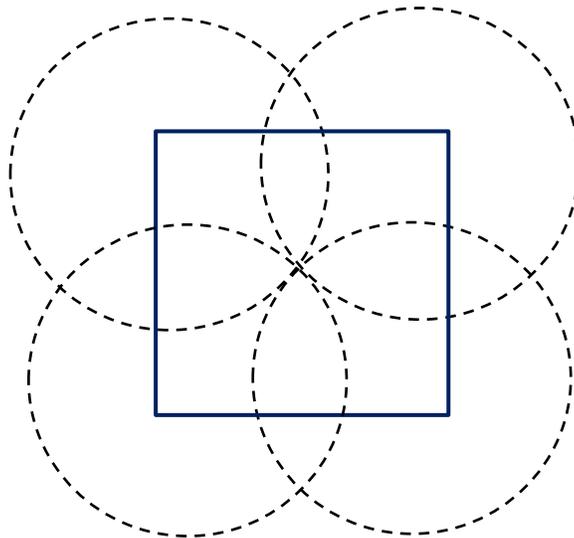


Figura 66. Diagrama de arreglo en cuadrado para determinación de radio de influencia para ubicación de pozos de biogás

Fuente: elaboración propia

Para el tercer arreglo se considera colocar los pozos en los vértices de un hexágono como se muestra en la Figura 67. Con este arreglo se logra un traslape de las zonas de influencia del 100%.

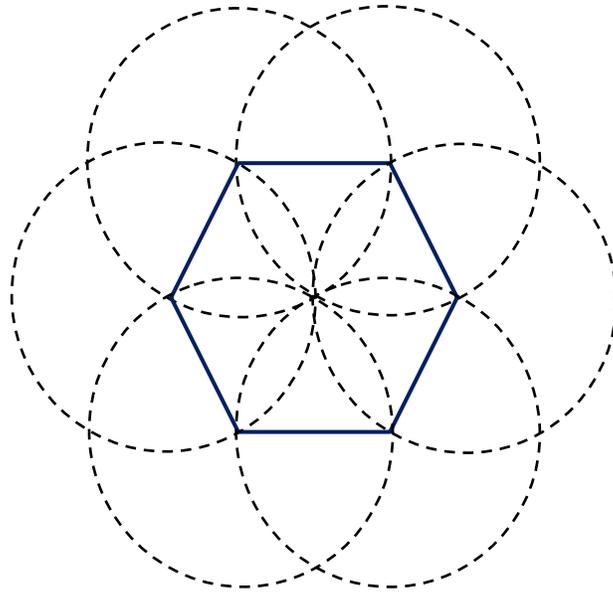


Figura 67. Diagrama de arreglo hexagonal para determinación de radio de influencia para ubicación de pozos de biogás

Fuente: elaboración propia

Para la determinación de la separación entre los pozos de extracción, es importante considerar el radio de influencia, ya que se presenta un movimiento radial del biogás en todas las direcciones hacia el pozo en una forma simétrica, de tal manera que el caudal (Q) que se extrae del pozo es igual al caudal que pasa por cualquier sección del sitio. Este valor (Q) depende de muchas variables, tales como la composición heterogénea de los diferentes estratos de los residuos depositados (que es por donde se mueve el biogás), el grado de degradación de los residuos que dan origen al biogás, la temperatura, espesor de los residuos y el grado de compactación.

Para la definición del radio de influencia de cada pozo (RDI), se deben tomar los criterios antes mencionados y las siguientes consideraciones:

- Los pozos en el interior de un SDF tienen un radio entre 35 m y 80 m.
- Los pozos en el perímetro de un SDF tienen un radio entre 18 m y 45 m.

- Los pozos en SDF poco profundos o de poca altura, por lo general, tienen un contenido de humedad alta y un radio de influencia de entre 18 m y 50 m.
- Los pozos en sitios de disposición final profundos o de gran altura, por lo general, tienen un contenido de humedad baja con un radio de influencia de entre 35 m y 100 m.

La determinación de distancia entre pozos también depende de factores intrínsecos de las condiciones específicas del sitio, asociados al riesgo y a la óptima captación de biogás, tales como:

- La vida del SDF y el tiempo que pueda tener sin una captación adecuada y/o sin una operación idónea, como la conformación y cobertura de los residuos.
- La composición de los RSU, la cual pudo no llevarse a cabo de forma ideal, o sin el adecuado control en la entrada de los residuos al relleno.
- Permeabilidad de la masa de residuos sólidos urbanos (RSU).
- Profundidad o altura de los residuos confinados en el sitio de disposición final.
- Ubicación (se debe tomar en cuenta si el sitio de disposición final esté localizado en una zona que pueda o no suponer un riesgo para los habitantes).
- Condiciones atmosféricas

Uno de los factores determinantes para la resolución del radio de influencia y la separación entre pozos, es la permeabilidad, que se define como la capacidad que tienen los gases generados para moverse dentro de la masa de residuos.

Comúnmente, los diseños de estas redes de captación se hacen tomando en cuenta que el volumen de lixiviados no aumentara por la capa de sellado aplicado, sin embargo, se debe considerar solución integral para los proyectos de clausura y saneamiento, donde no solo no aumente la cantidad de lixiviados, si no que disminuyan los niveles para su extracción y tratamiento.

Es posible implementar la alternativa de instalación de pozos mixtos de extracción de biogás y lixiviados con los que se ayuda a reducir el volumen de agua, facilitando al aire ocupar los vacíos dejados por la extracción de lixiviado y aumentando la capacidad de extracción de biogás en los pozos para, consecuentemente, poder ampliar el radio de influencia.

Por ello, en los proyectos de cierre y clausura de SDF donde los residuos han recibido una compactación mínima y una capa de cobertura diaria durante la operación y vida útil del sitio, como son los rellenos sanitarios (RS) o sitios controlados (SC), se recomienda contemplar un diseño de extracción de biogás con un radio de influencia de 40 m a 50 m, siendo este el intervalo de la distancia propuesta que habrá entre pozos para garantizar la captación de biogás y lograr así un funcionamiento óptimo en el sistema de control y monitoreo de la sustancia.

Tomando en cuenta el criterio del primer arreglo de colocación de pozos de biogás (Figura 65) y un radio de influencia de 45 m, además de considerar los factores intrínsecos de los sitios de disposición final antes señalados, es posible utilizar la siguiente regla para poder determinar con mayor precisión la separación más idónea entre pozos, la cual puede llegar a ser de 77.94 m, como se muestra en la Figura 68.

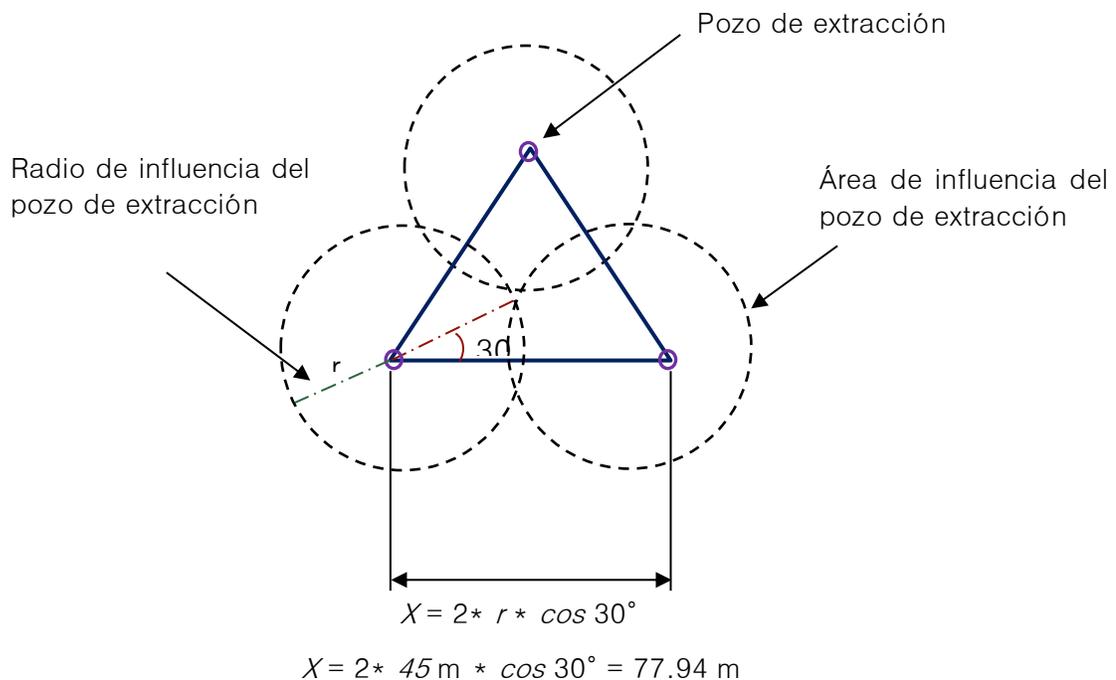


Figura 68. Diagrama de determinación de separación de pozos de biogás con un arreglo triangular en rellenos sanitarios y sitios controlados

Fuente: elaboración propia

Con respecto al diseño del sistema de extracción de biogás en vertederos a cielo abierto (VCA) o sitios no controlados (SNC), específicamente para la ubicación de los pozos del sistema de control y monitoreo, el radio de influencia deberá tener una distancia mínima de 30 m, y máxima de 40 m, medida desde el centro o eje del pozo, garantizando así la mayor captación de biogás posible para conseguir un funcionamiento óptimo en el sistema de control y monitoreo de biogás. Debido a que comúnmente, los residuos en los VCA o SNC no son sometidos a ningún proceso de conformación y compactación, la cantidad de biogás encontrada suele ser baja, sin embargo, es probable que, con la conformación y compactación, así como con la colocación de los sistemas de cubierta recomendados en este manual, se inicie el proceso de degradación de residuos y generación de biogás.

Por lo mencionado en el párrafo anterior y tomando en consideración los factores intrínsecos de los SDF ya señalados, se tomará el criterio del arreglo de colocación de pozos de biogás de la Figura 65 y el radio de influencia establecido para VCA o SNC será de 30 m, de forma tal que la separación entre los pozos para este tipo de sitios debe ser de 51.96 m, como se muestra en la Figura 69.

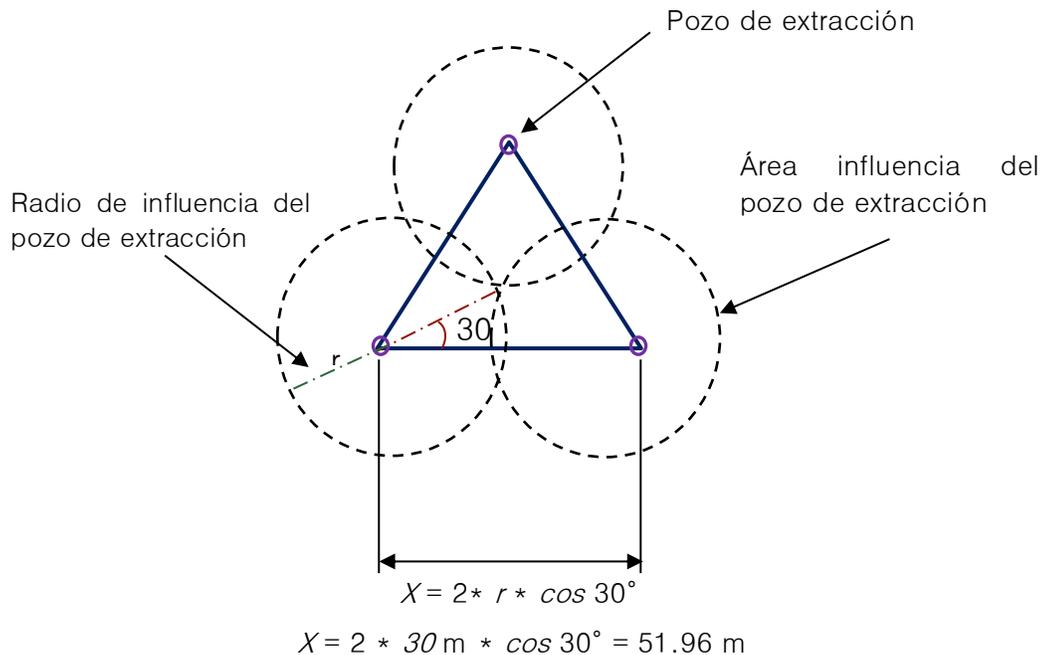


Figura 69. Diagrama de determinación de separación de pozos de biogás con un arreglo triangular aplicable para la clausura y saneamiento de VCA o SNC

Fuente: elaboración propia

Otra ecuación que ayuda al cálculo del espaciamiento de los pozos de biogás es la siguiente:

$$S = \left(\left[\frac{(2 - O_1)}{100} \right] * R \right) * 100$$

Donde:

S = Espaciado entre pozos

O₁ = Traslape requerido

R = Radio de influencia del pozo de extracción

Con esta ecuación se obtiene el mismo resultado en cuanto a la distancia establecida para los pozos verticales para SNC.

$$s = \left(\left[\frac{(2 - 0.27)}{100} \right] * 30 \right) * 100 = \mathbf{51.96 \text{ m}}$$

Por lo tanto, se recomienda una separación mínima entre pozos verticales para SNC o VCA de 50 m, como se muestra en la Figura 70.

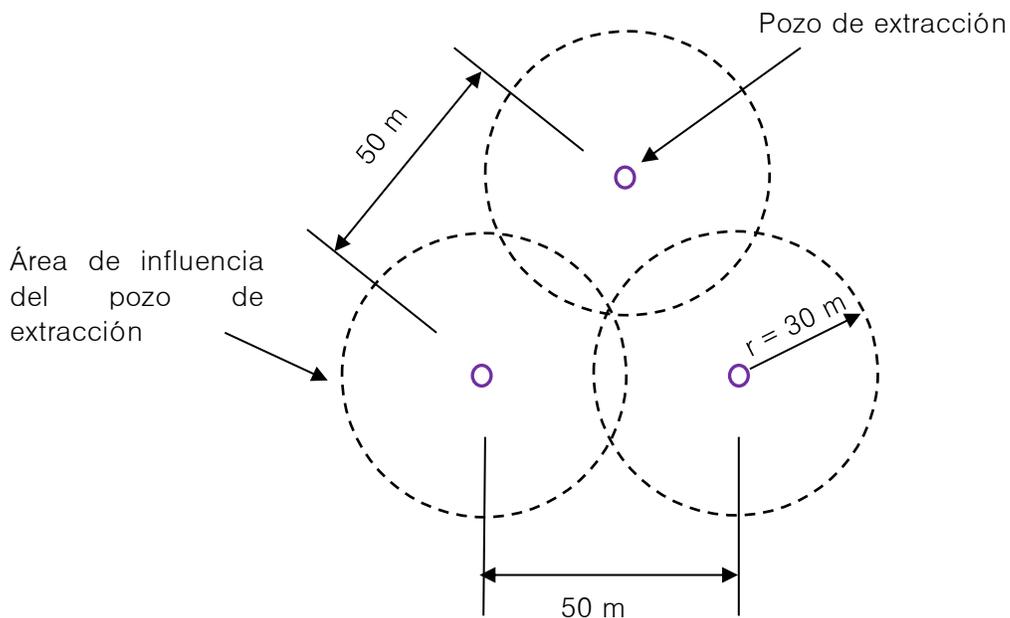


Figura 70. Diagrama de separación mínima entre pozos de biogás en la clausura y saneamiento de SNC o VCA

Fuente: elaboración propia

10. ALTERNATIVAS DE SISTEMAS DE CONTROL Y MONITOREO DE BIOGÁS MEDIANTE POZOS VERTICALES

Una vez establecido en el proyecto que los pozos de extracción, monitoreo y control de biogás serán verticales, como se pudo observar en el manual el paso siguiente es determinar y establecer la separación entre pozos, una vez establecidos estos dos puntos, se debe diseñar el pozo y su instrumentación. Para tales motivos, este manual propone los siguientes diseños de pozos verticales de control y monitoreo de biogás:

10.1. POZO TIPO A. SISTEMA DE DESTRUCCIÓN TÉRMICA PASIVA CON TUBO DE 4" O 6" SIN TRAMPA DE CONDENSADO

Se realiza la perforación de un pozo con un diámetro de 0.60 m a 0.80 m que abarque del 70% al 80% del estrato de residuos confinados. Dicho pozo se rellenará con un filtro a base de material pétreo basáltico que cuente con una granulometría de 2" de diámetro sin finos. Al interior y al centro del pozo se colocará un tubo de PVC cédula 40 u 80, o HDPE de 4" o 6" de diámetro que deberá llegar 1.00 m antes de la profundidad total del pozo. Al tubo se le deberán realizar ranuras de 0.10 m de largo por 0.005 m de ancho en forma de trébol por todo alrededor; a cada 0.05 m, las perforaciones del tubo deben abarcar al menos el 75% de la longitud de la pieza que tenga contacto con la capa de residuos confinados. También se deberá colocar una tapa ciega en el fondo o base.

Como parte del sistema de sellado del pozo, se colocará una mezcla de bentonita con material limo-arcilloso (tepetate) alrededor del tubo, entre el estrato de residuos sólidos confinados y la capa sello. La mezcla de bentonita con material limo-arcilloso se realizará en una proporción de al menos 20% y 80% respectivamente. Una vez homogenizados los materiales, será necesario aplicar una humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM para posteriormente verterlo alrededor del tubo y proceder a su compactación con pisón de mano o mecánico.

En la superficie del pozo, en el nivel 0.00 m, se deberá construir un sistema de protección, el cual podrá ser mediante la construcción de una placa de concreto con dimensiones de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. Previo al colado de la placa, se debe considerar la colocación de un tubo de un diámetro mayor al tubo del pozo, para que al momento del colado de la losa y en todo momento este tubo quede adherido a la placa de concreto, y así

permitir el libre deslizamiento de los tubos que forman parte del sistema del pozo. Este sistema ayudará a que la placa de concreto se comporte conforme se presenten los asentamientos diferenciales y evitar una flotación o ruptura.

Por encima de la placa de concreto, en el nivel 0+ 0.15 m, se sustituirá el tubo de PVC o HDPE por un tubo de acero galvanizado de 2" de diámetro y 1.50 m de altura efectiva, mismo que será denominado *cabezal*, y cuya función será la destrucción térmica del biogás. En la base del cabezal deberá colocarse una válvula de control de flujo y un puerto de muestreo; se recomienda utilizar una válvula de espiga para medir la presión de vacío, el flujo, y la composición del biogás. En la punta del tubo, será necesario colocar un capuchón, conocido como gorro chino o sombrero para ducto galvanizado, o, de igual manera, se podrá colocar un arrestador de flama.

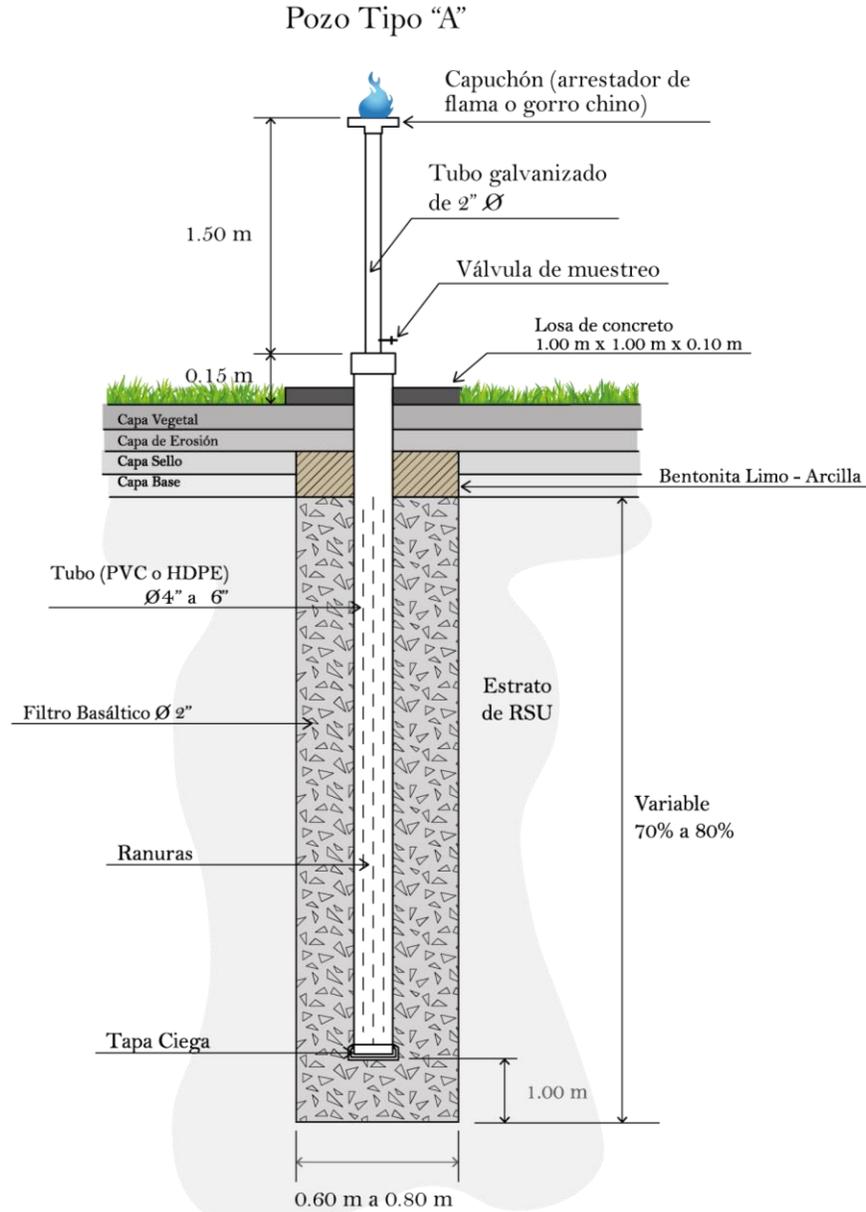


Figura 71. Diagrama de pozo tipo A para el sistema de control, monitoreo y destrucción pasiva de biogás

Fuente: elaboración propia

10.2. POZO TIPO B. SISTEMA DE DESTRUCCIÓN TÉRMICA PASIVA CON TUBO DE 6" SIN TRAMPA DE CONDENSADO Y TUBO INTERIOR DE 1" PARA MONITOREO

Consiste en la perforación de un pozo con diámetro de 0.60 m a 0.80 m, que abarque del 70% al 80% el estrato de residuos confinados que debe ser rellenado con un filtro a base de material pétreo basáltico con una granulometría de 2" de diámetro sin finos. Al interior y al centro del pozo se colocará un tubo de PVC cédula 40 u 80 o HDPE de 6" de diámetro hasta que llegue a 1.00 m antes de la profundidad total del pozo. Alrededor del tubo se deberán realizar ranuras de 0.10 m de largo por 0.005 m de ancho en forma de trébol a cada 0.05 m. Las perforaciones del tubo deben abarcar al menos el 75% de la longitud de la superficie del mismo que tenga contacto con la capa de residuos confinados, y, de igual manera, se deberá colocar una tapa ciega en el fondo o base.

Al interior del tubo principal se colocará un tubo de monitoreo equipado por otro tubo de PVC cédula 40 u 80, o HDPE de 1" de diámetro, con perforaciones de 1/2" a cada 0.10 m en forma de trébol alrededor. Las perforaciones del tubo deben abarcar al menos el 75% de la longitud que tenga contacto con el tubo principal. El tubo tendrá una longitud del 50% del tubo principal y deberá llegar al nivel 0+0.50 m. Así mismo, deberá estar equipado en la parte superior con una válvula para monitoreo y control de flujo y un puerto de muestreo, mismo que puede ser una válvula de espiga para medir la presión de vacío, el flujo, y la composición del biogás.

Como parte del sistema de sellado del pozo, se colocará una mezcla de bentonita con material limo-arcilloso (tepetate) alrededor del tubo, entre el estrato de residuos sólidos confinados y la capa sello. La mezcla de bentonita con material limo-arcilloso se realizará en una proporción de al menos 20% y 80% respectivamente. Una vez determinada la proporción y homogenización de los materiales, será necesario aplicar una humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM para posteriormente verterlo alrededor del tubo para después compactar la mezcla con un pisón de mano o mecánico.

Como parte del sistema de sellado del pozo, se colocará una mezcla de bentonita con material limo-arcilloso (tepetate) alrededor del tubo, entre el estrato de residuos sólidos confinados y la capa sello. La mezcla de bentonita con material limo-arcilloso se realizará en una proporción de al menos 20% y 80% respectivamente. Una vez homogenizados los materiales, será necesario aplicar una humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM para posteriormente verterlo

alrededor del tubo y proceder a su compactación con pisón de mano o mecánico.

En la superficie del pozo, en el nivel 0.00 m, se deberá construir un sistema de protección, el cual podrá ser mediante la construcción de una placa de concreto con dimensiones de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. Previo al colado de la placa, se debe considerar la colocación de un tubo de un diámetro mayor al tubo del pozo, para que al momento del colado de la losa y en todo momento este tubo quede adherido a la placa de concreto, y así permitir el libre deslizamiento de los tubos que forman parte del sistema del pozo. Este sistema ayudará a que la placa de concreto se comporte conforme se presenten los asentamientos diferenciales y evitar una flotación o ruptura.

Por encima de esta placa se sustituirá el tubo de PVC o HDPE por un tubo de acero galvanizado de 2" de diámetro y 1.50 m de altura efectiva, mismo que será denominado *cabeza*, y cuya función será la destrucción térmica del biogás. En la base del cabezal deberá colocarse una válvula de control de flujo y un puerto de muestreo; se recomienda utilizar una válvula de espiga para medir la presión de vacío, el flujo, y la composición del biogás. En la punta del tubo, será necesario colocar un capuchón conocido como gorro chino o sombrero para ducto galvanizado, o, de igual manera, se podrá colocar un arrestador de flama.

Pozo Tipo "B"

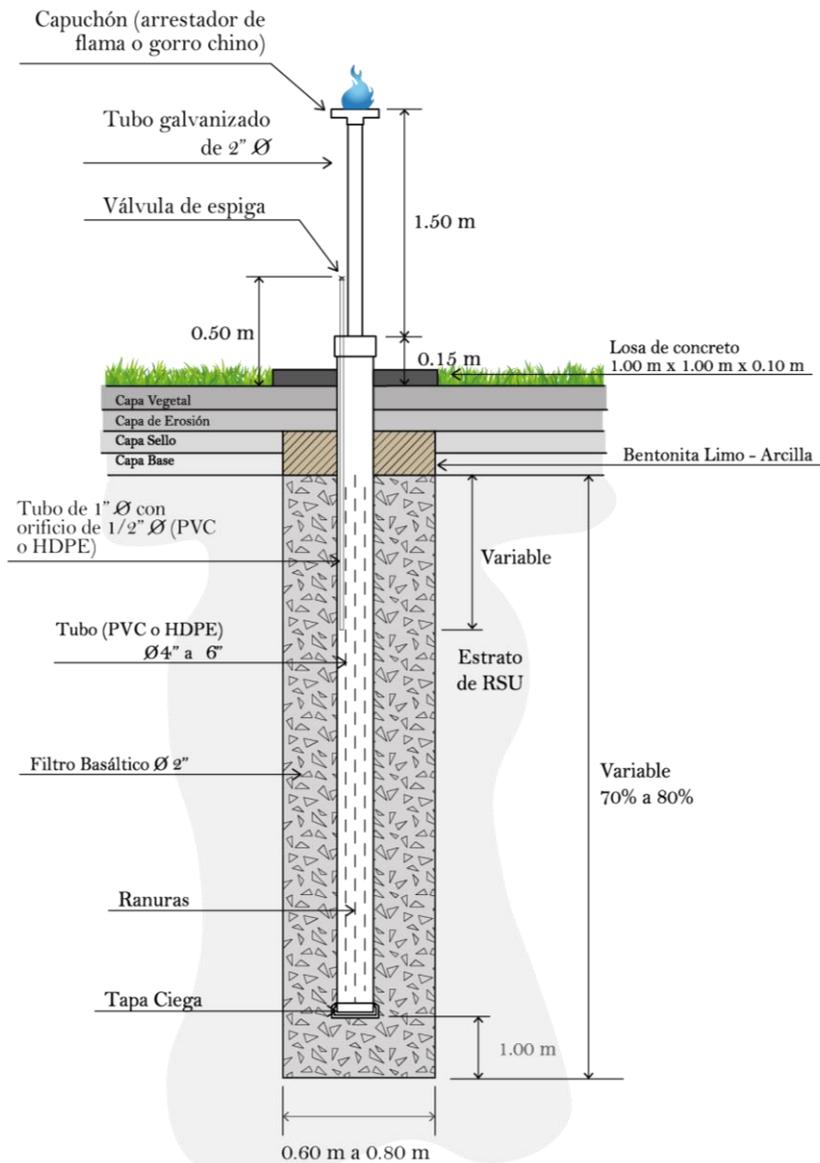


Figura 72. Diagrama de pozo tipo B para el sistema de control, monitoreo y destrucción pasiva de biogás

Fuente: elaboración propia

10.3. POZO TIPO C. SISTEMA DE DESTRUCCIÓN TÉRMICA PASIVA CON TUBO DE 4" Y TRAMPA DE CONDENSADO

Se realiza la perforación de un pozo con un diámetro de 0.60 m a 0.80 m, el cual abarque del 70% al 80% el estrato de residuos confinados. Dicho pozo se deberá rellenar con un filtro a base de material pétreo basáltico con una granulometría de 2" de diámetro sin finos. En el interior y al centro del pozo se colocará un tubo de PVC cédula 40 u 80 o HDPE de 4" de diámetro hasta llegar a 1.00 m antes de la profundidad total del mismo. Alrededor del tubo se debe realizar ranuras de 0.10 m de largo por 0.005 m de ancho en forma de trébol a cada 0.05 m. Las perforaciones del tubo deben abarcar al menos el 75% de la longitud del tubo que tenga contacto con la capa de residuos confinados, así mismo, se deberá colocar una tapa ciega en el fondo o base. Una vez que el tubo central de 4" cubra la zona de residuos, se colocará una reducción a 3" del mismo material del tubo de 4" para contener el sistema de trampas de condensado. El tubo de 3" deberá llegar al nivel 0+ 0.15 m.

Para el detalle de colocación de trampa de condensado, ver apartado *"Trampas de Condensado En Pozos Verticales"*

Como parte del sistema de sellado del pozo, se colocará una mezcla de bentonita con material limo-arcilloso (tepetate) alrededor del tubo, entre el estrato de residuos sólidos confinados y la capa sello. La mezcla de bentonita con material limo-arcilloso se realizará en una proporción de al menos 20% y 80% respectivamente. Una vez homogenizados los materiales, será necesario aplicar una humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM para posteriormente verterlo alrededor del tubo y proceder a su compactación con pisón de mano o mecánico.

En la superficie del pozo, en el nivel 0.00 m, se deberá construir un sistema de protección, el cual podrá ser mediante la construcción de una placa de concreto con dimensiones de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. Previo al colado de la placa, se debe considerar la colocación de un tubo de un diámetro mayor al tubo del pozo, para que al momento del colado de la losa y en todo momento este tubo quede adherido a la placa de concreto, y así permitir el libre deslizamiento de los tubos que forman parte del sistema del pozo. Este sistema ayudará a que la placa de concreto se comporte conforme se presenten los asentamientos diferenciales y evitar una flotación o ruptura.

En la base del cabezal deberá colocarse una válvula de control de flujo y un puerto de muestreo; se recomienda utilizar una válvula de espiga para medir la

presión de vacío, el flujo, y la composición del biogás. En la punta del tubo, será necesario colocar un capuchón conocido como gorro chino o sombrero para ducto galvanizado, o, de igual manera, se podrá colocar un arrestador de flama.

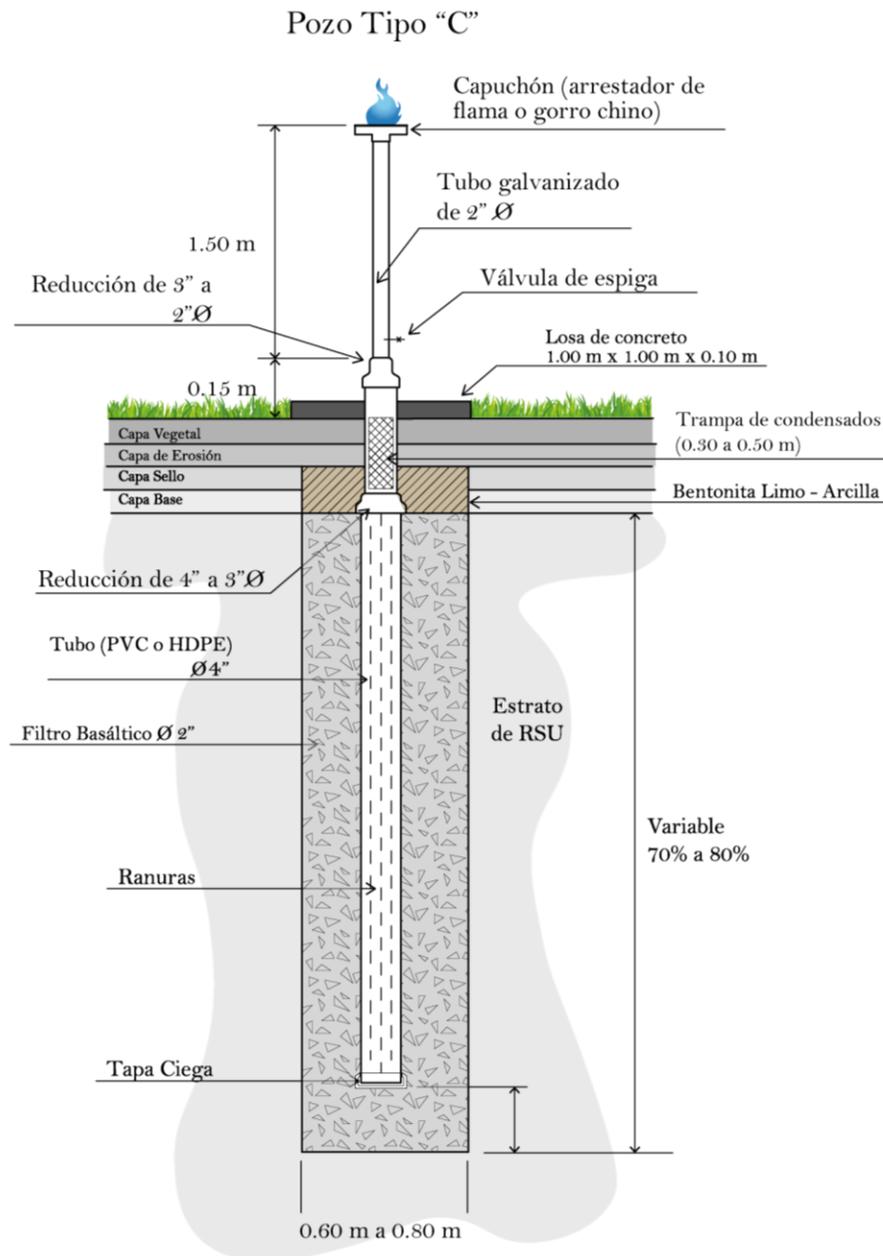


Figura 73. Diagrama de pozo tipo C para el sistema de control, monitoreo y destrucción pasiva de biogás

Fuente: elaboración propia

10.4. POZO TIPO D. SISTEMA DE DESTRUCCIÓN TÉRMICA PASIVA CON TUBO DE 6", JUNTA TELESCÓPICA DE 4" Y TRAMPA DE CONDENSADO

Se realiza la perforación de un pozo con un diámetro de 0.60 m a 0.80 m, el cual abarque del 70% al 80% el estrato de residuos confinados. Dicho pozo se deberá rellenar con un filtro a base de material pétreo basáltico con una granulometría de 2" de diámetro sin finos. En el interior y al centro del pozo se colocará un tubo de PVC cédula 40 u 80 o HDPE de 4" de diámetro hasta llegar a 1.00 m antes de la profundidad total del mismo. Alrededor del tubo se debe realizar ranuras de 0.10 m de largo por 0.005 m de ancho en forma de trébol a cada 0.05 m. Las perforaciones del tubo deben abarcar al menos el 75% de la longitud del tubo que tenga contacto con la capa de residuos confinados, así mismo, se deberá colocar una tapa ciega en el fondo o base. Una vez que el tubo central de 6" abarque la zona de residuos, se le colocará la junta telescópica, sustituyéndolo por un tubo de 4" del mismo material para contener el sistema de trampas de condensado.

El tubo de 4" tendrá una función deslizante a la que se le denominará junta telescópica, cuya función es actuar en conjunto con los asentamientos diferenciales provocados por la degradación de los residuos. Dependiendo del sistema de cubierta final del proyecto, el tubo tendrá una longitud de entre 1.80 m a 2.00 m para permitir que la tubería pase las capas del sistema de cubierta final y al menos 0.50 m quedarán dentro del tubo perforado de 6" que se aloja en el estrato de residuos.

Para este sistema, el tubo de 6" funcionará como funda del tubo de 4"; es decir, el segundo irá dentro del primero, el principal. El sistema de condensado se instalará por encima del nivel de la capa sello dentro de una sección del tubo de 4" de diámetro. La junta telescópica conformada por el tubo de 4" se colocará por medio de una reducción de 6" a 4", reducción a la que debe realizarse las adecuaciones pertinentes para que el tubo de 4" se introduzca a una profundidad de 0.50 m dentro del tubo de extracción de 6", y se deberá poner un tope provisional para que al llegar al nivel 0+ 0.15 m pueda ser fijado por una placa de concreto.

Para el detalle de colocación de trampa de condensado, ver apartado *"Trampas de Condensado En Pozos Verticales"*

Como parte del sistema de sellado del pozo, se colocará una mezcla de bentonita con material limo-arcilloso (tepetate) alrededor del tubo, entre el estrato de residuos sólidos confinados y la capa sello. La mezcla de bentonita

con material limo–arcilloso se realizará en una proporción de al menos 20% y 80% respectivamente. Una vez homogenizados los materiales, será necesario aplicar una humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM para posteriormente verterlo alrededor del tubo y proceder a su compactación con pisón de mano o mecánico.

En la superficie del pozo, en el nivel 0.00 m, se deberá construir un sistema de protección, el cual podrá ser mediante la construcción de una placa de concreto con dimensiones de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. Previo al colado de la placa, se debe considerar la colocación de un tubo de un diámetro mayor al tubo del pozo, para que al momento del colado de la losa y en todo momento este tubo quede adherido a la placa de concreto, y así permitir el libre deslizamiento de los tubos que forman parte del sistema del pozo. Este sistema ayudará a que la placa de concreto se comporte conforme se presenten los asentamientos diferenciales y evitar una flotación o ruptura.

En la base del cabezal deberá colocarse una válvula de control de flujo y un puerto de muestreo; se recomienda utilizar una válvula de espiga para medir la presión de vacío, el flujo, y la composición del biogás. En la punta del tubo, será necesario colocar un capuchón conocido como gorro chino o sombrero para ducto galvanizado, o, de igual manera, se podrá colocar un arrestador de flama.

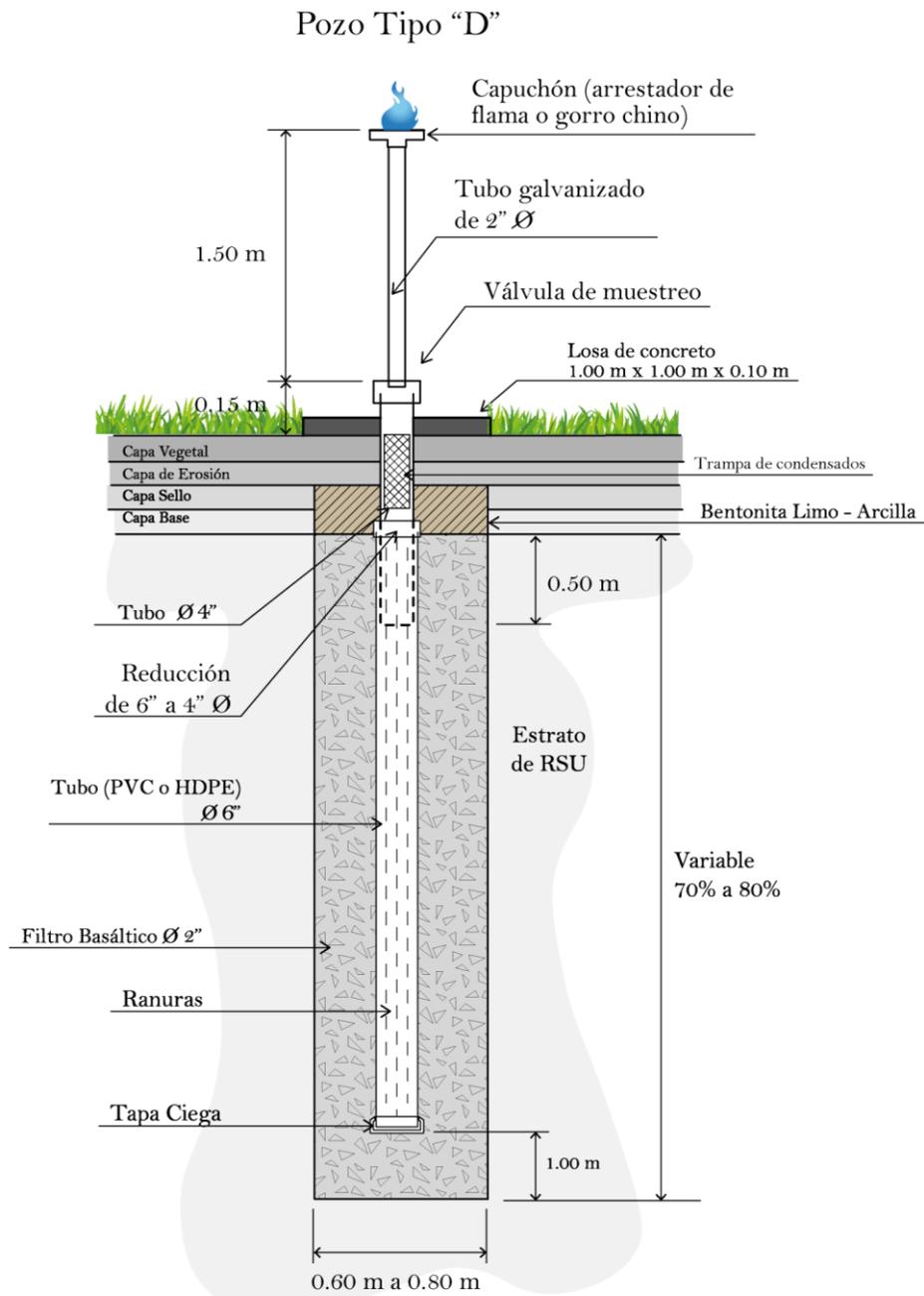


Figura 74. Diagrama de pozo tipo D para el sistema de control, monitoreo y destrucción pasiva de biogás

Fuente: elaboración propia

10.5. POZO TIPO E. SISTEMA DE DESTRUCCIÓN TÉRMICA PASIVA CON TUBO DE 4" O 6" Y TRAMPA DE CONDENSADO

Se realiza la perforación de un pozo con un diámetro de 0.60 m a 0.80 m, el cual abarque del 70% al 80% el estrato de residuos confinados. Dicho pozo se deberá rellenar con un filtro a base de material pétreo basáltico con una granulometría de 2" de diámetro sin finos. En el interior y al centro del pozo se colocará un tubo de PVC cédula 40 u 80 o HDPE de 4" de diámetro hasta llegar a 1.00 m antes de la profundidad total del mismo. Alrededor del tubo se debe realizar ranuras de 0.10 m de largo por 0.005 m de ancho en forma de trébol a cada 0.05 m. Las perforaciones del tubo deben abarcar al menos el 75% de la longitud del tubo que tenga contacto con la capa de residuos confinados, así mismo, se deberá colocar una tapa ciega en el fondo o base.

Se deberá realizar la colocación de una trampa de condensado que deberá ir 0.50 m por encima del estrato de residuos confinados. Una vez conseguida esta altura, se le hará la adecuación e instalación del aditamento para la retención de condensados, que consiste en la colocación de trampas horizontales (mamparas) dentro del tubo en un sistema de espiral o zigzag.

Para el detalle de colocación de trampa de condensado, ver apartado *"Trampas de Condensado En Pozos Verticales"*

Como parte del sistema de sellado del pozo, se colocará una mezcla de bentonita con material limo-arcilloso (tepetate) alrededor del tubo, entre el estrato de residuos sólidos confinados y la capa sello. La mezcla de bentonita con material limo-arcilloso se realizará en una proporción de al menos 20% y 80% respectivamente. Una vez homogenizados los materiales, será necesario aplicar una humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM para posteriormente verterlo alrededor del tubo y proceder a su compactación con pisón de mano o mecánico.

En la superficie del pozo, en el nivel 0.00 m, se deberá construir un sistema de protección, el cual podrá ser mediante la construcción de una placa de concreto con dimensiones de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. Previo al colado de la placa, se debe considerar la colocación de un tubo de un diámetro mayor al tubo del pozo, para que al momento del colado de la losa y en todo momento este tubo quede adherido a la placa de concreto, y así permitir el libre deslizamiento de los tubos que forman parte del sistema del pozo. Este sistema ayudará a que la placa de concreto se comporte conforme se presenten los asentamientos diferenciales y evitar una flotación o ruptura.

Por encima de esta placa se sustituirá el tubo de PVC o HDPE por un tubo de acero galvanizado de 2" de diámetro y 1.50 m de altura efectiva, mismo que será denominado *cabeza*, y cuya función será la destrucción térmica del biogás. En la base del cabezal deberá colocarse una válvula de control de flujo y un puerto de muestreo; se recomienda utilizar una válvula de espiga para medir la presión de vacío, el flujo, y la composición del biogás. En la punta del tubo, será necesario colocar un capuchón conocido como gorro chino o sombrero para ducto galvanizado, o, de igual manera, se podrá colocar un arrestador de flama.

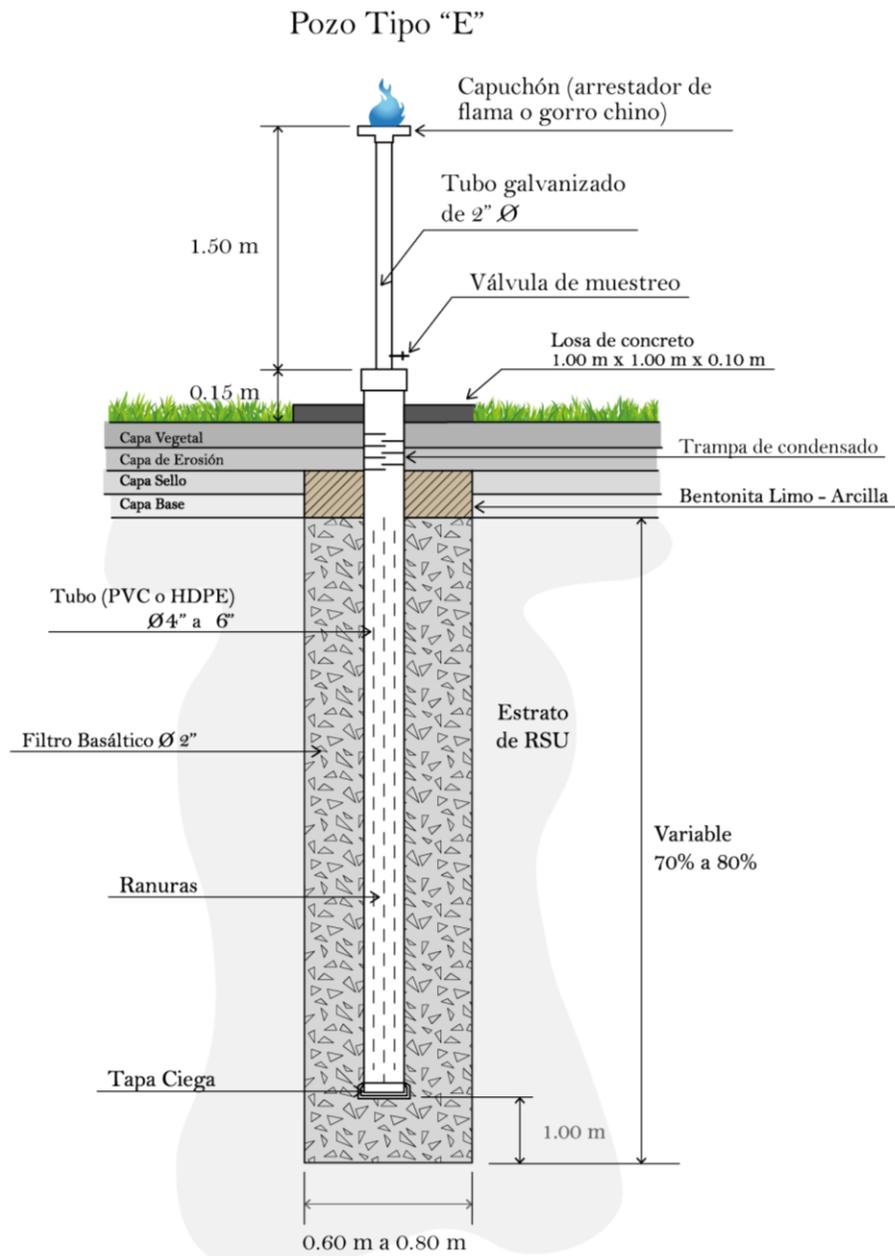


Figura 75. Diagrama de pozo tipo E para el sistema de control, monitoreo y destrucción pasiva de biogás

Fuente: elaboración propia

10.6. POZO TIPO F. SISTEMA DE POZO MIXTO DE 6" A 8" PARA EXTRACCIÓN DE LIXIVIADO Y DESTRUCCIÓN TÉRMICA PASIVA DE BIOGÁS

Se realiza la perforación de un pozo con un diámetro de 0.60 m a 0.80 m, el cual abarque del 70% al 80% el estrato de residuos confinados. Dicho pozo se deberá rellenar con un filtro a base de material pétreo basáltico con una granulometría de 2" de diámetro sin finos. En el interior y al centro del pozo se colocará un tubo de PVC cédula 40 u 80 o HDPE de 4" de diámetro hasta llegar a 1.00 m antes de la profundidad total del mismo. Alrededor del tubo se debe realizar ranuras de 0.10 m de largo por 0.005 m de ancho en forma de trébol a cada 0.05 m. Las perforaciones del tubo deben abarcar al menos el 75% de la longitud del tubo que tenga contacto con la capa de residuos confinados, así mismo, se deberá colocar una tapa ciega en el fondo o base.

A una altura de 0.60 m por encima del estrato de residuos confinados, se deberá colocar una conexión tipo Tee de 6" a 8" (dependiendo la selección de diámetro del tubo en proyecto) con reducción a 4". En la sección de la Tee, se dará continuidad a la tubería vertical de 8" a 6", que ya no deberá ser perforada, y deberá llegar al nivel 0+ 0.50 m. En la sección de 4" de la Tee, se deberá colocar un codo de 90° y un tubo de 4" que llegue al nivel 0+ 0.15 m.

En la superficie del pozo, en el nivel 0.00 m, se deberá construir un sistema de protección, el cual podrá ser mediante la construcción de una placa de concreto con dimensiones de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. Previo al colado de la placa, se debe considerar la colocación de un tubo de un diámetro mayor al tubo del pozo, para que al momento del colado de la losa y en todo momento este tubo quede adherido a la placa de concreto, y así permitir el libre deslizamiento de los tubos que forman parte del sistema del pozo. Este sistema ayudará a que la placa de concreto se comporte conforme se presenten los asentamientos diferenciales y evitar una flotación o ruptura.

Para el caso del tubo de 4" para extracción de biogás, se colocará encima de la placa de concreto una reducción a 2" y se sustituirá el tubo de PVC o HDPE por uno de acero galvanizado de 2" de diámetro y 1.50 m de altura efectiva, elemento al que se le denominará *cabezal*, y cuya función será la destrucción térmica del biogás. En la base del cabezal deberá colocarse una válvula de control de flujo y un puerto de muestreo; se recomienda utilizar una válvula de espiga para medir la presión de vacío, el flujo, y la composición del biogás. En la punta del tubo, será necesario colocar un capuchón, conocido como gorro chino o sombrero para ducto galvanizado, o, de igual manera, se podrá colocar un arrestador de flama.

Para el tubo de extracción de lixiviado, que corresponde al tubo de 8", se recomienda llegar al nivel 0+ 0.50 m, donde se le deberá colocar una tapa roscada o atornillable que será removida cuando se vaya a hacer el monitoreo del tirante o la extracción del lixiviado. Es importante que el tirante de lixiviado a retener en el pozo sea del 30% al 40% de la profundidad del tubo de extracción de lixiviado que esté en contacto con el estrato de residuos. Una vez alcanzados los tirantes recomendados, se puede proceder con la extracción del lixiviado haciendo uso de una bomba sumergible antichispa de acero inoxidable de 4" a 6" con una potencia mínima de 0.5 HP (Caballos de Fuerza). De tal manera, que el lixiviado pueda ser cargado a un carro tanque (pipa), para después ser conducido a un pozo de recirculación en un nivel superior, o dispuesto en una laguna de evaporación; lo anterior dependerá del sistema de control, tratamiento y monitoreo del lixiviado establecido en el proyecto de cierre y clausura del sitio.

Como parte del sistema de sellado del pozo, se colocará una mezcla de bentonita con material limo-arcilloso (tepetate) alrededor del tubo, entre el estrato de residuos sólidos confinados y la capa sello. La mezcla de bentonita con material limo-arcilloso se realizará en una proporción de al menos 20% y 80% respectivamente. Una vez homogenizados los materiales, será necesario aplicar una humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM para posteriormente verterlo alrededor del tubo y proceder a su compactación con pisón de mano o mecánico.

Es importante que el monitoreo de los niveles de lixiviado se realice con una periodicidad establecida de al menos tres veces por semana (misma que puede disminuir o incrementar dependiendo del volumen presentado). Este monitoreo se debe realizar de manera manual por el encargado de operación y mantenimiento (O&M) con un medidor de agua de cinta plana que ayude a saber el nivel del tirante del pozo. Por cuestiones de practicidad y con el propósito de cumplir con el objetivo de este manual del cierre y clausura de vertederos, lo antes descrito es sugerido por sus bondades económicas.

En otro sentido y si se tienen los recursos se puede instalar un sistema electrónicamente automatizado mediante un flotador de nivel para cisternas que dé a conocer el nivel del tirante máximo alcanzado por el lixiviado. Así, cuando sea necesario vaciar el pozo, el medidor activará el microswitch interno previo aviso. Otra alternativa con un mayor equipamiento tecnológico y, por tanto, un mayor costo, es la instalación de un sistema de control de bombeo que haga una interfaz con un software y una aplicación (APP) en donde se

posible tener el control de las bombas de manera remota. Es importante señalar que para esta última opción se debe tener una bomba en cada pozo mixto.

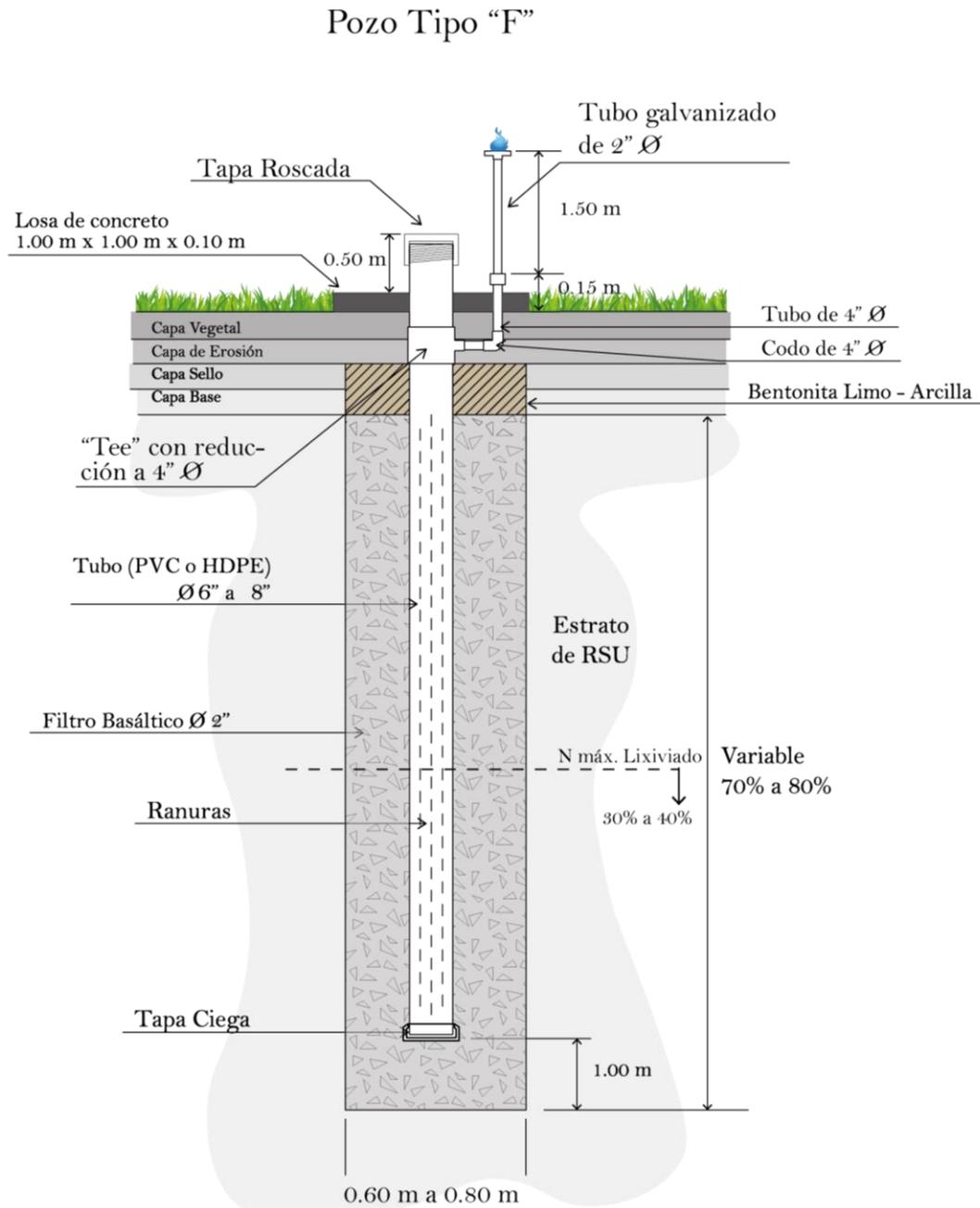


Figura 76. Diagrama del pozo tipo F para el sistema de control, monitoreo y destrucción pasiva de biogás

Fuente: elaboración propia

10.7. DETALLE DE RANURADO DE TUBO PARA POZO VERTICAL

Detalle de Ranurado de Tubo

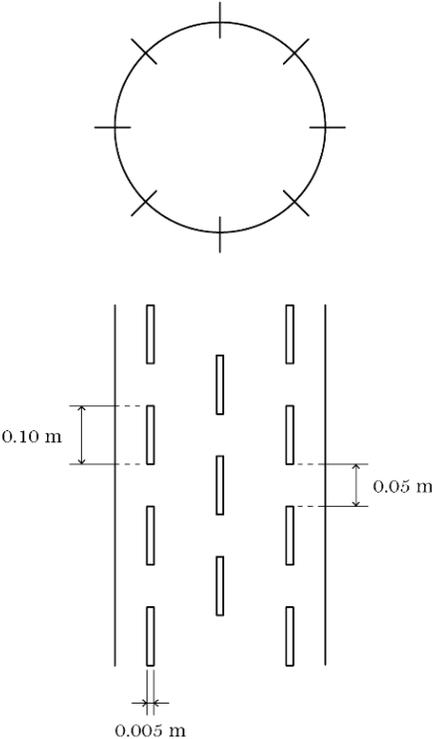


Figura 77. Diagrama del detalle de ranurado del tubo de pozo vertical para captación y extracción de biogás

Fuente: elaboración propia

11. ALTERNATIVAS DE SISTEMA HORIZONTAL DE CONTROL Y MONITOREO DE BIOGÁS MEDIANTE ZANJA O TRINCHERA

Este sistema de control y monitoreo se deberá instalar en el perímetro de la plataforma dejando de 25.00 a 50.00 m del hombro del talud al centro de la plataforma, así como en el centro de la plataforma, se podrá colocar de manera recta o simulando el diagrama de Ishikawa o espina de pescado. Este sistema podrá colocarse con la tubería de manera continua o discontinua, tal como se describe a continuación. Así mismo, es importante que este sistema de control y monitoreo se instale antes de iniciar con la colocación de la capa base. Lo anterior también aplica con el sistema de sellado.

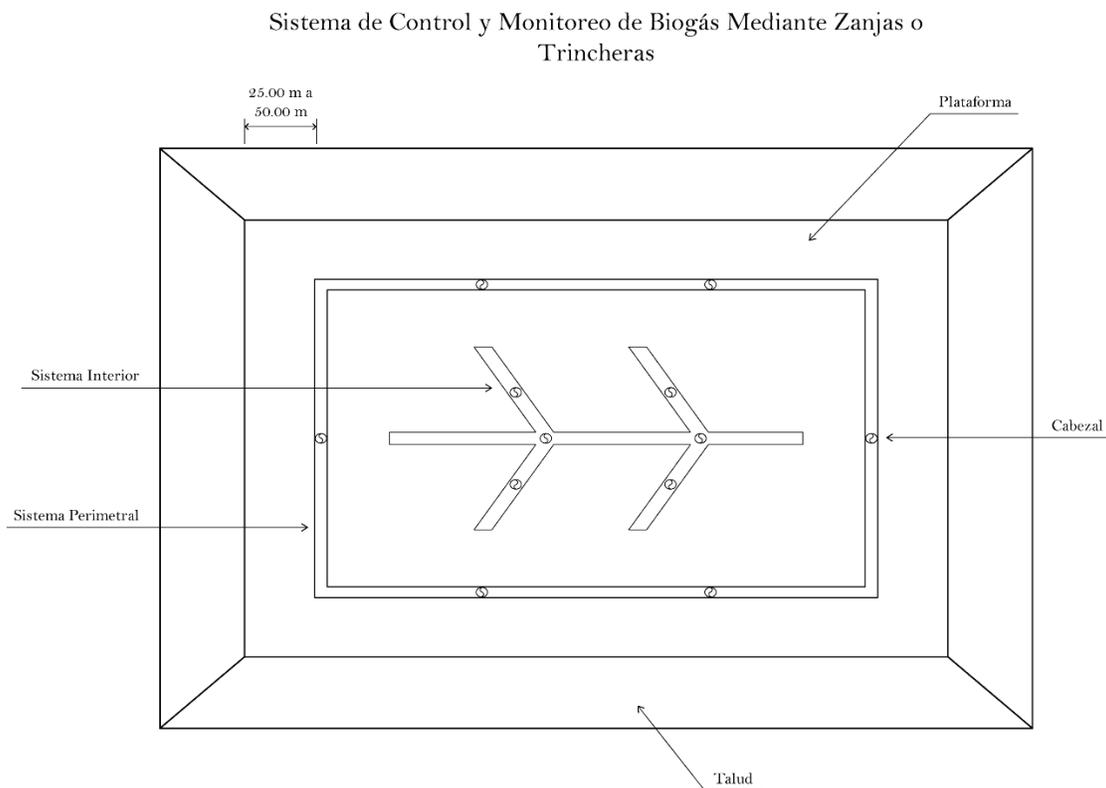


Figura 78. Diagrama del sistema de control y monitoreo de biogás mediante zanja o trinchera (sistema perimetral sistema interior basado en el diagrama de Ishikawa)

Fuente: elaboración propia

11.1. SISTEMA DE DESTRUCCIÓN TÉRMICA PASIVA CON TUBERÍA CONTINUA

Se realiza la excavación de una zanja superficial que tenga una profundidad máxima de 1.20 m medidos desde el nivel 0.00 m de la capa de residuos confinados, y un ancho de 1.20 m. En la base de la zanja puede o no colocarse una capa de geotextil de un largo suficiente que logre envolver la base de material pétreo y el tubo horizontal.

La base y superficie de la zanja deberá ser rellenada con un filtro a base de material pétreo basáltico con una granulometría promedio de 2" a 3/4" de diámetro sin finos, de modo tal que este filtro de material pétreo funcione como un encofrado para el tubo horizontal. La base o cama del tubo será rellenada a base de material pétreo con la granulometría antes mencionada; se recomienda un espesor de 0.10 m a 0.30 m, y para el relleno por encima del tubo se recomienda un espesor de 0.30 m a 0.70 m. Otra alternativa para el encofrado es haciendo uso de neumáticos fuera de uso (NFU) que se encuentren en el sitio, estos se deberán colocar sobre la cama o base de material pétreo a lo largo de la zanja, dejando espacio de separación mínimo de 0.1 m y máximo de 0.2 m entre cada uno y colocando el tubo ranurado dentro de los NFU. También se puede colocar la mitad de un NFU por encima del tubo ya tendido.

Al interior y al centro de la zanja se colocará un tubo corrugado de HDPE de manera horizontal, cuyo diámetro puede oscilar entre 8" a 24". El tubo debe ser perforado a su alrededor con ranuras de 0.10 m a 0.20 m de largo por 0.005 m de ancho en forma de trébol a cada 0.20 m. Las perforaciones del tubo deben abarcar al menos el 80% de la longitud del mismo. Así también, y de manera opcional, se pueden colocar tapas ciegas en los extremos de los tubos horizontales en caso de que el circuito se deje abierto o cerrado al unir los tubos con un cople.

Al tubo horizontal se le añadirán conexiones tipo Tee o tipo Cruz (dependiendo el sistema de trampas de condensado a seleccionar), con el propósito de tener salidas verticales para llevar a cabo la conducción vertical, control y destrucción térmica del biogás, mismas que se colocarán a distancias equidistantes sugeridas de 40.00 m a 70.00 m. A estas conexiones tipo Tee o tipo Cruz se les deberá colocar una reducción a 4", y a esta se le añadirá una sección vertical sin ranurar de 4" de diámetro que puede ser de HDPE o PVC, cédula 40 u 80. Dicha sección deberá llegar al nivel 0+ 0.15 m del sistema de sellado. Como parte del sistema de sellado del pozo, se colocará una mezcla de bentonita con material limo-arcilloso (tepetate) alrededor del tubo, entre el

estrato de residuos sólidos confinados y la capa sello. La mezcla de bentonita con material limo-arcilloso se realizará en una proporción de al menos 20% y 80% respectivamente. Una vez homogenizados los materiales, será necesario aplicar una humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM para posteriormente verterlo alrededor del tubo y proceder a su compactación con pisón de mano o mecánico.

En la superficie del pozo, en el nivel 0.00 m, se deberá construir un sistema de protección, el cual podrá ser mediante la construcción de una placa de concreto con dimensiones de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. Previo al colado de la placa, se debe considerar la colocación de un tubo de un diámetro mayor al tubo del pozo, para que al momento del colado de la losa y en todo momento este tubo quede adherido a la placa de concreto, y así permitir el libre deslizamiento de los tubos que forman parte del sistema del pozo. Este sistema ayudará a que la placa de concreto se comporte conforme se presenten los asentamientos diferenciales y evitar una flotación o ruptura.

Para el caso del tubo de 4" para extracción de biogás, se colocará encima de la placa de concreto una reducción a 2" y se sustituirá el tubo de PVC o HDPE por uno de acero galvanizado de 2" de diámetro y 1.50 m de altura efectiva, elemento al que se le denominará cabezal, y cuya función será la destrucción térmica del biogás. En la base del cabezal deberá colocarse una válvula de control de flujo y un puerto de muestreo; se recomienda utilizar una válvula de espiga para medir la presión de vacío, el flujo, y la composición del biogás. En la punta del tubo, será necesario colocar un capuchón, conocido como gorro chino o sombrero para ducto galvanizado, o, de igual manera, se podrá colocar un arrestador de flama.

La colocación de las trampas de condensado se realizará en las salidas verticales de las conexiones tipo Tee de las salidas del sistema de destrucción térmica, en las conexiones tipo Cruz, o en las conexiones tipo Tee del sistema de crestas y valles. Para lo anterior, se plantean tres alternativas. La primera es colocar el sistema de trampas de condensado al interior de la tubería vertical de 4" que brinde continuidad a la conexión tipo Tee, así en el interior del tubo se hará la instalación del sistema de trampas de condensado el cual podrá ser de material pétreo tipo tezontle, botellas PET seccionadas o secciones de HDPE en Zigzag. La segunda alternativa es la colocación de las conexiones tipo Cruz en el punto de salida del tubo vertical. La tercera alternativa consiste en un sistema de crestas y valles con la colocación de conexiones tipo Tee conectadas, precisamente, en los valles. Para las alternativas dos y tres del sistema de trampa de condensado, se deberá dar a los tubos pendientes que vayan de 0.5% a 3% medido desde la zona donde se coloque la conexión tipo Cruz o tipo Tee, haciendo que el condensado escurra por el tubo hasta la parte inferior de la conexión tipo Cruz y luego por el filtro de piedra hacia los residuos. Para más detalle revisar el apartado *“Trampas de Condensado en Sistema Horizontal de Control y Monitoreo de Biogás Mediante Zanja O Trinchera”*.

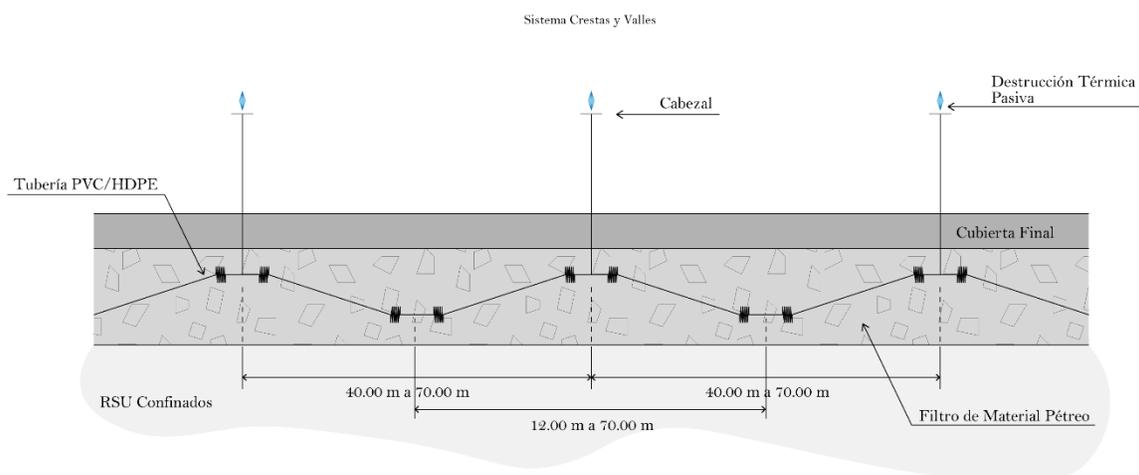


Figura 80. Diagrama del sistema de crestas y valles para el control y monitoreo de biogás mediante zanja o trinchera con tubería continua

Fuente: elaboración propia

Sistema Crestas y Valles

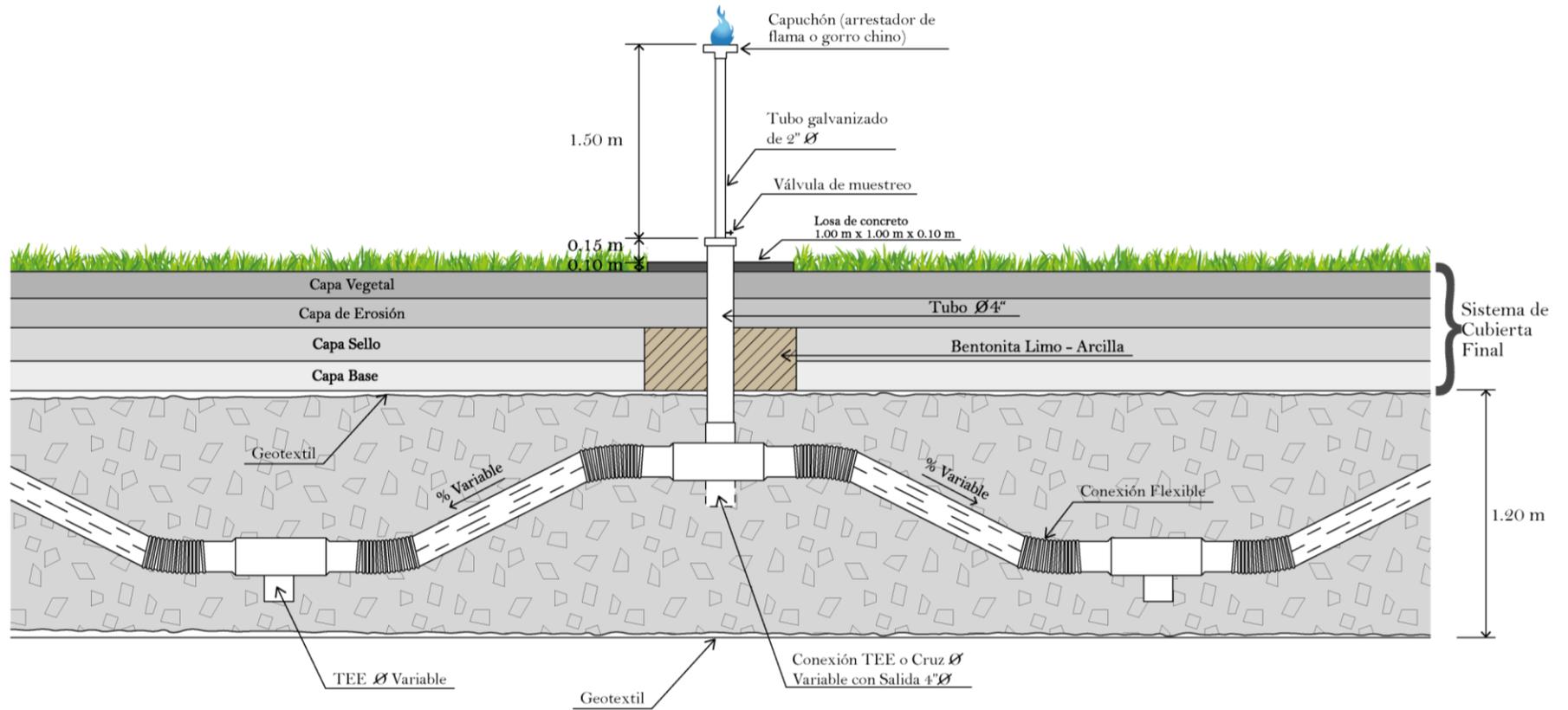


Figura 81. Sistema de crestas y valles para el control y monitoreo de biogás mediante zanjas o trincheras con tubería continua

Fuente: elaboración propia

11.2. SISTEMA DE DESTRUCCIÓN TÉRMICA PASIVA CON TUBERÍA DISCONTINUA

Se realiza la excavación de una zanja superficial que tenga una profundidad máxima de 1.20 m medido desde el nivel 0.00 m de la capa de residuos confinados y un ancho de 1.20 m. En la base de la zanja puede colocar, de manera opcional, una capa de geotextil de un largo suficiente que logre envolver la base de material pétreo y el tubo horizontal.

La zanja deberá ser rellenada con un filtro de material pétreo basáltico con una granulometría promedio de 2" a 3/4" de diámetro sin finos desde la base hasta la superficie, de modo que funcione como un encofrado para el tubo horizontal. Para la base o cama del tubo de material pétreo con la granulometría antes mencionada, se recomienda un espesor de 0.10 m a 0.30 m y para el relleno por encima del tubo se recomienda un espesor de 0.30 m a 0.70 m. Al igual que en el *sistema con tubería continua* se pueden colocar neumáticos fuera de uso (NFU) que se encuentren en el sitio; en caso de contar con una cantidad suficiente de NFU, estos deberán colocarse sobre la base o cama de material pétreo a lo largo la zanja dejando una separación mínima de 0.1 m y de 0.2 m como máximo entre cada uno, a la vez que se coloque el tubo ranurado dentro de los NFU. También se puede optar por colocar la mitad de un NFU por encima del tubo ya tendido. En este sistema de tubería discontinua los NFU también pueden ser colocados en las zonas donde no haya existencia de secciones tipo Tee, con un espacio entre ellos de 0.05 m.

Al interior y al centro de la zanja se colocarán secciones tipo Tee de manera horizontal formadas por dos secciones de 12 m de tubo corrugado de HDPE, que puede ser de 8" a 24" de diámetro unidas por una conexión tipo Tee o tipo Cruz de HDPE, quedando una sección tipo Tee invertida de 24 m de largo. El tubo horizontal (de 24 metros) debe ser perforado con ranuras de 0.10 m a 0.20 m de largo por 0.005 m de ancho, debe hacerse alrededor del tubo y en forma de trébol a cada 0.05 m. Las perforaciones deben abarcar al menos el 80% de la longitud del tubo, así mismo, y de manera opcional se pueden colocar tapas ciegas en los extremos de las secciones.

La conexión tipo Tee o Cruz debe colocarse en el punto de unión con el propósito de tener salidas verticales para llevar a cabo la captación, control y destrucción térmica del biogás. Para ello, es necesario adaptar una reducción a 4", y a ésta, añadir otra sección vertical de 4" de diámetro sin ranurar, misma que puede ser de HDPE o PVC de cédula 40 u 80, y que deberá llegar al nivel 0+ 0.15 m del sistema de sellado.

En la base de cada salida de tubería vertical, se deberá construir una placa de concreto pobre o armado de 1.00 m x 1.00 m de 0.10 m de espesor, por encima de esta placa se sustituirá el tubo de PVC o HDPE por un tubo de acero galvanizado de 2" de diámetro y de 1.50 m de altura efectiva al que se le denominará cabezal, y cuya función será la destrucción térmica del biogás. En la base del cabezal deberá colocarse una válvula de control de flujo y un puerto de muestreo; éste último puede ser una válvula de espiga para medir la presión de vacío, el flujo, y la composición del biogás. En la punta del tubo, se deberá colocar un capuchón, conocido como gorro chino o sombrero para ducto galvanizado, o, de igual manera se podrá colocar un arrestador de flama.

Estas secciones tipo Tee se colocarán a una distancia equidistante de 0.50 m medido desde el centro de la salida vertical, o bien a cada 30 m medido desde los extremos de los tubos horizontales. En estos 30 m de separación entre los extremos de los tubos pueden colocarse neumáticos fuera de uso (NFU) que se encuentren en el sitio con el objetivo de dar estructura a la zanja y ahorrar material pétreo; en este caso deben tener una separación de 0.05 m entre sí. Ahora bien, si se tiene la cantidad suficiente de NFU, se puede colocar a lo largo de toda la zanja quedando las secciones de los tubos por dentro de los NFU, que será necesario colocar sobre la cama o base de material pétreo a lo largo de la zanja, dejando espacio de separación mínimo de 0.1 m y máximo de 0.2 m entre cada uno. Luego, se colocará el tubo ranurado dentro de los NFU.

Como parte del sistema de sellado del pozo, se colocará una mezcla de bentonita con material limo-arcilloso (tepetate) alrededor del tubo, entre el estrato de residuos sólidos confinados y la capa sello. La mezcla de bentonita con material limo-arcilloso se realizará en una proporción de al menos 20% y 80% respectivamente. Una vez homogenizados los materiales, será necesario aplicar una humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM para posteriormente verterlo alrededor del tubo y proceder a su compactación con pisón de mano o mecánico.

En la superficie del pozo, en el nivel 0.00 m, se deberá construir un sistema de protección, el cual podrá ser mediante la construcción de una placa de concreto con dimensiones de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. Previo al colado de la placa, se debe considerar la colocación de un tubo de un diámetro mayor al tubo del pozo, para que al momento del colado de la losa y en todo momento este tubo quede adherido a la placa de concreto, y así permitir el libre deslizamiento de los tubos que forman parte del sistema del

pozo. Este sistema ayudará a que la placa de concreto se comporte conforme se presenten los asentamientos diferenciales y evitar una flotación o ruptura.

La colocación de las trampas de condensado para este sistema discontinuo se instalará en las zonas donde se coloquen las conexiones tipo Tee o tipo Cruz, para esto se plantean dos alternativas. La primera de ellas es colocar el sistema de trampas de condensado en la tubería vertical de 4" que dé continuidad a la conexión tipo Tee, en dicho tubo se hará la instalación para el sistema de condensado, mismo que podrá ser de material pétreo tipo tezontle, botellas PET seccionadas o secciones de HDPE en Zigzag. La segunda alternativa es la colocación de las conexiones tipo Cruz; para este sistema de trampa de condensado se deberá dar una pendiente de 0.5% a 3% a los tubos, medida desde la conexión hacia el extremo de cada sección de 12 m, y haciendo que el condensado escurra por el tubo hasta la parte inferior de la conexión tipo Cruz, para que, después, éste escurra por el filtro de piedra hacia los residuos. Para más detalle revisar el apartado de *“Trampas de Condensado en Sistema Horizontal de Control y Monitoreo de Biogás Mediante Zanja o Trinchera”*.

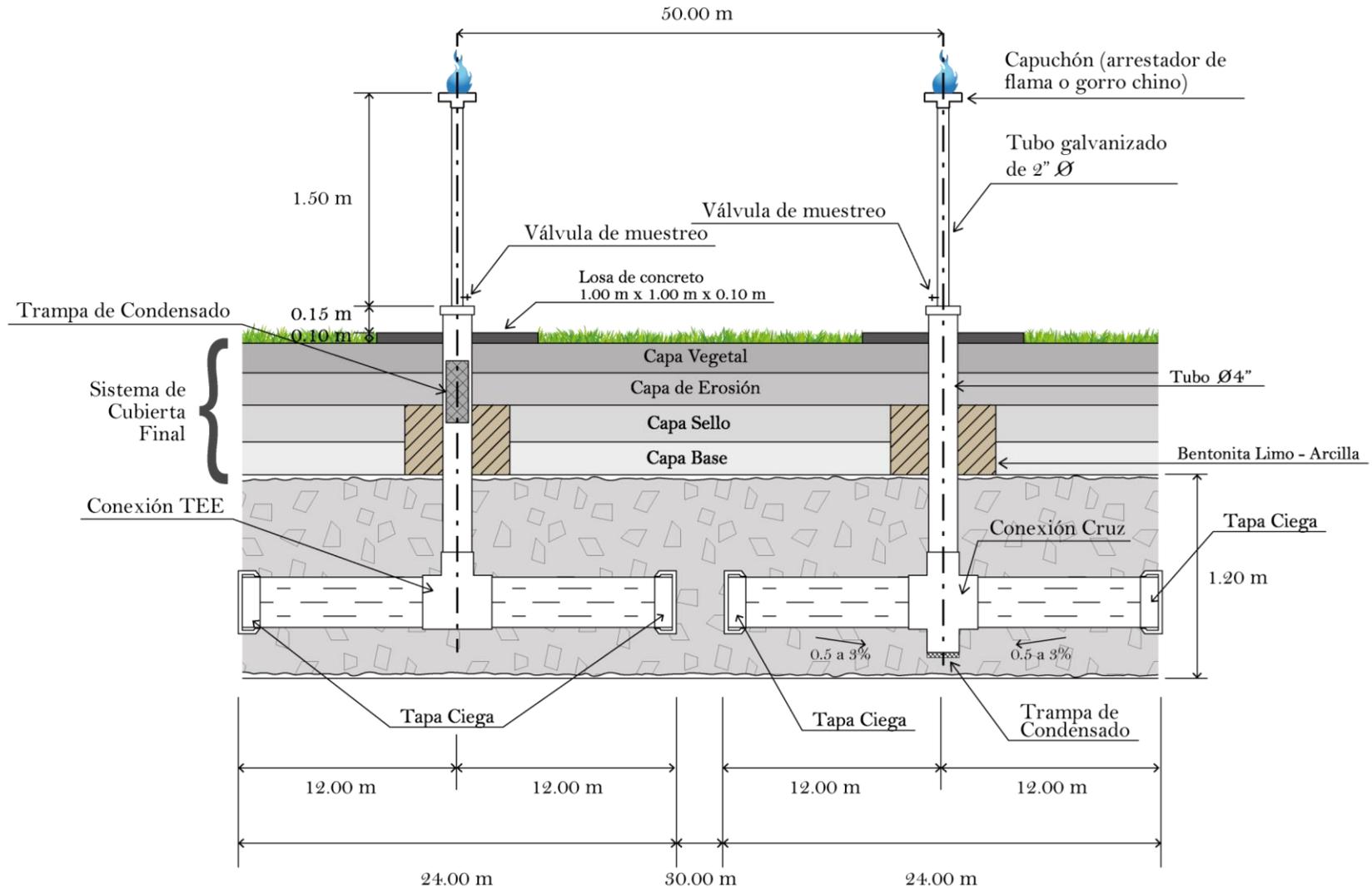


Figura 82. Sistema de control y monitoreo de biogás mediante zanjas o trincheras con tubería discontinua
Fuente: elaboración propia

11.3. DETALLE DE RANURADO DE TUBO PARA SISTEMA HORIZONTAL DE CONTROL Y MONITOREO DE BIOGÁS MEDIANTE ZANJAS O TRINCHERAS

Detalle de Ranurado de Tubo en Sistema de Control y Monitoreo de Biogás Mediante Zanjas o Trincheras

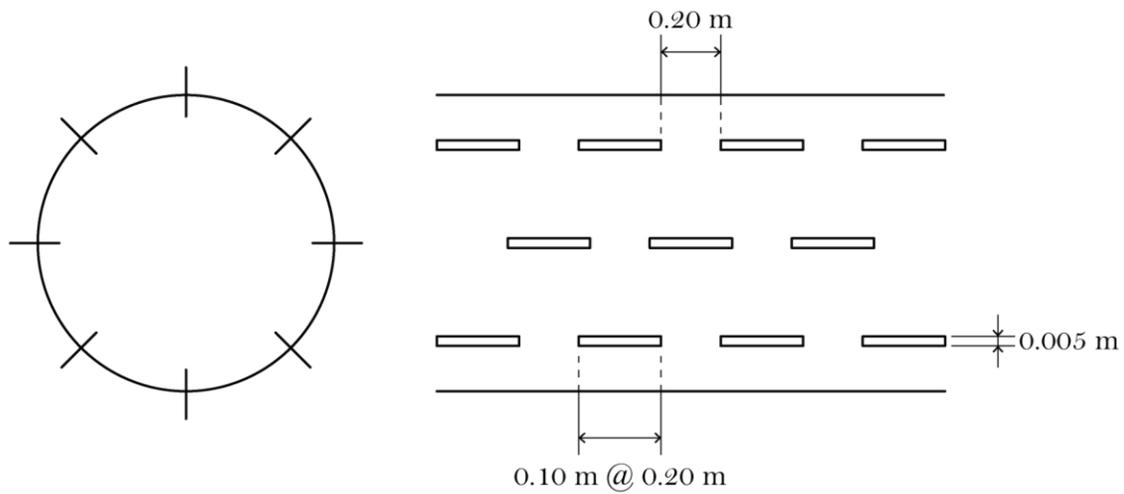


Figura 83. Diagrama del detalle de ranurado del tubo para sistema de control y monitoreo de biogás mediante zanja o trinchera

Fuente: elaboración propia

12. TRAMPAS DE CONDENSADO

Como alternativas de control de condensado y obtención del biogás con la menor cantidad de humedad en forma de vapor de agua posible, se recomienda la colocación de un sistema de trampas de condensado para el sistema de extracción y destrucción térmica pasiva de biogás.

En las secciones superiores del tubo de extracción que están fuera del contacto con residuos, se plantea la colocación de las trampas de condensado, tanto para el sistema de pozos verticales como horizontales. Estas trampas pueden ser adecuadas con las tres alternativas propuestas a continuación: (1) filtro de material pétreo tipo tezontle, (2) botellas de PET seccionadas, y (3) secciones de la misma tubería en espiral, o en zigzag. La selección de sistema de trampas de condensado dependerá de la estructura del pozo que el proyecto seleccione ya sea vertical u horizontal.

12.1. TRAMPAS DE CONDENSADO EN POZOS VERTICALES

i) TRAMPAS DE CONDENSADO CON TEZONTLE DE 1/2" A 2" PARA TUBERÍA PRINCIPAL DE 4"

Si en el proyecto de clausura se ha seleccionado una tubería principal de 4" para la conducción de biogás, previo al hincado del tubo dentro del pozo se deberá colocar un sistema de captación y reinyección de condensado del mismo, el cual deberá ir dentro de un tubo de 3" en una sección de 0.30 m o 0.50 m que ha de unirse al tubo de extracción de 4" por medio de una reducción hasta llegar al nivel 0+0.15 m.

Dependiendo del sistema de cubierta final del proyecto, el tubo de 3" tendrá la función de contener el sistema de condensado con la adecuación e instalación del aditamento adecuado para la retención de condensados y tendrá una longitud de entre 1.40 m a 1.60 m, ya que la tubería deberá pasar las capas del sistema de cubierta final. Es por ello que esta sección deberá descontarse de la longitud efectiva del tubo principal de 4" sin llegar al nivel 0.00 y, por tanto, esta altura será complementada por el tubo de 3", que deberá llegar al nivel 0+0.15 m y que tendrá contacto con la infraestructura de protección (registro y/o placa de concreto) donde se colocará una reducción a 2" y se hará la transición de material de PVC o HDPE por tubo de acero galvanizado.

Para la instalación de este sistema de condensado será necesario colocar una reducción a 3" del mismo material del tubo principal. Una vez colocada la

reducción, se añadirá otra sección de entre 1.40 m a 1.60 m sin ranurar. En la sección que quede por encima de la reducción, misma que ya no deberá tener contacto con el horizonte de residuos confinados, se colocará un implemento fabricado en sitio (cilindro de malla) en una sección de entre 0.30 m a 0.50 m con relleno de material pétreo tipo tezontle y una granulometría de 1/2" a 2", contenido en un cilindro de malla que funcione como un filtro, permitiendo la retención de humedad.

El tezontle deberá ser colocado dentro de una malla de protección, ya sea plástica o de acero galvanizado, sin compactar y de abertura hexagonal de 0.005 m (C-20, Ab-50 mm). Para evitar el deslizamiento de este implemento (filtro de condensados), se deberá fijar a través de dos pares de hilos de alambre galvanizado calibre 8 (4.19 mm), que serán fijados por medio de un torzal exterior. El desarrollo del hilo inferior del filtro será por la parte interna hasta llegar a la mitad de la altura del mismo, con la intención de hacerlo llegar al exterior con ayuda de una extracción por barreno de 11/64" (4.37 mm). El hilo superior tendrá salida en la parte superior del filtro por medio de un barreno de 11/64" (4.37 mm). Ya cuando los dos hilos se encuentren fuera del tubo, se unirán entre sí por medio del torzal.

Una vez colocado el sistema de trampas de condensado, el tubo que formará parte del sistema de control y monitoreo de biogás, puede ser hincado.

ii) TRAMPAS DE CONDENSADO CON BOTELLAS DE PET SECCIONADAS PARA TUBERÍA PRINCIPAL DE 6" CON JUNTA TELESCÓPICA DE 4"

Si en el proyecto de clausura se ha seleccionado para la conducción de biogás una tubería principal de 6", este deberá llegar al nivel del estrato de residuos sólidos confinados, dentro de este tubo se insertará un tubo de 4" tendrá una función deslizante a la que se le denominará *junta telescópica*, el cual actuará en conjunto con los asentamientos diferenciales provocados por la degradación de los residuos. Este tubo de 4" debe ir de forma tal que el tubo de 6" funja como funda del de 4", el cual se introducirá a una profundidad de 0.50 m dentro del tubo de extracción de 6", una vez el tubo de 4" en el nivel 0+ 0.15 m, tendrá contacto con la infraestructura de protección (registro y/o placa de concreto) donde se colocará una reducción a 2" y se hará la transición de material de PVC o HDPE por tubo de acero galvanizado.

Dependiendo del sistema de cubierta final del proyecto, el tubo de 4" tendrá una longitud de entre 1.80 m a 2.00 m, ya que la tubería deberá pasar las

capas del sistema de cubierta final y quedar al menos 0.50 m dentro del tubo perforado de 6" que se aloja en el estrato de residuos.

Previo al hincado de la tubería dentro del pozo, se deberá colocar un sistema de captación y reinyección de condensado de biogás, este sistema de condensado se instalará dentro de una sección de 0.30 m o 0.50 m del tubo de 4" de diámetro. En el interior del tubo se hará la adecuación e instalación del aditamento adecuado para la retención de condensados.

Para la instalación de este sistema de condensado se deberá colocar una reducción a 4" del mismo material del tubo principal. Una vez colocada la reducción se le añadirá una sección de entre 1.80 m a 2.00 m sin ranurar. La sección que quede por encima de la reducción ya no tendrá contacto con el horizonte de residuos confinados, y se colocará un implemento fabricado in situ (cilindro de malla) en una sección de entre 0.30 m a 0.50 m de material plástico producto del seccionamiento de botellas de PET contenido en un cilindro de malla, dispositivo que hará las veces de filtro y permitirá el flujo del gas y retención de la humedad.

El PET deberá ser colocado seccionado en cuadros de 0.05m x 0.05 m sin compactar, estos deberán ir dentro de una malla de protección, ya sea plástica o de acero galvanizado de abertura hexagonal de 0.005 m (C-20, Ab-50 mm). Para evitar el deslizamiento de este implemento (filtro de condensados), se deberá fijar a través de dos pares de hilos de alambre galvanizado calibre 8 (4.19 mm) fijados por medio de un torzal exterior. El desarrollo del hilo inferior del filtro será por la parte interna hasta llegar a la mitad de la altura del mismo, con la intención de hacerlo llegar al exterior con ayuda de una extracción por barreno de 11/64" (4.37 mm). El hilo superior tendrá salida en la parte superior del filtro por medio de un barreno de 11/64" (4.37 mm). Ya cuando los dos hilos se encuentren fuera del tubo, se unirán entre sí por medio del torzal.

Una vez colocado el sistema de trampas de condensado, el tubo que formará parte del sistema de control y monitoreo de biogás, puede ser hincado.

iii) TRAMPAS DE CONDENSADO CON BOTELLAS DE PET SECCIONADAS PARA TUBERÍA PRINCIPAL DE 4"

Si en el proyecto de clausura se ha seleccionado para la conducción de biogás una tubería principal de 4", previo al hincado del tubo dentro del pozo se deberá colocar un sistema de captación y reinyección de condensado de biogás que vaya dentro de un tubo de 3". El sistema de condensado se instalará dentro de un tubo de 3" en una sección de 0.30 m o 0.50 m, para después unirse al tubo de extracción de 4" por medio de una reducción y llegará al nivel 0+ 0.15 m.

Dependiendo del sistema de cubierta final del proyecto, el tubo de 3" tendrá la función de contener el sistema de condensado con la adecuación e instalación del aditamento adecuado para la correcta retención, también tendrá una longitud de entre 1.40 m a 1.60 m para que la tubería pase las capas del sistema de cubierta final. Por ello, esta sección deberá descontarse de la longitud efectiva del tubo principal de 4" sin alcanzar al nivel 0.00, y, por tanto, dicha altura será complementada por el tubo de 3" que sí alcance al nivel 0+ 0.15 m, y que tendrá contacto con la infraestructura de protección (registro y/o placa de concreto), donde se colocará una reducción a 2" para la transición de material de PVC o HDPE por tubo de acero galvanizado.

Para la instalación de este sistema de condensado se deberá colocar una reducción a 3" del mismo material del tubo principal. Una vez colocada la reducción se le añadirá una sección de entre 1.40 m a 1.60 m sin ranurar. En la sección que quede por encima de la reducción, la cual, ya no tendrá contacto con el horizonte de residuos confinados, se colocará un implemento fabricado in situ (cilindro de malla) en una sección de entre 0.30 m a 0.50 m de material plástico producto del seccionamiento de botellas de PET contenido en un cilindro de malla para que haga las veces de un filtro, permitiendo la retención de la humedad y el flujo del biogás.

El PET deberá ser colocado seccionado en cuadros de 0.05m x 0.05 m sin compactar, estos deberán ir dentro de una malla de protección, ya sea plástica o de acero galvanizado de abertura hexagonal de 0.005 m (C-20, Ab-50 mm). Para evitar el deslizamiento de este implemento (filtro de condensados), se deberá fijar a través de dos pares de hilos de alambre galvanizado calibre 8 (4.19 mm) fijados por medio de un torzal exterior. El desarrollo del hilo inferior del filtro será por la parte interna hasta llegar a la mitad de la altura del mismo, con la intención de hacerlo llegar al exterior con ayuda de una extracción por barreno de 11/64" (4.37 mm). El hilo superior tendrá salida en la parte superior

del filtro por medio de un barreno de 11/64" (4.37 mm). Ya cuando los dos hilos se encuentren fuera del tubo, se unirán entre sí por medio del torzal.

Una vez colocado el sistema de trampas de condensado, el tubo que formará parte del sistema de control y monitoreo de biogás, puede ser hincado.

iv) TRAMPAS DE CONDENSADO CON TEZONTLE DE 1/2" A 2" PARA TUBERÍA PRINCIPAL DE 6" CON JUNTA TELESCÓPICA DE 4"

Si en el proyecto de clausura se ha seleccionado para la conducción de biogás una tubería principal de 6", este deberá llegar al nivel del estrato de residuos sólidos confinados, dentro de este tubo se insertará un tubo de 4" tendrá una función deslizante a la que se le denominará *junta telescópica*, el cual actuará en conjunto con los asentamientos diferenciales provocados por la degradación de los residuos. Este tubo de 4" debe ir de forma tal que el tubo de 6" funja como funda del de 4", el cual se introducirá a una profundidad de 0.50 m dentro del tubo de extracción de 6", una vez el tubo de 4" en el nivel 0+ 0.15 m, tendrá contacto con la infraestructura de protección (registro y/o placa de concreto) donde se colocará una reducción a 2" y se hará la transición de material de PVC o HDPE por tubo de acero galvanizado.

Dependiendo del sistema de cubierta final del proyecto, el tubo de 4" tendrá una longitud de entre 1.80 m a 2.00 m, ya que la tubería deberá pasar las capas del sistema de cubierta final y quedar al menos 0.50 m dentro del tubo perforado de 6" que se aloja en el estrato de residuos.

Previo al hincado de la tubería dentro del pozo, se deberá colocar un sistema de captación y reinyección de condensado de biogás, este sistema de condensado se instalará dentro de una sección de 0.30 m o 0.50 m del tubo de 4" de diámetro. En el interior del tubo se hará la adecuación e instalación del aditamento adecuado para la retención de condensados.

Para la instalación de este sistema de condensado se deberá colocar una reducción a 4" del mismo material del tubo principal. Una vez colocada la reducción, será añadida una sección de entre 1.80 m a 2.00 m sin ranurar. En la sección que quede por encima de la reducción, misma que ya no tendrá contacto con el horizonte de residuos confinados, se colocará un implemento fabricado en sitio (cilindro de malla) por encima del nivel de la capa sello en una sección de entre 0.30 m a 0.50 m de material pétreo tipo tezontle, con una granulometría de 1/2" a 2" contenido en un cilindro de malla a manera de filtro para permitir el flujo del gas y retención de la humedad.

El tezontle deberá ser colocado sin compactar dentro de una malla de protección, ya sea plástica o de acero galvanizado de abertura hexagonal de 0.005 m (C-20, Ab-50 mm). Para evitar el deslizamiento de este implemento (filtro de condensados), se deberá fijar a través de dos pares de hilos de alambre galvanizado calibre 8 (4.19 mm), que serán fijados por medio de un torzal exterior. El desarrollo del hilo inferior del filtro será por la parte interna hasta llegar a la mitad de la altura del mismo; para hacerlo llegar al exterior se extrae por un barreno de 11/64" (4.37 mm). El hilo superior tendrá salida en la altura superior del filtro por medio de un barreno de 11/64" (4.37 mm), una vez los dos hilos fuera del tubo se unirán entre sí por medio del torzal.

Ya colocado el sistema de trampas de condensado, el tubo que formará parte del sistema de control y monitoreo de biogás, puede ser hincado.

Trampa de Condensado en Tubería Vertical con Aditamento de PET o TEZONTLE

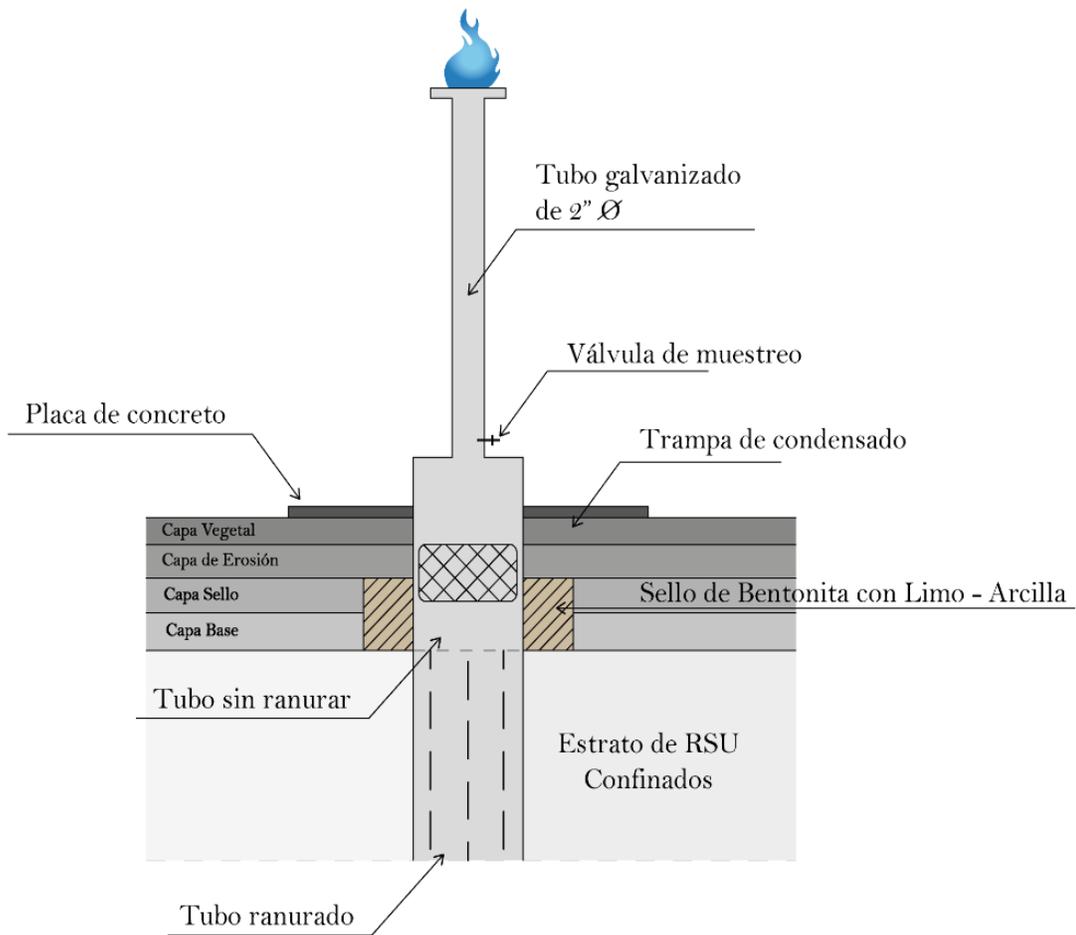


Figura 84. Diagrama de la trampa de condensado para tubería vertical con aditamento de PET o tezontle

Fuente: elaboración propia

Detalle Trampa de Condensado de Tezontle o PET en Tubo Vertical

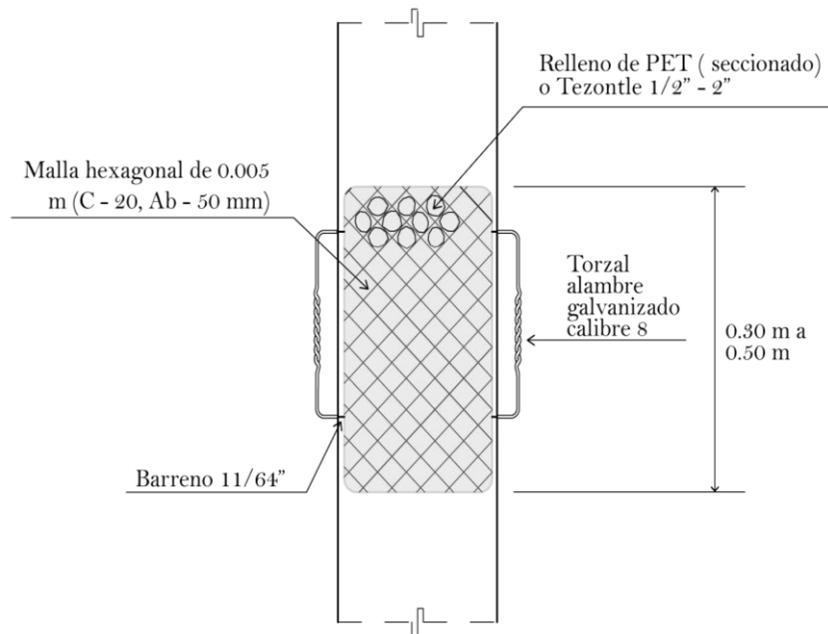


Figura 85. Diagrama de detalle de armado y sujeción de aditamento de trampa de condensado con relleno de PET o tezontle para tubería vertical
Fuente: elaboración propia

v) TRAMPAS DE CONDENSADO DE HDPE EN SISTEMA DE ESPIRAL O ZIGZAG

La parte superior del tubo de extracción de biogás deberá llegar al nivel 0+ 0.15 m, ahí tendrá contacto con la infraestructura de protección (registro y/o placa de concreto) donde se colocará una reducción a 2", y se hará la transición de material de PVC o HDPE por tubo de acero galvanizado. Este sistema de trampa de condensado puede ser implementado en tubería tanto de 4" como de 6" de diámetro, ya que el sistema se instala del exterior al interior del tubo de extracción de biogás, al cual se le hará la adecuación e instalación del aditamento para la retención de condensados a una altura por encima del estrato de residuos confinados.

Para este sistema se dejará una altura libre de 0.50 m del tubo principal de extracción de biogás que va dentro del pozo, esto a partir de la zona donde finaliza la sección perforada del tubo, que ya no tendrá contacto con los residuos, para después comenzar con el procedimiento para del sistema de cubierta final. A esta altura se adecuará una sección de 0.50 m donde se

colocará un sistema de condensado que permita el flujo del gas y retenga la humedad contenida en el biogás.

La adecuación para la instalación de la trampa de condensado consiste en la colocación de mamparas horizontales de PVC o HDPE o acrílico, o cualquier otro plástico, dentro del tubo. Las secciones horizontales serán tiras de 0.03 m de ancho y de un largo de la mitad (1/2) a tres cuartos (3/4) del diámetro del tubo de extracción. Para la colocación de estas mamparas se deberán hacer ranuras en el tubo a cada 0.10 m de separación entre ellas en forma de espiral o zigzag contrapuestas entre sí (sistema tresbolillo) con el objeto de que el biogás transite en zigzag a través de estas mamparas y así, al choque, retener la humedad en las tiras plásticas (mamparas). Para la colocación de las trampas se deberá hacer perforaciones al tubo de un ancho donde sea capaz de poder colocar las barreras (mamparas) y éstas conserven su horizontalidad, mismas que deberán ser fijadas, ya sea mediante calor o con pegamento, de acuerdo con el material empleado, garantizando su durabilidad en el tubo.

Detalle Trampa de Condensado en Sistema Zig Zag para Tubo Vertical

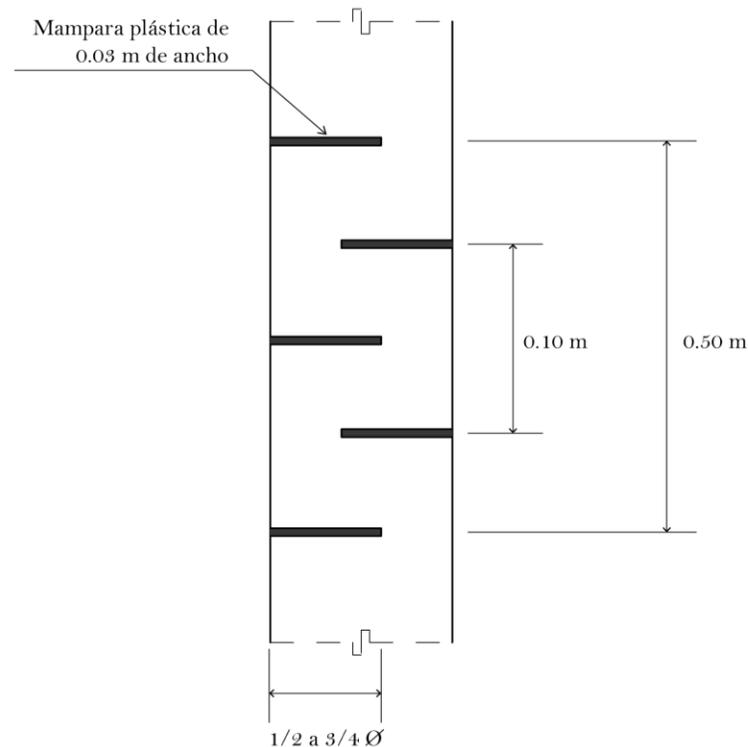


Figura 86. Diagrama de detalle de trampa de condensado con mamparas plásticas en sistema zigzag para tubería vertical

Fuente: elaboración propia

Una vez colocado el sistema de las trampas de condensado, el tubo que formará parte del sistema de control y monitoreo de biogás, puede ser hincado.

12.2. TRAMPAS DE CONDENSADO EN SISTEMA HORIZONTAL DE CONTROL Y MONITOREO DE BIOGÁS EN SISTEMAS DE ZANJAS O TRINCHERAS

El sistema de trampas de condensado para el sistema de captación de biogás mediante zanjas o trincheras puede ser desarrollado vía tres alternativas, la primera de ellas se basa en trampas similares a las de los pozos verticales, instaladas al interior del tubo vertical que conduce el biogás hacia el quemador. La segunda alternativa está basada en dar pendientes a la tubería horizontal e infiltrando el condensado a través de conexiones tipo Cruz. Por último, la tercera, sólo puede ser aplicada al sistema continuo, un sistema de crestas y valles. Dichas alternativas se describen a continuación:

i) TRAMPAS DE CONDENSADO CON TEZONTLE O PET EN TUBERÍA VERTICAL DE 4"

Para la instalación de este sistema de condensado dentro del tubo de 4", en la zona que ya no tendrá contacto con el horizonte de residuos confinados, se colocará un implemento fabricado en sitio (cilindro de malla) en una sección de entre 0.30 m a 0.50 m, ya sea de material pétreo tipo tezontle con una granulometría de 1/2" a 2", o material plástico producto del seccionamiento de botellas de PET contenido en un cilindro de malla, el cual funcionará como un filtro, permitiendo el flujo del gas y retención de la humedad.

En caso de que se utilice tezontle, este deberá ser colocado sin compactar y dentro de una malla de protección, ya sea plástica o de acero galvanizado de abertura hexagonal de 0.005 m (C-20, Ab-50 mm). Para evitar el deslizamiento de este implemento (filtro de condensados), se deberá fijar, a través de dos pares de hilos de alambre galvanizado calibre 8 (4.19 mm) por medio de un torzal exterior. El desarrollo del hilo inferior del filtro será por la parte interna hasta llegar a la mitad de la altura del filtro, y para hacerlo llegar al exterior, será necesario extraerlo por un barreno de 11/64" (4.37 mm). El hilo superior tendrá salida en la altura superior del filtro por medio de un barreno de 11/64" (4.37 mm). Una vez extraídos ambos hilos, se unirán entre sí por medio del torzal.

En el caso de haber seleccionado PET como material filtro, este deberá ser colocado en secciones de cuadros de 0.05x0.05 m sin compactar. Los cuadros deberán ir dentro de una malla de protección, ya sea plástica o de acero galvanizado de abertura hexagonal de 0.005 m (C-20, Ab-50 mm). Para evitar

el deslizamiento de este implemento (filtro de condensados), se deberá fijar a través de dos pares de hilos de alambre galvanizado calibre 8 (4.19 mm), que serán fijados por medio de un torzal exterior. El desarrollo del hilo inferior del filtro será por la parte interna hasta llegar a la mitad de la altura del filtro y para hacerlo llegar al exterior se extrae por barreno de 11/64" (4.37 mm). El hilo superior tendrá salida en la altura superior del filtro por medio de un barreno de 11/64" (4.37 mm). Una vez extraídos ambos hilos, se unirán entre sí por medio del torzal.

Ya instalado el sistema de trampas de condensado, el tubo que formará parte del sistema de control y monitoreo de biogás puede ser colocado para, posteriormente, realizar el encofrado lateral y superior del tubo, así como el cocido del geotextil. As, una vez listo el sistema de control y monitoreo de biogás, se puede iniciar la construcción y conformación de la capa base y el sistema de sellado.

Sistema de Condensado con PET o TEZONTLE

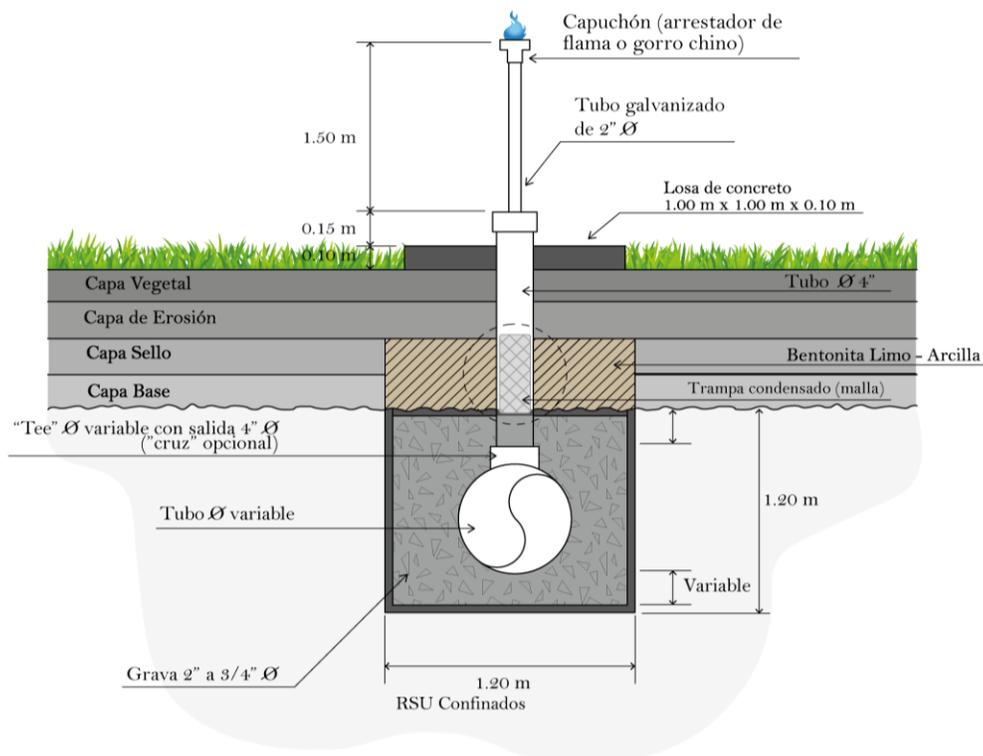


Figura 87. Diagrama de detalle de trampa de condensado con relleno de PET o tezontle en tubería vertical del sistema de zanja o trinchera

Fuente: elaboración propia

ii) TRAMPAS DE CONDENSADO CON HDPE EN SISTEMAS DE ESPIRAL O ZIGZAG EN TUBERÍA VERTICAL DE 4”

Este sistema se instalará en una sección de 0.50 m del tubo vertical de 4” que tendrá la función de extracción de biogás. Esta sección se adecuará con un sistema de condensado que permita el flujo del gas y retenga la humedad contenida en el biogás.

La adecuación para la instalación de la trampa de condensado consiste en la colocación de mamparas horizontales de PVC o HDPE o acrílico, o cualquier otro plástico, dentro del tubo. Las secciones horizontales (mamparas) serán tiras de 0.03 m de ancho y de un largo de que podrá ir de la mitad (1/2) a tres cuartos (3/4) el diámetro del tubo de extracción. Para la colocación de estas trampas, se deberá hacer ranuras en el tubo a cada 0.10 m de separación con forma de espiral o zigzag contrapuestas entre sí (sistema tresbolillo), lo anterior, con el objeto de que el biogás transite en forma de zigzag entre las mamparas y así retener el choque la humedad en las tiras plásticas. Para la colocación de las trampas se deberán hacer perforaciones al tubo de un ancho suficiente para poder colocar las barreras y éstas conserven su horizontalidad. Las trampas deberán ser pegadas, ya sea con calor o con pegamento adecuado para el material empleado, así se garantiza su durabilidad al interior del tubo.

Una vez colocado el sistema de trampas de condensado, el tubo que formará parte del sistema de control y monitoreo de biogás puede ser colocado para, posteriormente, realizar el encofrado lateral y superior del tubo, así como el cocido del geotextil. Una vez listo el sistema de control y monitoreo de biogás, se puede iniciar la construcción y conformación de la capa base y el sistema de sellado.

Sistema de Condensado Zig Zag

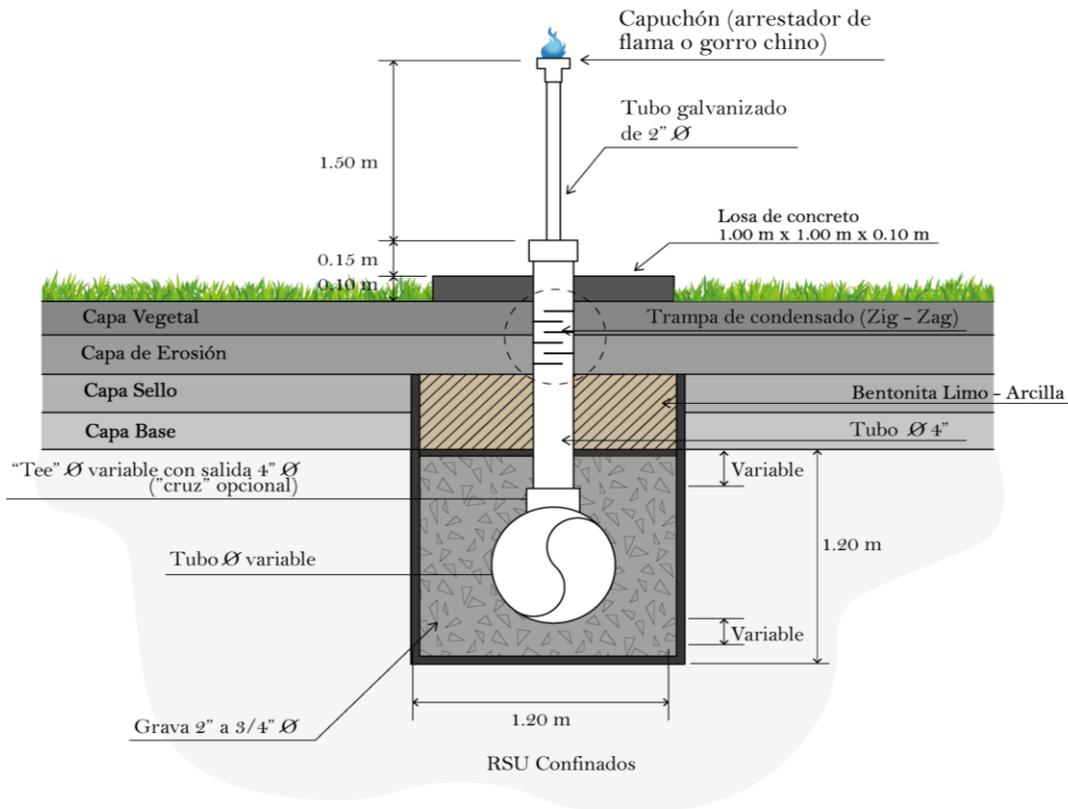


Figura 88. Diagrama de detalle de trampa de condensado con mamparas plásticas en sistema zigzag en tubería vertical del sistema de control y monitoreo de biogás por método de zanja o trinchera

Fuente: elaboración propia

iii) TRAMPAS DE CONDENSADO EN CONEXIONES TIPO CRUZ EN TUBERÍA CONTINUA

El sistema de trampas de condensado en las secciones tipo Cruz, a diferencia de los otros sistemas, no lleva ningún complemento que se deba implementar, ni en el tubo horizontal, ni en la conexión tipo Cruz. Para este sistema se le debe dar una pendiente a los tubos horizontales; con dicha pendiente, el flujo del biogás, al tener variantes en la altura y diferencia de presión el vapor de agua se condensará y se desplazará al punto más bajo.

Para el caso del sistema de tubería continua, en caso de seleccionar este sistema de trampas de condensado, se deberá dar pendientes a la tubería, mismas que podrán ir del 0.5% al 1%. Estas pendientes se darán aprovechando

la configuración del sitio o con el aumento en la cama del tubo, lo que quiere decir que la pendiente se otorgará con colocación de más volumen de material pétreo. Es importante considerar a la conexión tipo cruz como el punto medio o punto 0 (cero), para que desde ese punto se empiece a considerar el aumento de la pendiente. Las distancias entre las trampas de condensado van de los 40 m a 70 m, esto quiere decir que podrán instalarse las conexiones tipo Cruz en los puntos donde el proyecto determine una salida vertical para la destrucción pasiva del biogás.

Para conservar la profundidad de la excavación superficial de 1.20 m. propuesta, se recomiendan las siguientes pendientes para los tubos horizontales de los diámetros que podrán ir de 8” a 18”. En la Tabla 14 se establecen los intervalos de pendientes que puede darse a las tuberías para conservar, de igual modo, la capa de protección superior del tubo, que debe ser de un mínimo de 0.20 m para formar parte del encofrado del tubo.

Tabla 14. *Pendientes de inclinación de tubería horizontal para sistema de trampas de condensado en sistema continuo*

Pendientes de Inclinación de Tubería Horizontal para Sistema de Trampas de Condensado en Sistema Continuo		
Distancia de salida vertical (m)	Diámetro Tubo (in)	Rango de Pendiente (%)
40	8” – 12”	0.5 – 1
	15” – 18”	0.5
50	8”	0.5 – 1
	10” – 15”	0.5
60	8” – 15”	0.5
70	8” – 12”	0.5

Fuente: elaboración propia

Si el proyecto establece mayor pendiente para los tubos de 15” a 24”, se puede hacer sólo si la configuración del sitio lo permite. Para configuraciones semiplanas es importante considerar que, al aumentar la pendiente, aumenta el nivel de excavación, por lo que debe considerarse dar estructura a la zanja a base de taludes, o un apuntalamiento que puede hacerse con sistema de tablestaca. Así mismo, es importante considerar que habrá aumento en los volúmenes de material pétreo y geotextil. Para el caso de este manual se descartó dicho sistema de trampa de condensado para la tubería de 24”.

Las conexiones tipo Cruz deben quedar en posición completamente horizontal para lograr asentar los brazos de las conexiones sobre la cama de material pétreo. En la parte inferior de la Cruz se deberá colocar una sección de tubo

de 0.50 m dentro del estrato de residuos. Esta parte inferior se puede dejar libre o se le puede colocar una tapa ranurada, puesto que por ese ducto escurre el condensado del biogás. La unión de las conexiones tipo Cruz debe hacerse al tubo horizontal por medio de una conexión flexible, ya que será difícil alcanzar la verticalidad de los tubos para la unión con la conexión tipo Cruz, mismas que ayudarán a la unión.

Para la colocación del tubo vertical y realizar el encofrado lateral y superior del tubo y el cocido del geotextil, una vez conectados los tubos y la conexión tipo Cruz, se puede colocar la reducción de 4". Una vez listo este sistema de control y monitoreo de biogás, se puede comenzar la construcción y conformación de la capa base y el sistema de sellado.

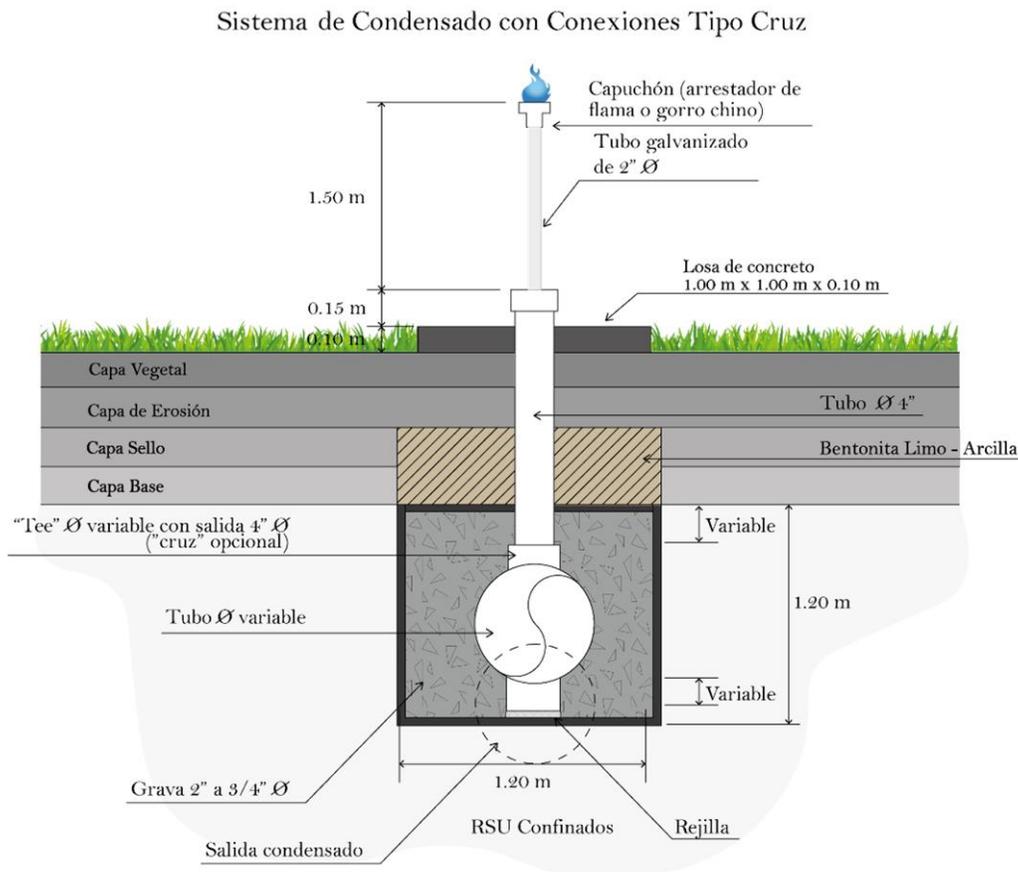


Figura 89. Diagrama de detalle de la trampa de condensado con conexiones tipo Cruz en la tubería horizontal del sistema de control y monitoreo de biogás por método de zanja o trinchera

Fuente: elaboración propia

iv) TRAMPAS DE CONDENSADO EN CONEXIONES TIPO CRUZ EN TUBERÍA DISCONTINUA

En caso de seleccionar el sistema de trampas de condensado en tubería discontinua, se deberá dar pendientes que podrán ir del 0.5% al 3%. Estas pendientes se darán aprovechando la configuración del predio o aumentando el volumen de material en la cama del tubo horizontal, que se soluciona con la colocación de mayor volumen de material pétreo. Es importante considerar a la conexión tipo cruz como el punto medio o punto 0 (cero) para que, de ese punto, se empiece a considerar el aumento de pendiente. A diferencia del sistema continuo y teniendo que las secciones en este sistema son de 12 m, el rango de pendiente que se puede dar a las tuberías horizontales es mayor, puesto que las conexiones tipo Cruz unirán a las dos secciones de 12 m que formen este sistema discontinuo, en cuya salida vertical superior se instalará el sistema de destrucción térmica pasiva y en cuya salida vertical inferior sucederá la conducción e infiltración del vapor de agua condensado.

Para conservar la profundidad de la excavación superficial de la trinchera de 1.20 propuesta, específicamente para los tubos horizontales de los diámetros que podrán ir de 8" a 24", se recomiendan las pendientes listadas en la Tabla 15, donde se establecen los rangos de pendiente que puede darse a las tuberías para conservar, de igual modo, la capa de protección superior del tubo que forma parte del encofrado del tubo, con un mínimo de 0.20 m.

Tabla 15. Pendientes de inclinación de tubería horizontal para sistema de trampas de condensado en sistema discontinuo de control y monitoreo de biogás por método de zanja o trinchera

Pendientes de Inclinación de Tubería Horizontal para Sistema de Trampas de Condensado en Sistema Discontinuo		
Distancia de salida vertical (m)	Diámetro Tubo (in)	Rango de Pendiente (%)
12	8" – 12"	0.5 – 3
	15"	0.5 – 2.5
	18"	0.5 – 2
	24"	0.5

Fuente: elaboración propia

Si el proyecto establece mayor pendiente para los tubos, es importante considerar que, al aumentar la pendiente, aumenta el nivel de excavación, por lo que debe otorgarse una estructura a base de taludes a la zanja, o un apuntalamiento que puede hacerse con sistema de tablestaca. Así mismo, debe considerarse que habrá aumento en los volúmenes de material pétreo y geotextil.

En el armado de las secciones en forma de Tee, y las dos secciones de tubos horizontales unidas por la conexión tipo Cruz (que serán las estructuras principales del sistema de control y monitoreo de biogás) es importante considerar que estas deben quedar en posición completamente horizontal, logrando asentar los brazos de las conexiones sobre la cama de material pétreo. En la parte inferior de la Cruz se deberá colocar una sección de tubo de 0.50 m que vaya dentro del estrato de residuos. Esta parte inferior se puede dejar libre o se le puede colocar una tapa ranurada, de forma que por ese ducto escurra el vapor de agua condensado contenido en el biogás. La unión de las conexiones tipo Cruz debe hacerse al tubo horizontal por medio de una conexión flexible, ya que, por la pendiente en los tubos, es difícil lograr su verticalidad; las conexiones flexibles ayudarán a la unión entre la conexión tipo Cruz y los tubos horizontales.

Una vez conectados los tubos y la conexión tipo Cruz, se puede colocar la reducción de 4" para la colocación del tubo vertical y realizar el encofrado del mismo, así como el cocido del geotextil. Una vez listo este sistema de control y monitoreo de biogás, se puede iniciar la construcción y conformación de la capa base y el sistema de sellado.

Sistema de Condensado con Conexiones Tipo Tee

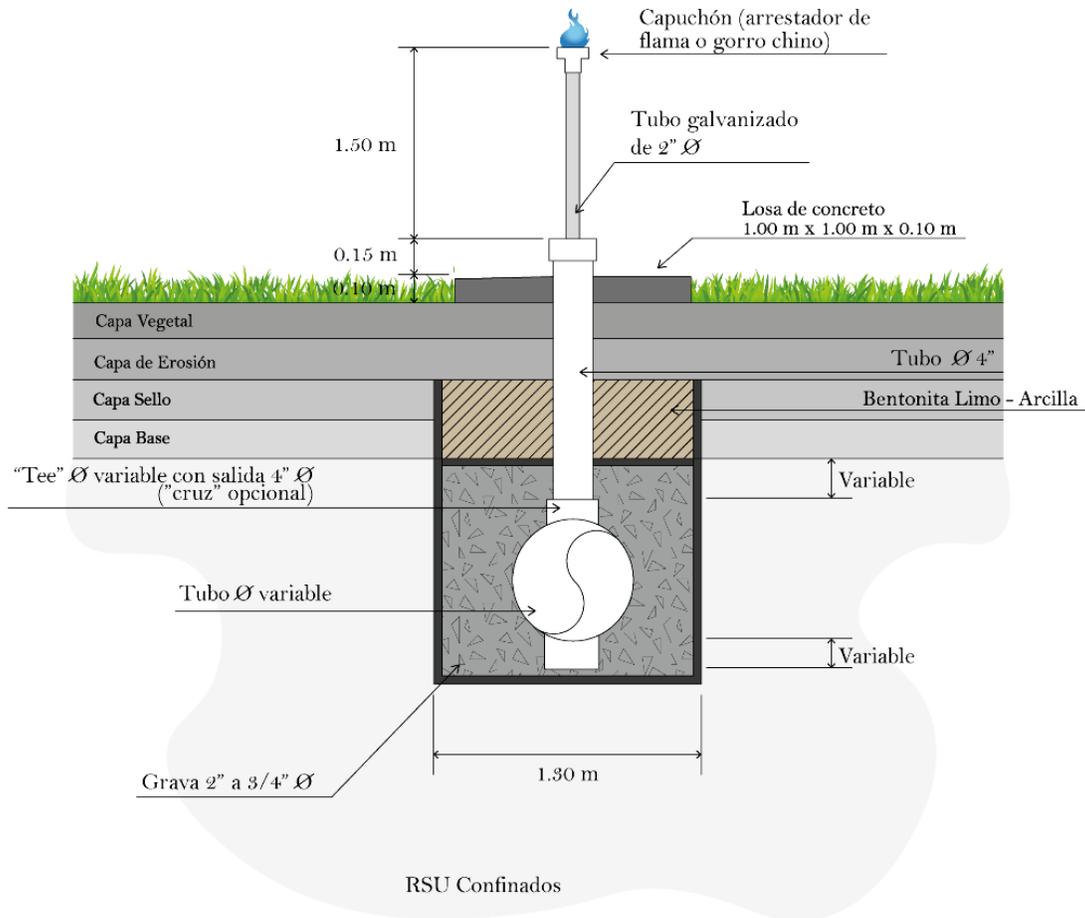


Figura 90. Diagrama de detalle de trampa de condensado con conexiones tipo Tee en la tubería horizontal de control y monitoreo de biogás por método de zanja o trinchera

Fuente: elaboración propia

v) TRAMPAS DE CONDENSADO DE CRESTAS Y VALLES EN TUBERÍA CONTINUA

Esta alternativa de trampas de condensado en el sistema de trincheras de tubo continuo consiste en la colocación de las conexiones tipo Tee en el punto bajo de los valles que se formarán con la tubería horizontal. Es por ello que para este sistema de trampa de condensado se deberá dar a los tubos una pendiente que puede ir del 0.5% al 3% medido desde el punto de colocación de la conexión tipo Tee, a la mitad de la distancia que se seleccione en el proyecto, la cual, según este manual, se recomienda de entre 12 a 70 m. En el punto más bajo se instalará una conexión tipo Tee a través de su sección vertical, misma que estará direccionada hacia el estrato de residuos, de forma que permita el escurrimiento y la infiltración del vapor de agua condensado presente en el biogás.

La formación de las crestas y valles, así como colocación de estas trampas, es independiente a las salidas verticales para la destrucción pasiva del biogás; sin embargo, en los puntos donde coincidan salidas verticales (que se recomienda se encuentren distanciadas de 40 m a 70 m). Para las trampas de condensado, se puede colocar una conexión tipo Cruz o, únicamente, una conexión tipo Tee con la sección vertical direccionada hacia la superficie donde se colocará la reducción de 4". Tal es la instalación del sistema de destrucción pasiva del biogás.

Para la construcción de este sistema de crestas y valles se establecen los criterios planteados en la Tabla 17, los cuales toman en cuenta el diámetro de los tubos horizontales, la pendiente que estos pueden tener y la longitud de las secciones para formar las crestas y valles, así como la distancia de colocación de las conexiones tipo Tee. De igual manera, debe considerarse a estas distancias como el punto medio o punto 0 (cero), por lo que, a partir de este punto, se debe comenzar a dar pendiente para poder formar así el punto más alto o cresta. Estos criterios también sirven para poder conservar la estructura de la excavación superficial de la trinchera de 1.20 de profundidad propuesta. En la Tabla 16 se establecen los rangos de pendientes que se le pueden dar a las tuberías para conservar la capa de protección superior del tubo que forma parte del encofrado y que se establece sea de un mínimo de 0.20 m.

Tabla 16. Criterios para colocación de trampas de condensado en sistema de crestas y valles en sistema continuo

Criterios para Colocación de Trampas de Condensado en Sistema de Crestas y Valles en Sistema Continuo		
Distancia de conexión tipo Tee (m)	Diámetro Tubo (m)	Rango de Pendiente (%)
12	8" – 12"	0.5 – 3
	15"– 18"	0.5 – 2
18	8" – 10"	0.5 – 2.5
	12"	0.5 – 2
	15"	0.5 – 1.5
	18"	0.5 – 1
24	8"	0.5 – 2
	10" – 12"	0.5 – 1.5
	15"– 18"	0.5 – 1
40	8" – 12"	0.5 – 1
	15"– 18"	0.5
50	8"	0.5 – 1
	10" – 15"	0.5
60	8" – 15"	0.5
70	8" – 12"	0.5

Fuente: elaboración propia

Una vez establecida las longitudes de las secciones de tubería que formarán las crestas y valles, se debe tomar en cuenta que la unión de las tuberías en la zona de crestas se deberá hacer con una conexión flexible, lo mismo debe hacerse en el punto de colocación de las conexiones tipo Tee, que serán colocadas en los valles, lo anterior para facilitar conseguir verticalidad en los tubos. Para lograr la unión entre tuberías y conexiones tipo Tee del sistema de condensado y las conexiones tipo Tee o tipo Cruz en las zonas donde se haya determinado la salida vertical para la destrucción pasiva del biogás, se deberá hacer uso de las conexiones flexibles.

Las conexiones tipo Tee y tipo Cruz, tanto del sistema de condensado como del sistema de destrucción pasiva del biogás, deberán quedar en posición horizontal asentando las conexiones sobre la cama de material pétreo. La parte vertical de la conexión tipo Tee, o tipo Cruz, que forme parte del sistema de condensado puede introducirse en el estrato de residuos para que los brazos queden sobre la cama de basalto. Esta parte inferior puede dejarse libre o se le puede colocar una tapa ranurada para que escurra el condensado.

Una vez conectados los tubos y las conexiones, se puede realizar el encofrado del tubo, así como el cocido geotextil. Una vez listo este sistema de control y monitoreo de biogás se puede iniciar con la construcción y conformación de la capa base y el sistema de sellado.

Detalle Trampa de Condensado en Sistema de Crestas y Valles

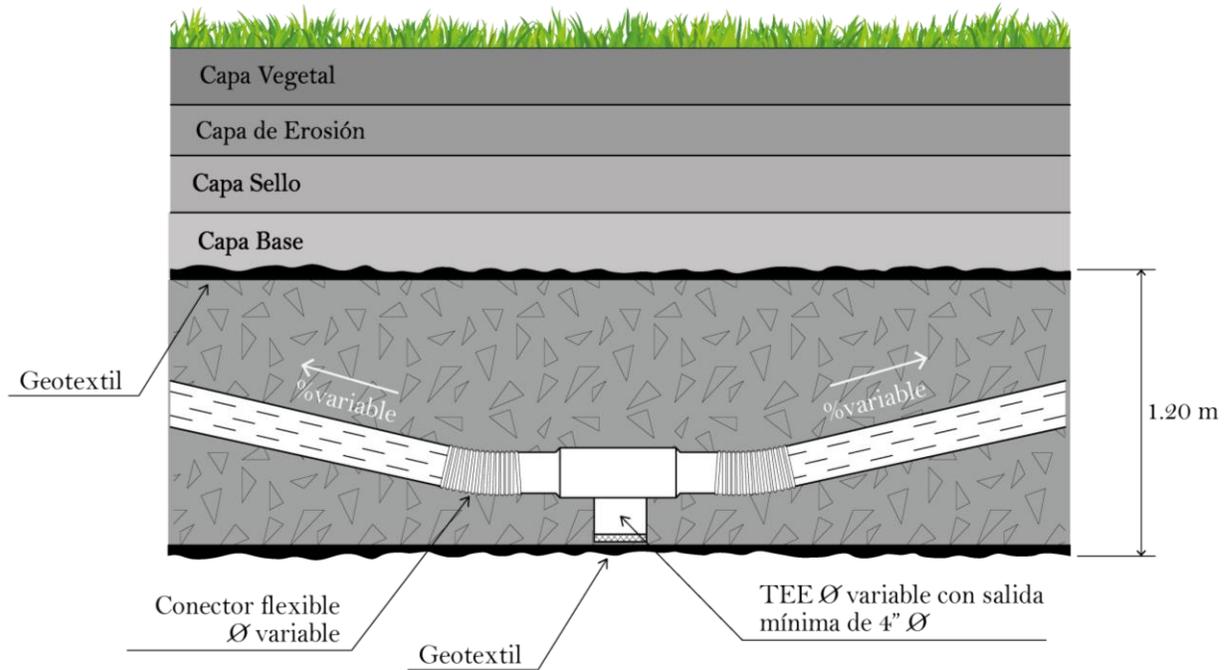


Figura 91. Diagrama de detalle de trampa de condensado con conexiones tipo Tee en tubería horizontal del sistema de crestas y valles para el de control y monitoreo de biogás por método de zanja o trinchera

Fuente: elaboración propia

Detalle de Cabezal de Destrucción Térmica Pasiva de Biogás en Sistema de Crestas y Valles

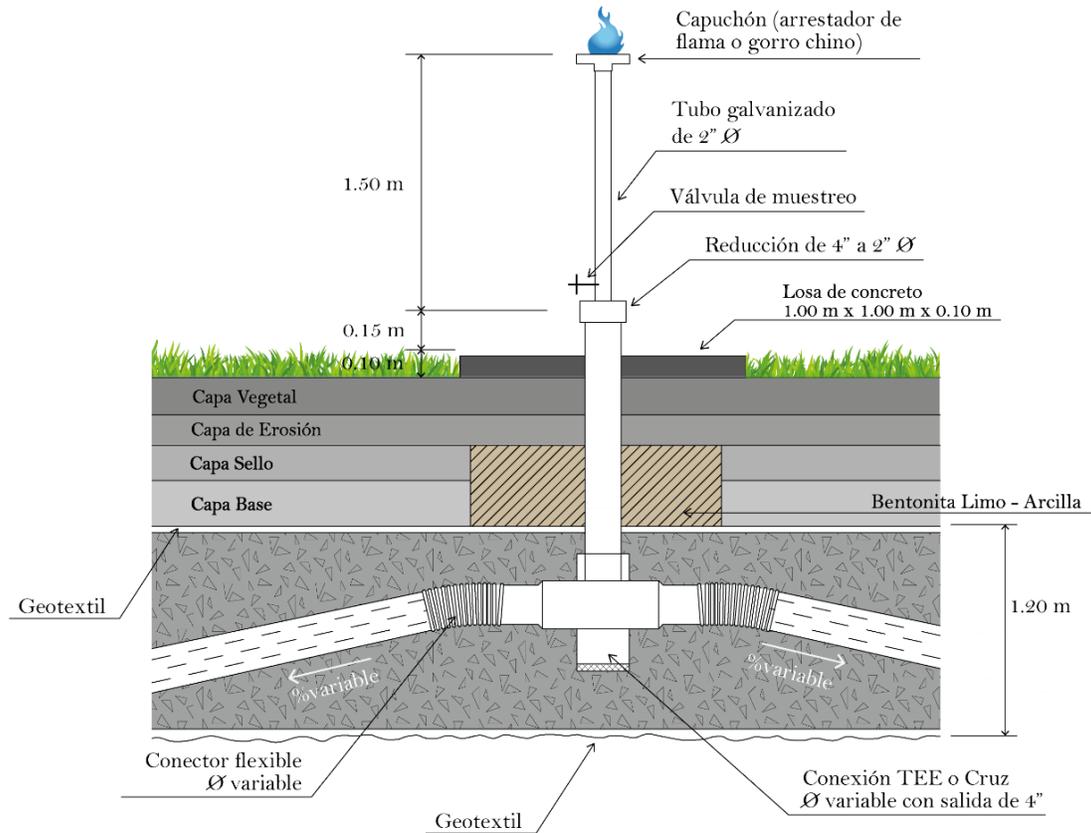


Figura 92. Diagrama de detalle de cabezal y trampa de condensado con conexiones tipo Tee o tipo Cruz en tubería horizontal del sistema de crestas y valles para el de control y monitoreo de biogás por método de zanja o trinchera

Fuente: elaboración propia

13. TRANSICIÓN DE UN SISTEMA PASIVO A UN SISTEMA ACTIVO DE CONTROL Y MONITOREO DE BIOGÁS

Todas las alternativas de sistemas de control, monitoreo y destrucción del biogás presentadas en este manual fueron presentadas con un sistema de destrucción térmica pasiva, sin embargo, estos sistemas fueron diseñados para que se pueda realizar una transición a sistemas activos de la siguiente manera.

- Deben interconectarse todos los pozos de extracción de biogás a través de una red de tubería que puede ser subterránea, a nivel de piso o por encima en soportes tipo H. La tubería podrá ser de PVC cédula 40 u 80 con recubrimiento de pintura o de HDPE de 2", 4" o 6".
- La conexión a la red debe realizarse en los cabezales de los pozos
- Se deberá contar con extractores o sopladores, el cual forzará la salida del biogás y conducirá el biogás hacia un quemador central.
- Se deberá colocar un variador de frecuencia al extractor
- Se deberá instalar un puerto de monitoreo y un flujómetro, o caudalímetro electromecánico, en una posición que quede antes de llegar al extractor central.
- Instalación de un quemador central
- Colocación de válvulas de cierre para el bloqueo total o parcial del flujo de biogás en caso de mantenimientos.
- Colocación de un tren de válvulas que prevenga el regreso de la flama.

Otra alternativa de aprovechamiento del biogás será la generación de energía eléctrica, para la cual, además del cumplimiento normativo que permita esto y de los puntos anteriores, requerirá:

- Motogeneradores
- Sistemas de remoción de Siloxanos
- Sistema de secado del biogás
- Sensor de oxígeno
- Transformadores
- Interconexión a una subestación eléctrica
- Red de tierras
- Sistema de control de temperatura de biogás
- Cuadros eléctricos
- Cuarto de control

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DE BIOGÁS

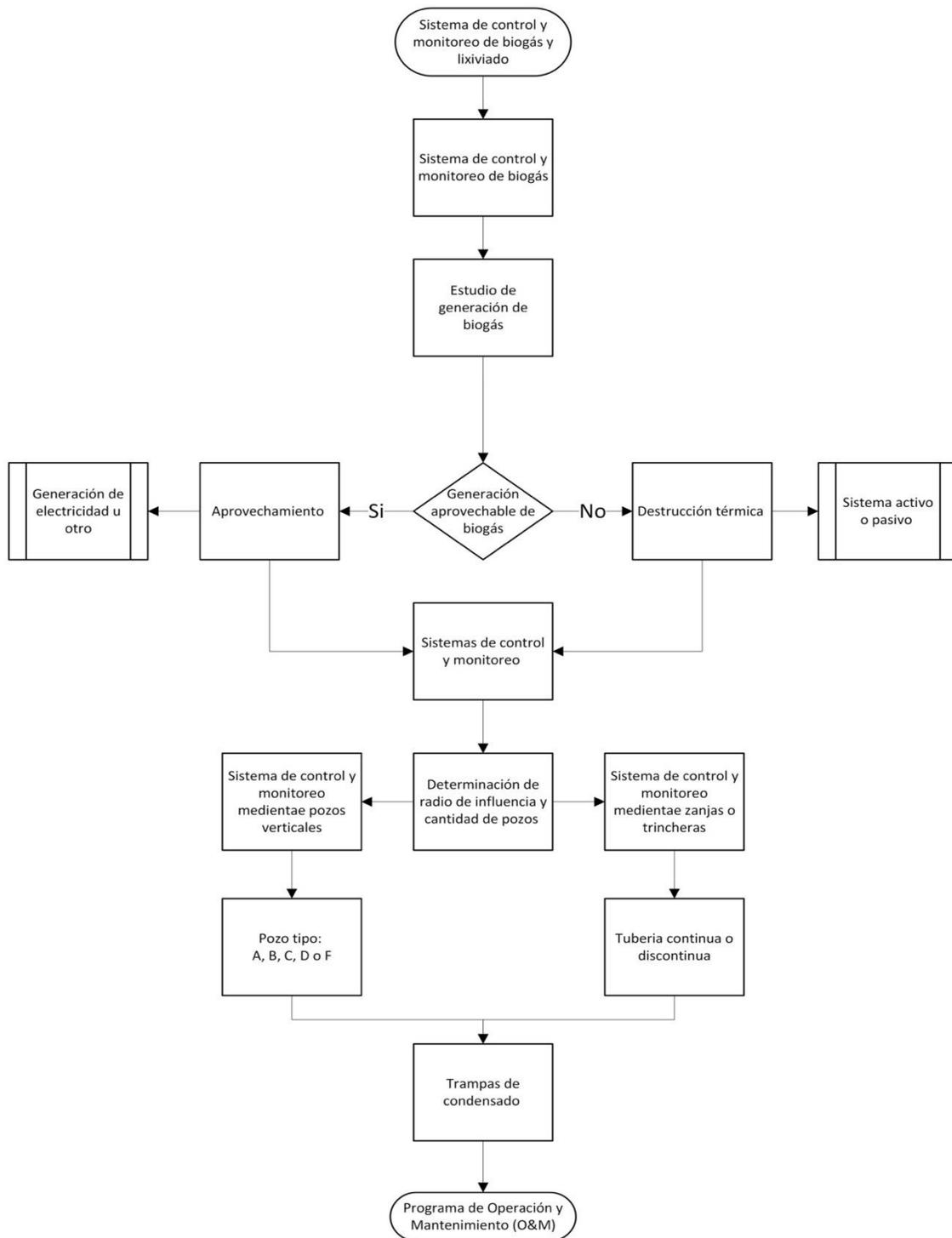


Figura 93. Diagrama de flujo para el procedimiento de aplicación del sistema de control y monitoreo de biogás

Fuente: elaboración propia

14. SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL DE LIXIVIADO

La generación de lixiviado en los sitios de disposición final es producto de la descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos confinados, además del agua de lluvia que se va infiltrando al interior del relleno, al interactuar el agua de lluvia con los residuos confinados generalmente se inicia un proceso de acumulación de lixiviados que van percolando y se acumularán en zonas específicas de los sitios, como pudieran ser puntos bajos, o zonas donde no haya una correcta compactación. Estas zonas con presencia de lixiviado serán fácilmente identificables, ya que el lixiviado empezará a aflorar evidenciando la saturación del mismo.

Es importante conocer las características y edad del lixiviado para saber qué tipo de tratamiento seleccionar. Además, se deben analizar los siguientes parámetros antes de seleccionar el tratamiento en la etapa de posclausura.

Se deben monitorear y analizar los siguientes parámetros *in situ*:

- Temperatura
- Conductividad
- pH

En laboratorio se debe realizar el análisis de los siguientes parámetros:

- Conductividad
- CaCO_3
- DBO₅
- DQO
- Sulfatos
- Cloruros
- Cianuros totales
- Fósforo total
- Amonio
- Nitratos
- Nitrógeno Kjeldahl
- Fenoles
- AOX (Compuestos Orgánicos Halogenados)
- PCBs (Bifenilos Policlorados)
- VOCs (Compuestos Orgánicos Volátiles)
- Calcio
- Magnesio
- Sodio
- Potasio
- Hierro
- Manganeso
- Cromo
- Cobre
- Níquel
- Zinc

14.1. MIGRACIÓN DEL LIXIVIADO

Es importante conocer que en el caso de los sitios no controlados o sitios controlados que no tengan una barrera permeable en la base y estén ubicados en suelos de alta permeabilidad no haya presencia de lixiviados. En suelos relativamente permeables que pueden estar formados por gravas y arenas con un porcentaje bajo de sedimentos y arcillas, la infiltración del lixiviado es mayor, dado que estos, al descender por los estratos de residuos, se infiltrarán en el suelo y se dirigirán a zonas bajas y estratos subterráneos ya que no limitan las infiltraciones del lixiviado. Por otro lado, en suelos de alta permeabilidad, como los arcillosos, se tiene una baja infiltración, lo que en su lugar producirá una migración lateral, generando escurrimiento hacia zonas bajas.

Los conductos potenciales para la infiltración del lixiviado en los SNC, SC y SDF sin una capa impermeable en su base, pueden ser:

- Fisuras en la cama de rocas minerales
- Fallas geológicas
- Túneles y cavernas naturales o construidos con anterioridad
- Tuberías de instalaciones de servicio subterráneas
- Cuerpos de agua subterráneos

Así mismo, una vez iniciados los procesos de saneamiento del SNC, es posible que se tenga presencia y generación posterior de lixiviados, por ello se deben plantear alternativas para detener los escurrimientos del lixiviado fuera de la zona de confinamiento; por ello, es necesario establecer alternativas para la contención de este líquido dentro de la zona de confinamiento, o en áreas específicas para su tratamiento.

14.2. UBICACIÓN DEL SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y CONTROL DEL LIXIVIADO

Para la ubicación y construcción del sistema de captación para el control y monitoreo de lixiviado en un sitio de disposición final, lo ideal sería realizar un estudio de geofísica ambiental, el cual conste de un modelo geofísico y un modelo geoelectrico del sitio. Se recomienda que el tipo de sondeo para la realización de tomografías eléctricas se realice con configuración electródica que ayude a la localización de las zonas con presencia de lixiviado; dicha configuración considera factores como el corte geoelectrico, que, a través de líneas geofísicas, generará una modelación de las capas, fenómenos que permitirá explicar de manera más gráfica y exacta las elevaciones, profundidad y espesor de los horizontes de composición del suelo y subsuelo, así como su

resistividad y capacidad de carga. El estudio mencionado también muestra las capas de residuos y sus características; por ejemplo, si estos residuos están o no saturados, zonas con filtración y escurrimientos de lixiviados, o zonas donde se encuentra estancado el lixiviado. Lo anterior ayudará a que se realicen las perforaciones y construcción de pozos únicamente donde haya presencia del líquido para su extracción y tratamiento, o para su recirculación en zonas con poca humedad. Este estudio ayudará a la ubicación exacta de las zonas donde se debe controlar y monitorear el lixiviado, sin embargo, se puede hacer la ubicación, perforación e instrumentación de los sistemas de captación, extracción o recirculación del lixiviado ubicando las zonas donde haya afloramiento o escurrimiento del fluido.

14.3. EDAD DEL LIXIVIADO

La determinación de la edad del lixiviado se puede realizar al conocer los años de vida que lleve la celda del SDF en operación. Las características de los lixiviados son: lixiviado joven (LJ) < 5 años; lixiviado intermedio (LI) de 5 a 10 años y Lixiviado viejo o maduro (LM) mayor a 10 años. (Kang *et al.* 2002; Kulikowska & Klimiuk, 2008; Renou *et al.* 2008; Shouliang *et al.* 2008)

Es importante saber que el lixiviado de un SDF puede permanecer joven, independientemente del tiempo que lleve en la celda; esto quiere decir que se trata de un lixiviado ácido formado en la etapa de acidogénesis, que se trata de una de las fases de formación de biogás. Este tipo de lixiviado es más complicado de tratar, por ello, es recomendable promover su recirculación para convertirlo en maduro y reducir su acidez.

En la Tabla 17, la cual fue adecuada del artículo *The present status of landfill leachate treatment and its development trend from a technological point of view*. 2015. Gao, J., Oloibiri, V., Chys, M., Audenaert, W., Decostere, B., He, Y., Langenhove, H., Demeestere, K., & Hulle, S. se muestran las características y los parámetros de los lixiviados de acuerdo con su edad.

Tabla 17. Características de lixiviado de acuerdo con su edad

Características de Lixiviado de Acuerdo con su Edad			
Edad del SDF	Joven	Mediano	Maduro/Viejo
Fase del sitio de disposición final	Aeróbica y Acidogénesis		Metanogénica
Años	<5	5.0 – 10	>10
pH	<6.5	6.5 – 7.5	>7.5
DQO (g/L)	>15	3.0 – 15	<3.0
DQO/TOC	<2.7	2.0 – 2.7	>2.0
DBO5/DQO	0.5 – 1.0	0.1 – 0.5	<0.1
Componentes Orgánicos/AGV* (%TOC)	>70	5.0 – 30	<5
NH ₄ -N (mg/L)	<400	400	>400
Nitrógeno Kjeldahl (g/L)	0.1–0.2	NA	NA
Biodegradabilidad	Alta	Media	Baja
AGV* Ácidos Grasos Volátiles			

Fuente: elaboración propia adaptado del artículo The present status of landfill leachate treatment and its development trend from a technological point of view.

14.4. TRATAMIENTOS PARA EL LIXIVIADO

El propósito de dar una alternativa de tratamiento al lixiviado es principalmente el de contener el contaminante y evitar que este se siga esparciendo en los alrededores del SDF, por ello este manual establecerá algunas alternativas que las entidades puedan utilizar para el control de tales fluidos.

Si bien, se pueden encontrar tratamientos diversos para el lixiviado, algunos de estos quedan fuera del alcance económico de las entidades municipales y estatales; sin embargo, y si está dentro del alcance de las entidades, realizar un tratamiento más complejo sería lo ideal; por ello, se mencionan los tratamientos posibles a los que pueden ser sometidos los lixiviados generados por RSU.

- Recirculación
- Lagunas de evaporación
- Lagunas facultativas
- Lagunas de estabilización
- Lagunas aireadas
- Sistema de membranas
- Biorreactor con membranas (MBR)
- Reactores bilógicos
- Evaporación por combustión
- Precipitación química
- Oxidación química
- Adsorción con carbón activado
- Ultrafiltración
- Inertización
- Ósmosis inversa
- Stripping de NH₃
- Tratamiento conjunto con agua residual

Un punto importante para la selección del tratamiento es conocer la edad del lixiviado; con ello se garantiza la eficiencia del tratamiento. En la Tabla 18 se encuentra la eficiencia de algunos tratamientos de acuerdo con la edad del lixiviado con datos obtenidos del artículo *The present status of landfill leachate treatment and its development trend from a technological point of view*. 2015. Gao, J., Oloibiri, V., Chys, M., Audenaert, W., Decostere, B., He, Y., Langenhove, H., Demeestere, K., & Hulle, S.

Tabla 18. Eficiencia de tratamientos de acuerdo con edad de lixiviado

EFICIENCIA DE TRATAMIENTOS DE ACUERDO CON EDAD DE LIXIVIADO			
Tipo de Tratamiento	Edad de Lixiviado		
	Joven	Intermedio	Maduro/Viejo
	Eficiencia del Tratamiento		
Tratamiento Biológico	Buena	Media	Baja
Oxidación Química	Baja	Media	Media
Precipitación Química	Baja	Media	Baja
Adsorción con Carbón Activado	Baja	Buena	Buena
Coagulación – Floculación	Baja	Buena	Buena
Ósmosis Inversa	Media	Buena	Buena

Fuente: elaboración propia adaptado del artículo *The present status of landfill leachate treatment and its development trend from a technological point of view*. 2015

Si bien, podemos encontrar un amplio abanico de tratamientos, este manual toma en cuenta únicamente tres alternativas. La primera de ellas es el sistema de lagunas, que podrán ser aireadas, facultativas o de evaporación; en segundo lugar, la recirculación del lixiviado como posible tratamiento; y en tercero, el tratamiento conjunto con agua residual en una planta de especializada en ello. Sin embargo, como principal objetivo aparte del tratamiento, estará el control, contención, manejo y extracción de los lixiviados.

15. SISTEMA DE CAPTACIÓN DE LIXIVIADOS

Uno de los puntos que antecede al sistema que se va a instalar para dar un tratamiento al lixiviado, es el sistema de captación del mismo, el cual debe construirse una vez definida la estructura del sitio y confinados los residuos. Se debe observar e identificar los puntos de afloramiento de lixiviados, así como ubicar los puntos bajos del sitio para la instalación de pozos de extracción y puntos de recolección de lixiviado; de igual manera, será necesario identificar aquellas zonas con baja humedad para la reinyección del lixiviado.

Para los sistemas de captación de lixiviado se proponen cuatro alternativas:

- Pozos verticales
- Drenes perimetrales
- Drenes Horizontales de Penetración
- Cárcamos de captación

15.1. POZOS VERTICALES

El sistema de pozos verticales está ligado a los pozos mixtos del sistema de biogás, donde dicha infraestructura servirá para la extracción del lixiviado y la destrucción pasiva del biogás.

Estos pozos deberán estar ubicados en zonas donde haya afloramiento de lixiviado, o donde los estudios geofísicos hayan detectado saturación del fluido. Estos pozos tendrán profundidades variables dependientes del perfil topográfico del sitio y los estudios geofísicos realizados. Habrá dos tipos de sistemas, un sistema sencillo para extracción únicamente de lixiviado y un sistema mixto, para extraer, también, biogás. El sistema mixto también se puede encontrar en la sección de “Sistema de control y monitoreo mediante pozos verticales” en “Pozo tipo F. Sistema De Pozo Mixto de 8” para Extracción de Lixiviado y Destrucción Térmica Pasiva de Biogás”, proceso descrito en la sección “Sistema de pozo para extracción de lixiviado”.

15.1.1. SISTEMA DE POZO PARA EXTRACCIÓN DE LIXIVIADO

Se deberá realizar la perforación de un pozo que abarque un porcentaje del 70% al 80% de la altura total del estrato de residuos sólidos confinados y un diámetro de 0.60 m a 0.80 m. Este pozo se rellenará con un filtro a base de material pétreo basáltico con una granulometría de 2” de diámetro sin finos, en el interior y al centro del pozo se colocará un tubo de PVC cédula 40 u 80 o un tubo de HDPE con un diámetro que podrá ir de 8” a 10” el cual llegará a 1.00

m antes de la profundidad total del pozo. Al tubo se le deberán realizar ranuras de 0.10 m de largo por 0.005 m de ancho en forma de trébol por todo el rededor, y deberán hacerse a cada 0.05 m. Las perforaciones del tubo deben abarcar al menos el 75% de la longitud del tubo que tenga contacto con la capa de residuos confinados, así mismo se deberá colocar una tapa ciega en el fondo o base del tubo.

El tubo de extracción de lixiviado deberá sobresalir al nivel 0+ 0.50 m, considerando el nivel 0.00 m la superficie de la cubierta vegetal. De igual modo en el nivel 0.00 m, se deberá construir una placa de concreto pobre o armado de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. En el cabezal del tubo se deberá colocar una tapa roscada o atornillable que será removida cuando se vaya a realizar el monitoreo del tirante o la extracción del lixiviado, es importante que el tirante de lixiviado a retener en el pozo sea del 40% al 60% de la altura del tubo de extracción de lixiviado, una vez alcanzados los tirantes recomendados, se deberá realizar la extracción del lixiviado con una bomba sumergible antichispa de acero inoxidable de 4" a 8" con una potencia mínima de 0.5 HP (Caballos de fuerza). El lixiviado podrá ser cargado a un carro tanque (pipa), conducido a un pozo de recirculación en un nivel superior o dispuesto en una laguna de evaporación, esto dependerá del sistema de control, tratamiento y monitoreo del lixiviado establecido en el proyecto de cierre y clausura del sitio.

Como parte del sistema de sellado del pozo, se colocará una mezcla de bentonita con material limo-arcilloso (tepetate) alrededor del tubo, entre el estrato de residuos sólidos confinados y la capa sello. La mezcla de bentonita con material limo-arcilloso se realizará en una proporción de al menos 20% y 80% respectivamente. Una vez homogenizados los materiales, será necesario aplicar una humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM para posteriormente verterlo alrededor del tubo y proceder a su compactación con pisón de mano o mecánico.

En la superficie del pozo, en el nivel 0.00 m, se deberá construir un sistema de protección, el cual podrá ser mediante la construcción de una placa de concreto con dimensiones de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. Previo al colado de la placa, se debe considerar la colocación de un tubo de un diámetro mayor al tubo del pozo, para que al momento del colado de la losa y en todo momento este tubo quede adherido a la placa de concreto, y así permitir el libre deslizamiento de los tubos que forman parte del sistema del pozo. Este sistema ayudará a que la placa de concreto se comporte conforme se presenten los asentamientos diferenciales y evitar una flotación o ruptura.

Es importante que el monitoreo de los niveles de lixiviado se realice con una periodicidad establecida de al menos tres veces por semana (periodicidad que podrá disminuir o incrementar dependiendo del volumen presentado). Este monitoreo se debe realizar de manera manual por el encargado de operación y mantenimiento (O&M) con un medidor de agua de cinta plana que ayude a saber el nivel del tirante del pozo. Por cuestiones de practicidad y con el propósito de cumplir con el objetivo de este manual del cierre y clausura de vertederos, lo antes descrito es lo sugerido por tratarse de la opción más económica.

En otro sentido, y si se tienen los recursos, se puede instalar un sistema electrónico automatizado mediante un flotador de nivel para cisternas que ayude a conocer el nivel del tirante máximo alcanzado por el lixiviado. Cuando sea necesario, el medidor activará el microswitch interno que dé aviso sobre la necesidad de vaciado del pozo. Otra alternativa con un mayor equipamiento tecnológico, y, por tanto, un mayor costo, es la instalación de un sistema de control de bombeo que haga una interfaz con un software y una aplicación (APP) en donde sea posible tener el control de las bombas de manera remota. Es importante señalar que para esta última opción se debe tener una bomba en cada pozo mixto.

Pozo para extracción de lixiviado

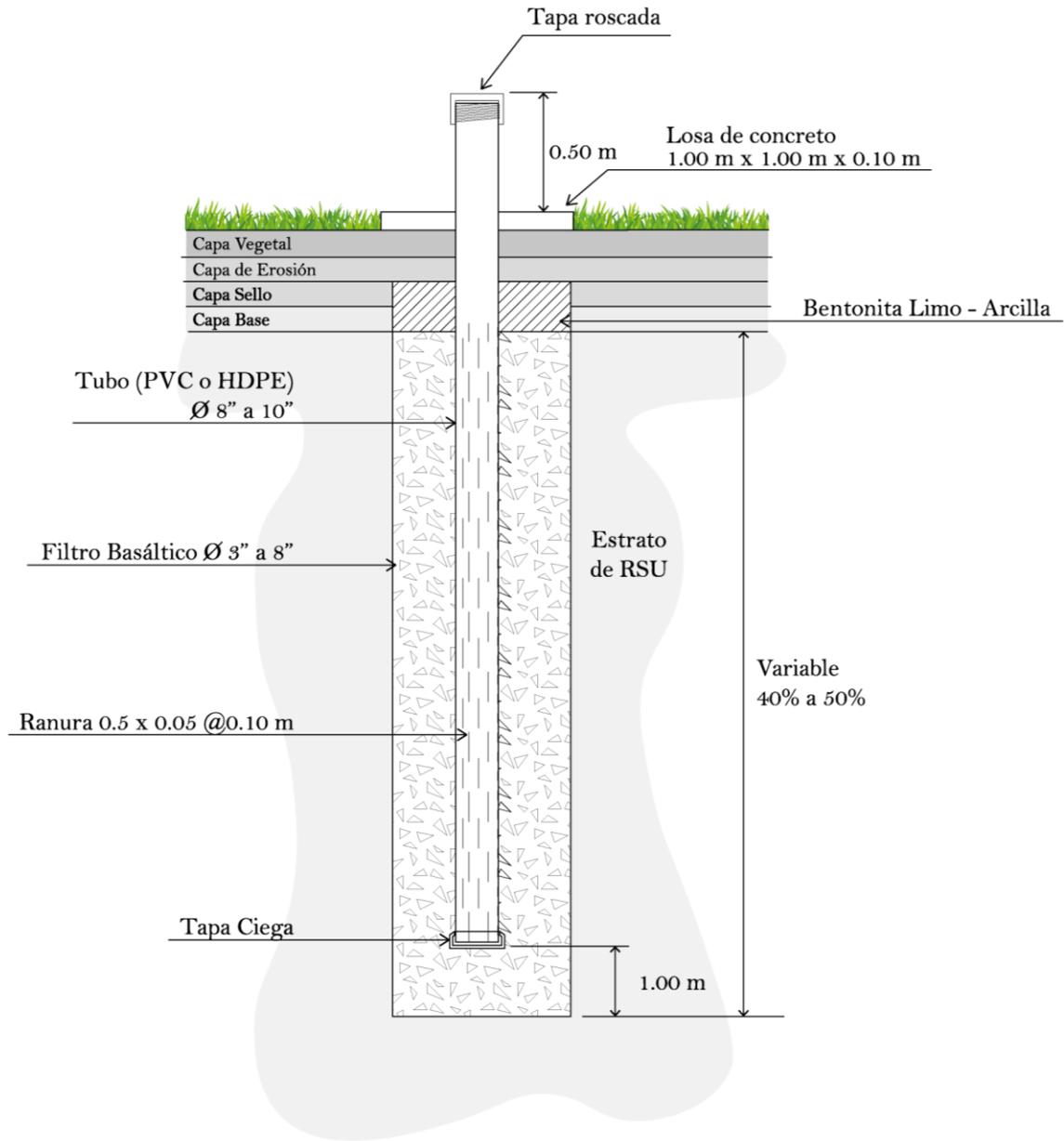


Figura 94. Diagrama de pozo para extracción de lixiviado
Fuente: elaboración propia

15.1.2. SISTEMA DE POZO MIXTO PARA EXTRACCIÓN DE LIXIVIADO Y DESTRUCCIÓN TÉRMICA PASIVA DE BIOGÁS

Se realiza la perforación de un pozo con un diámetro de 0.60 m a 0.80 m, el cual abarque del 70% al 80% el estrato de residuos confinados. Dicho pozo se deberá rellenar con un filtro a base de material pétreo basáltico con una granulometría de 2" de diámetro sin finos. En el interior y al centro del pozo se colocará un tubo de PVC cédula 40 u 80 o HDPE de 4" de diámetro hasta llegar a 1.00 m antes de la profundidad total del mismo. Alrededor del tubo se debe realizar ranuras de 0.10 m de largo por 0.005 m de ancho en forma de trébol a cada 0.05 m. Las perforaciones del tubo deben abarcar al menos el 75% de la longitud del tubo que tenga contacto con la capa de residuos confinados, así mismo, se deberá colocar una tapa ciega en el fondo o base

A una altura de 0.60 m por encima del estrato de residuos confinados, se deberá colocar una conexión tipo Tee de 6" a 8" (dependiendo la selección de diámetro del tubo en proyecto) con reducción a 4". En la sección de la Tee, se dará continuidad a la tubería vertical de 8" a 6", que ya no deberá ser perforada, y deberá llegar al nivel 0+ 0.50 m. En la sección de 4" de la Tee, se deberá colocar un codo de 90° y un tubo de 4" que llegue al nivel 0+ 0.15 m. De igual modo, será necesario construir un registro de ladrillo como protección del pozo de 0.25 x 1.20 x 1.00 m con una cubierta de placa de concreto pobre o armado de 0.10 m de espesor; también es posible solamente construir la placa de concreto de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor.

Para el caso del tubo de 4" para extracción de biogás, se colocará encima de la placa de concreto una reducción a 2" y se sustituirá el tubo de PVC o HDPE por uno de acero galvanizado de 2" de diámetro y 1.50 m de altura efectiva, elemento al que se le denominará cabezal, y cuya función será la destrucción térmica del biogás. En la base del cabezal deberá colocarse una válvula de control de flujo y un puerto de muestreo; se recomienda utilizar una válvula de espiga para medir la presión de vacío, el flujo, y la composición del biogás. En la punta del tubo, será necesario colocar un capuchón conocido como gorro chino o sombrero para ducto galvanizado, o, de igual manera, se podrá colocar un arrestador de flama.

Para el tubo de extracción de lixiviado, que corresponde al tubo de 8", se recomienda llegar al nivel 0+ 0.50 m, donde se le deberá colocar una tapa roscada o atornillable que será removida cuando se vaya a hacer el monitoreo del tirante o la extracción del lixiviado. Es importante que el tirante de lixiviado a retener en el pozo sea del 30% al 40% de la profundidad del tubo de extracción de lixiviado que este en contacto con el estrato de residuos. Una vez

alcanzados los tirantes recomendados, se puede proceder con la extracción del lixiviado haciendo uso de una bomba sumergible antichispa de acero inoxidable de 4" a 6" con una potencia mínima de 0.5 HP (Caballos de Fuerza). De tal manera, el lixiviado podrá ser cargado a un carro tanque (pipa), para después ser conducido a un pozo de recirculación en un nivel superior, o dispuesto en una laguna de evaporación; lo anterior dependerá del sistema de control, tratamiento y monitoreo del lixiviado establecido en el proyecto de cierre y clausura del sitio.

Como parte del sistema de sellado del pozo, se colocará una mezcla de bentonita con material limo-arcilloso (tepetate) alrededor del tubo, entre el estrato de residuos sólidos confinados y la capa sello. La mezcla de bentonita con material limo-arcilloso se realizará en una proporción de al menos 20% y 80% respectivamente. Una vez homogenizados los materiales, será necesario aplicar una humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM para posteriormente verterlo alrededor del tubo y proceder a su compactación con pisón de mano o mecánico.

En la superficie del pozo, en el nivel 0.00 m, se deberá construir un sistema de protección, el cual podrá ser mediante la construcción de una placa de concreto con dimensiones de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. Previo al colado de la placa, se debe considerar la colocación de un tubo de un diámetro mayor al tubo del pozo, para que al momento del colado de la losa y en todo momento este tubo quede adherido a la placa de concreto, y así permitir el libre deslizamiento de los tubos que forman parte del sistema del pozo. Este sistema ayudará a que la placa de concreto se comporte conforme se presenten los asentamientos diferenciales y evitar una flotación o ruptura.

Es importante que el monitoreo de los niveles de lixiviado se realice con una periodicidad establecida de al menos tres veces por semana (misma que puede disminuir o incrementar dependiendo del volumen presentado). Este monitoreo se debe realizar de manera manual por el encargado de operación y mantenimiento (O&M) con un medidor de agua de cinta plana que ayude a saber el nivel del tirante del pozo. Por cuestiones de practicidad y con el propósito de cumplir con el objetivo de este manual del cierre y clausura de vertederos, lo antes descrito es sugerido por sus bondades económicas.

En otro sentido y si se tienen los recursos se puede instalar un sistema electrónicamente automatizado mediante un flotador de nivel para cisternas que dé a conocer el nivel del tirante máximo alcanzado por el lixiviado. Así, cuando sea necesario vaciar el pozo, el medidor activará el microswitch interno previo aviso. Otra alternativa con un mayor equipamiento tecnológico y, por

tanto, un mayor costo, es la instalación de un sistema de control de bombeo que haga una interfaz con un software y una aplicación (APP) en donde se posible tener el control de las bombas de manera remota. Es importante señalar que para esta última opción se debe tener una bomba en cada pozo mixto.

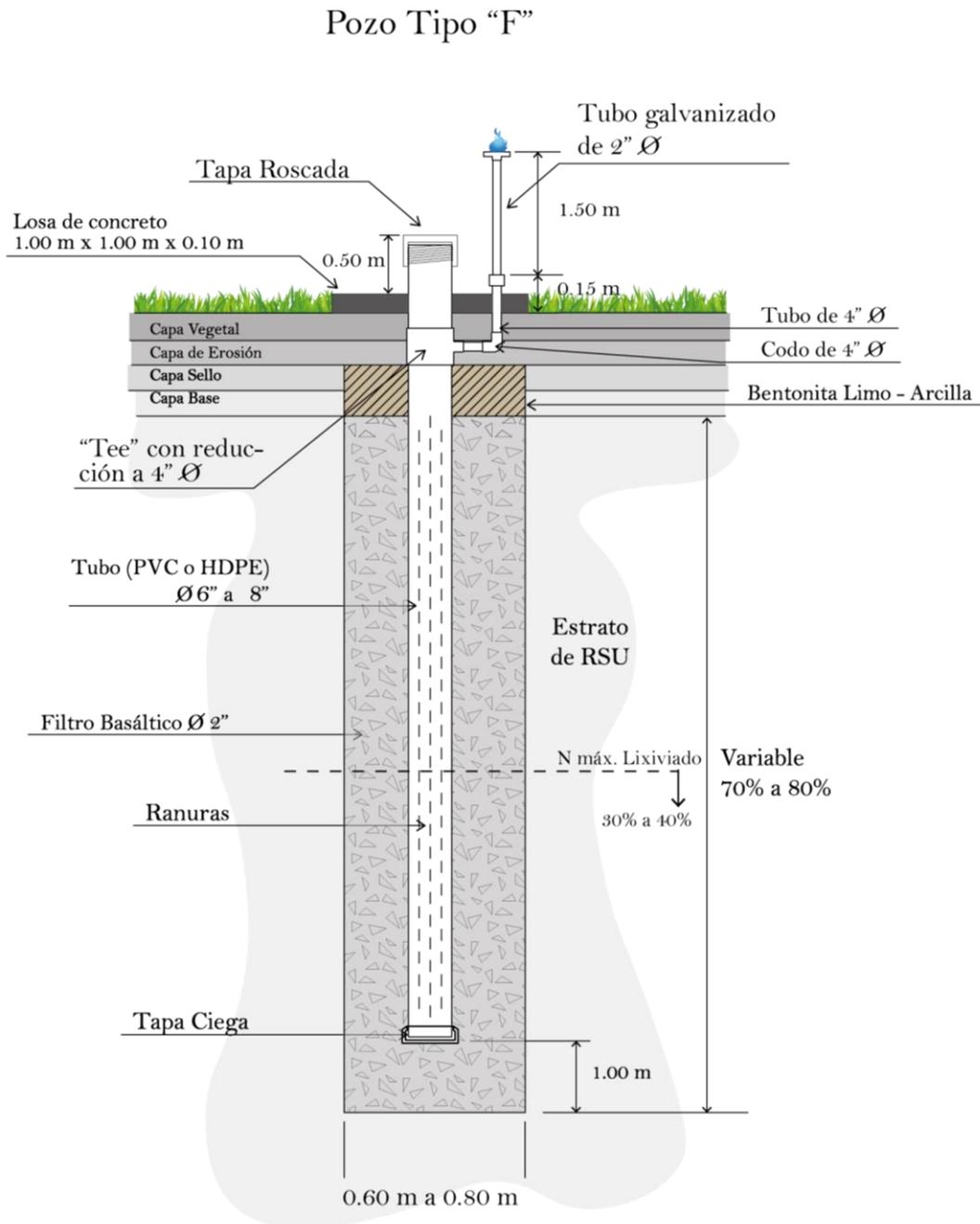


Figura 95. Diagrama de pozo mixto para extracción de lixiviado y destrucción térmica pasiva de biogás (Pozo tipo F del sistema de control y monitoreo de biogás)

Fuente: elaboración propia

15.2. DRENES PERIMETRALES

Este sistema se basa en la construcción de una red perimetral de drenes construidos a pie de talud, captando, direccionando y dando conducción a la acumulación de lixiviados hacia los puntos más bajos donde se deberán colocar sistemas de captación, almacenamiento y extracción.

Para el sistema de drenes se debe realizar una selección de drenes que podrán ser trapezoidales abiertos o superficiales y subterráneos.

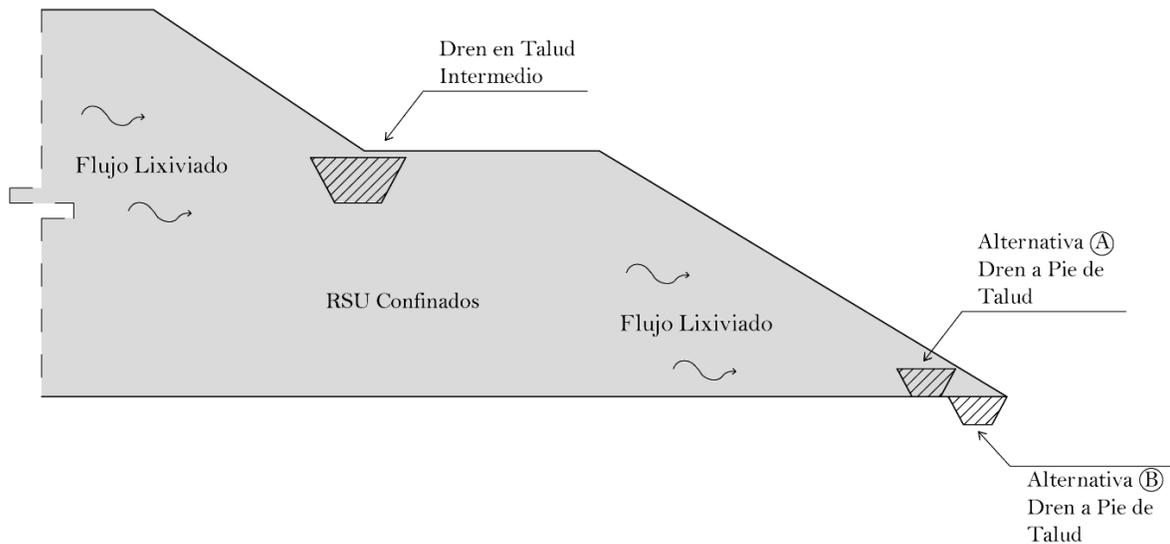


Figura 96. Diagrama de alternativas de drenes trapezoidales a pie de talud para captación de lixiviado

Fuente: elaboración propia

15.2.1. DRENES PERIMETRALES TRAPEZOIDALES

Antes de iniciar la excavación de los drenes, se debe identificar aquellos puntos bajos donde se construirán los cárcamos de bombeo, cuya función principal es la de captar y almacenar los lixiviados, además de ser los puntos de donde se extraerán dichos fluidos.

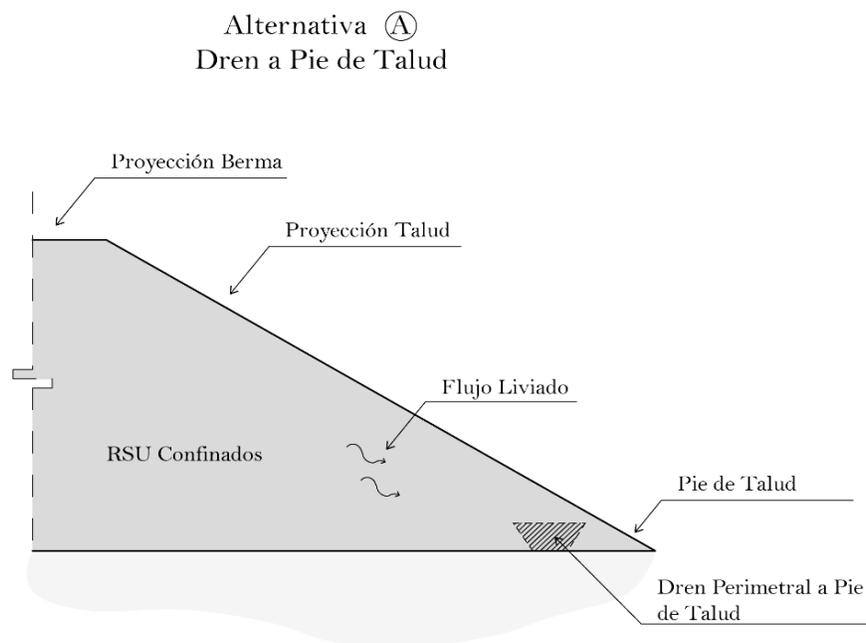


Figura 97. Diagrama de alternativa A de dren perimetral para la captación de lixiviado a pie de talud

Fuente: elaboración propia

Alternativa ②
Dren a Pie de Talud

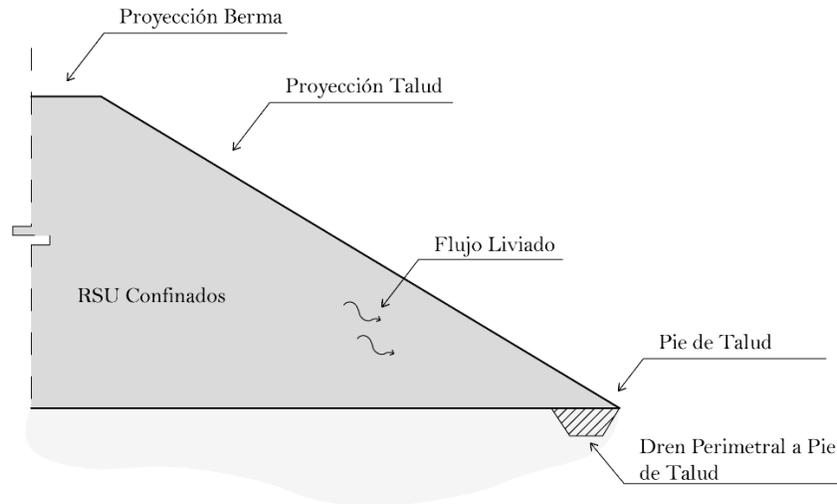


Figura 98. Diagrama de alternativa B de dren perimetral para la captación de lixiviado a pie de talud

Fuente: elaboración propia

La construcción de los drenes trapezoidales se realiza después de confinar los residuos y antes de iniciar la colocación del sistema de sellado.

Una vez construidos los drenes, puede realizarse la colocación del sistema de sellado de acuerdo con el proyecto.

La configuración de estos drenes se puede realizar con recubrimiento de geomembrana o mediante un tubo de captación como se describe en las secciones siguientes.

15.2.2. DRENES TRAPEZOIDALES CON GEOMEMBRANA

Como primer paso se realiza una excavación de la sección trapezoidal de las dimensiones que señale el proyecto. Esta sección deberá ir justo al pie del talud. En los drenes de taludes intermedios, la sección del trapecio que dé hacia la berma se deberá recubrir con geomembrana de Polietileno de Alta Densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) de un espesor mínimo de 1mm o 40 milésimas de pulgada; lo mismo para los que se construyan al pie de talud. Esto quiere decir que se colocará una “L” la cual cubrirá la base y el talud de la sección trapezoidal opuesto al talud del relleno, esta geomembrana servirá como barrera impermeable y para la conducción del flujo del lixiviado. Posteriormente, se colocará material pétreo de 2” a 8” de diámetro sin finos envuelto en geotextil de mínimo 100 g/m² sobre la geomembrana para que funja como una estructura drenante. Este sistema de material drenante servirá para evitar un colapso o que se llegue a tapar del dren en un corto plazo.

Alternativa **A**
Detalle Dren a Pie de Talud con Geomembrana

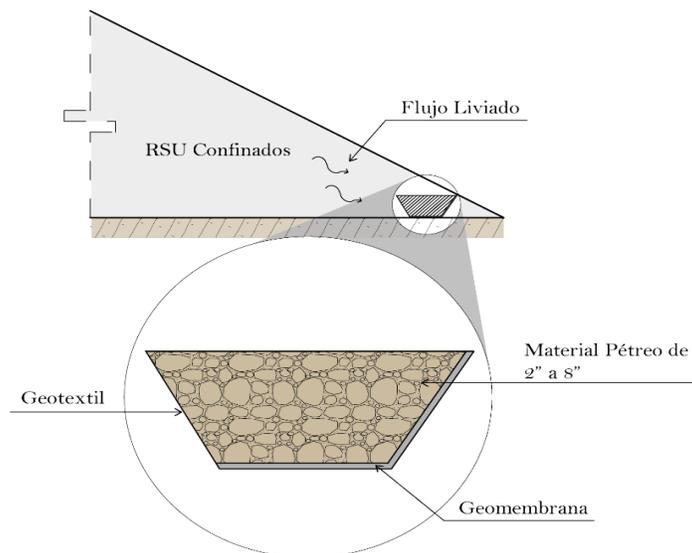


Figura 99. Diagrama de alternativa A de dren perimetral recubierto con geomembrana para la captación de lixiviado a pie de talud

Fuente: elaboración propia

Alternativa ②
 Detalle Dren a Pie de Talud con Geomembrana

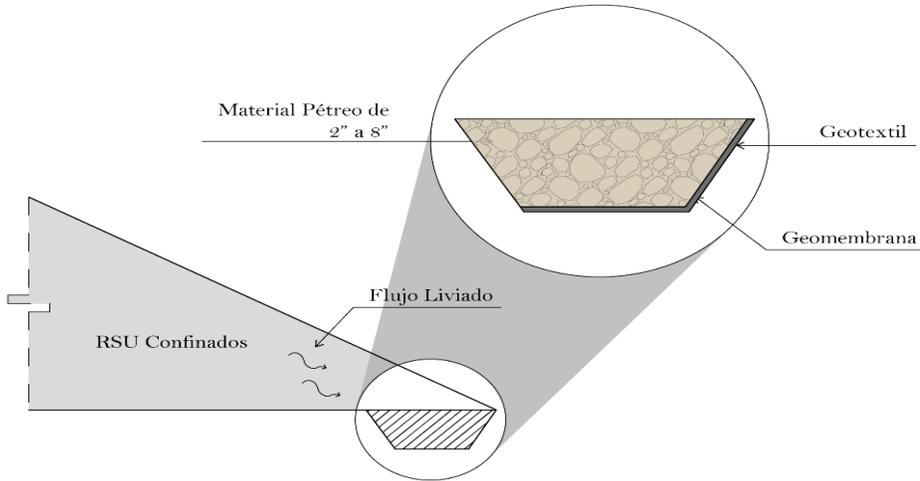


Figura 100. Diagrama de alternativa B de dren perimetral recubierto con geomembrana para la captación de lixiviado a pie de talud

Fuente: elaboración propia

Dren con Geomembrana en Talud Intermedio

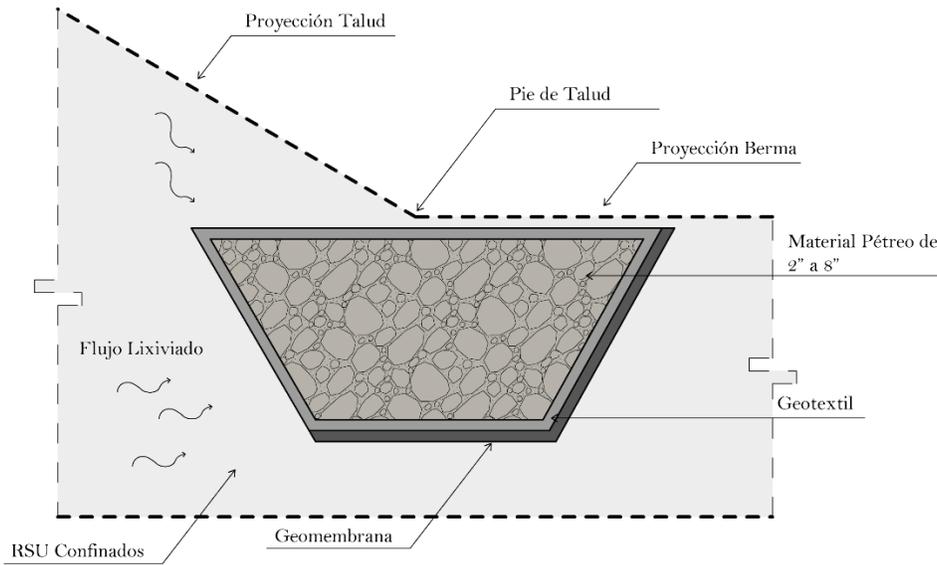


Figura 101. Diagrama de alternativa de dren perimetral en talud intermedio recubierto con geomembrana para la captación de lixiviado a pie de talud

Fuente: elaboración propia

15.2.3. DRENES TRAPEZOIDALES CON TUBO

Una vez definidos los puntos bajos del terreno para la colocación de los cárcamos, se inicia la excavación de las secciones de canal tipo trapezoidal de las dimensiones que señale el proyecto, esta sección se deberá construir a pie del talud, tanto en talud base como en taludes intermedios.

En los drenes de taludes intermedios, la sección del trapecio que dé hacia la berma deberá ser recubierta con geomembrana de Polietileno de Alta Densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) de un espesor mínimo de 1mm o 40 milésimas de pulgada, lo mismo para los que se construyan al pie de talud. Lo anterior quiere decir que se colocará una “L” que cubra la base y el talud opuesto de la sección trapezoidal al talud del relleno. Sobre esta geomembrana se colocará un geotextil de mínimo 100 g/m^2 que logre envolver la zanja, el tubo y el material pétreo a ser montado. Al fondo de la zanja, se colocará una cama de mínimo 0.20 m de material pétreo de 2”; con dicho material se conseguirá dar pendiente al tubo para que conduzca los lixiviados al cárcamo. Una vez colocada la cama, se instalará el tubo que ha de captar lixiviado, el aditamento podrá ser de PVC cédula 40 u 80, o un tubo de HDPE cuyo diámetro puede oscilar de 4” a 10”. Dicho tubo deberá ser ranurado alrededor de la mitad horizontal con perforaciones en forma de trébol con 1” de diámetro a cada 0.10 m; la mitad que quede sin perforar deberá quedar asentada en la cama de material pétreo. Este acomodo de perforación es conocido como media caña, ya que la parte que no fue perforada conducirá el lixiviado captado hacia al cárcamo. Una vez colocado el tubo, se colocará material pétreo de 2” a 8” de diámetro sin finos. Posteriormente, se cerrará el geotextil para que funcione como una estructura drenante. Este sistema de material drenante servirá para evitar un colapso o que se llegue a tapan el dren en un corto plazo.

Alternativa (A)
Detalle Dren a Pie de Talud con Tubo

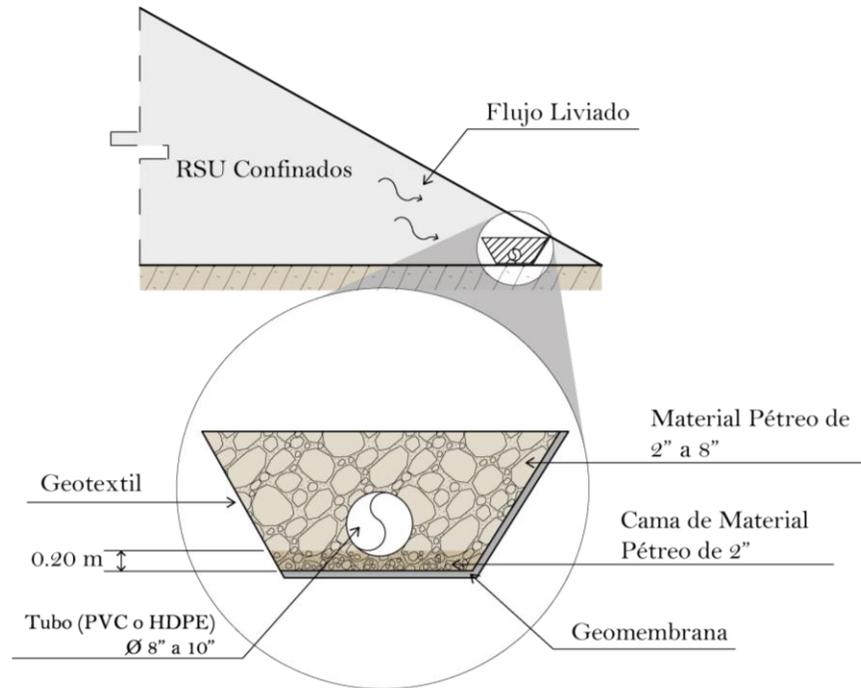


Figura 102. Diagrama de alternativa A de dren perimetral con tubo central y cubierta de geomembrana para la captación de lixiviado a pie de talud
Fuente: elaboración propia

Alternativa B
Detalle Dren a Pie de Talud con Tubo

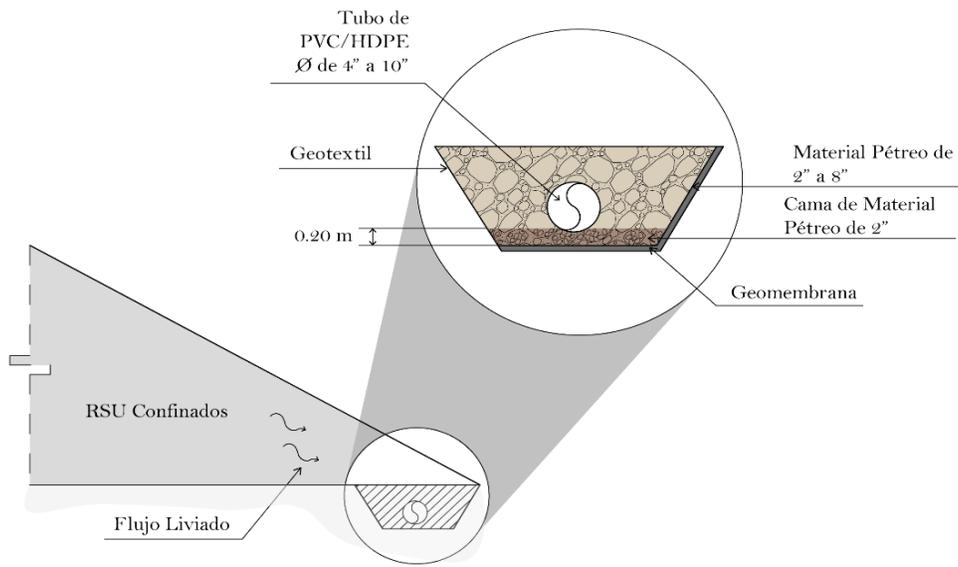


Figura 103. Diagrama de alternativa B de dren perimetral con tubo central y cubierta de geomembrana para la captación de lixiviado a pie de talud
Fuente: elaboración propia

Dren con Tubo en Talud Intermedio

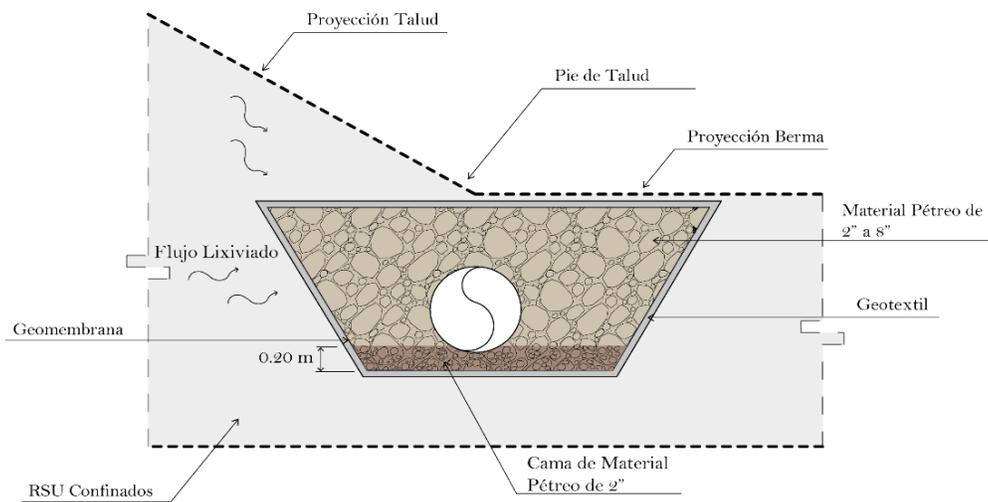


Figura 104. Diagrama de alternativa de dren perimetral en talud intermedio con tubo central y cubierta de geomembrana para la captación de lixiviado a pie de talud
Fuente: elaboración propia

DETALLE DE RANURA DE TUBO
Para Drenes Trapezoidales de Lixiviado

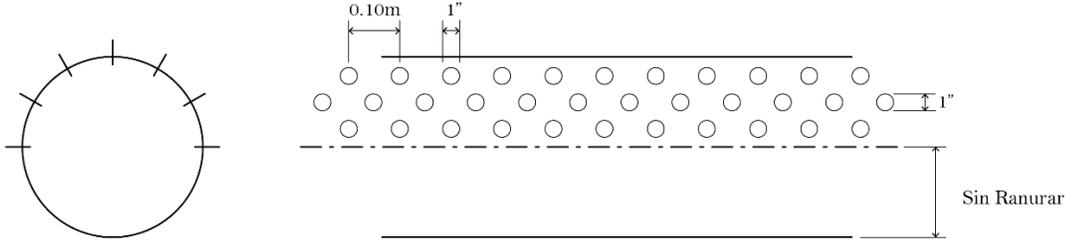


Figura 105. Diagrama de detalle de ranurado de tubo (media caña) para drenes trapezoidales de captación de lixiviado

Fuente: elaboración propia

15.2.4. DRENES HORIZONTALES DE PENETRACIÓN

Los drenes horizontales se realizan en zonas donde haya afloramiento de lixiviado en taludes o indicios del mismo. Estos drenes funcionan de forma similar a las anclas que se colocan en los cortes de terraplén para dar estabilidad al talud y evitar así un desgajamiento, que, para el caso de los residuos, se evitaría un deslizamiento del talud y se captaría la humedad en forma de lixiviado desde la parte interna.

Por lo regular, estos casos de saturación de lixiviado en taludes no sucede en SNC; es más común encontrarlo en rellenos sanitarios o sitios controlados que realizaron recirculación de lixiviado, y se han saturado los poros a consecuencia de arrastre de finos y de la consolidación natural de los residuos, o también, puede suceder que, por una falta de compactación, exista un exceso de filtración de agua de lluvia y que esto genere licuefacción de material de cobertura y escurrimientos en los taludes.

Para la colocación de los drenes horizontales de penetración, se debe realizar, conjuntamente, la construcción de un dren perimetral al pie del talud, ya que el flujo generado de lixiviados que captan los drenes horizontales ubicados en los taludes del sitio de disposición final se aprovechará íntegramente, conectando cada uno de los drenes horizontales de penetración a los drenes perimetrales, formando así una red que encauzará el lixiviado hacia los tanques de almacenamiento o cárcamos.

El dren horizontal de penetración será formado por un tubo de PVC cédula 40 u 80, o un tubo de HDPE que podrá ir de 2" de diámetro con perforaciones de 1/4" (0.0063 mm) de diámetro a cada 0.10 m en forma de trébol, únicamente en la parte media superior del tubo (lomo del tubo), mismo que se introduciría a la altura del talud donde se detecte mayor escurrimiento de lixiviado. Este tubo se introducirá en el talud a una distancia de 5 m a 15 m (evitando la catenaria del tubo). Antes de introducir el tubo, se deberá hacer la perforación con un tipo *track drill*, para hacer la perforación horizontal a la distancia establecida en proyecto.

Una vez colocado el tubo horizontal, se deberán hacer el arreglo para la conexión del tubo que conducirá el lixiviado hacia el dren perimetral. Este tubo deberá ser de 2 1/2" de diámetro y no debe tener perforaciones. Para garantizar que el lixiviado caiga en el dren, se colocará un codo de 90°, y una sección de tubo que quede dentro del filtro del material pétreo tipo tezontle. Este tubo quedará encofrado entre los residuos del talud por una protección de material

pétreo basáltico con una granulometría de 2" de diámetro, sin finos en una zanja de 0.20 m de profundidad quedando una cama de 0.05 m y una cobertura de 0.09 m.

Una vez colocado este sistema se podrá colocar el sistema de sellado.

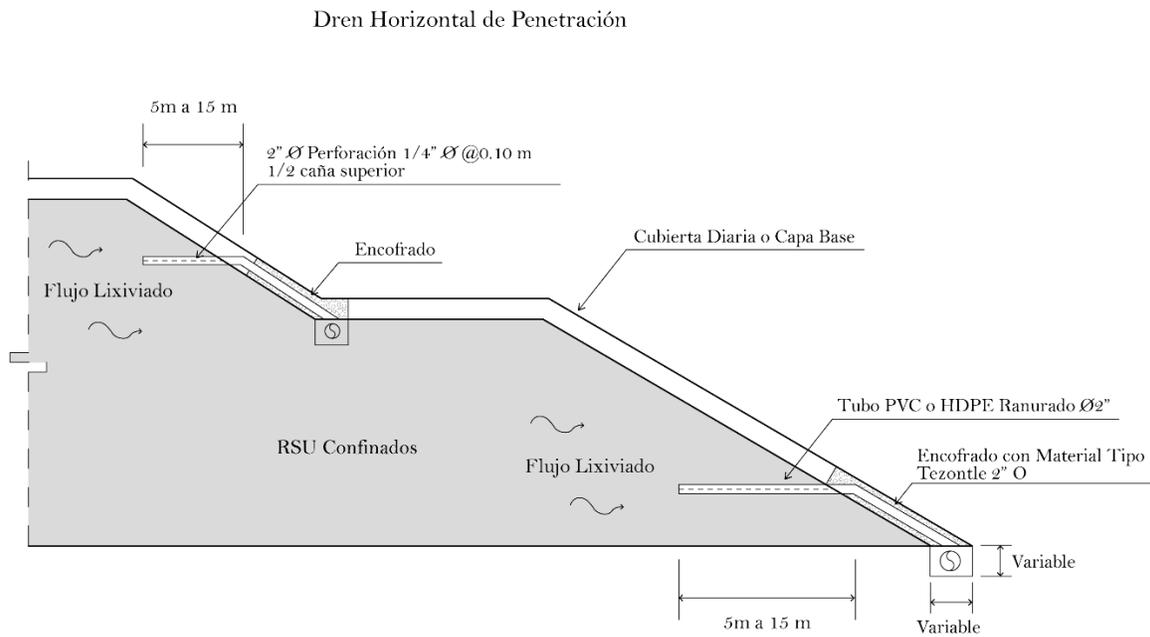


Figura 106. Diagrama de drenes horizontales de penetración en talud para captación de lixiviado

Fuente: elaboración propia

15.3. CÁRCAMOS DE CAPTACIÓN

Los cárcamos de lixiviados se podrán construir con un recubrimiento de geored, con una estructura de concreto armado o con un tanque tricapa para almacenamiento de agua de HDPE.

15.3.1. CÁRCAMO SIMPLE CON REFUERZO DE GEORED

El cárcamo con refuerzo de geored se realiza únicamente haciendo la excavación de un cubo, mismo que se recubrirá con la geored que permitirá la entrada de lixiviados que lleguen a escurrir además del captado por los sistemas de captación de lixiviado. Después de instalada la geored, se colocará un geotextil, tanto en la base como en paredes, para contener el relleno de material pétreo tipo tezontle con una granulometría de 4" a 8". Al terminar de rellenar la altura del cárcamo, se colocará una cubierta de geotextil. El geotextil deberá de ser de 100 g/m² como mínimo. Al centro del cárcamo se colocará un tubo de PVC cédula 40 u 80 o un tubo de HDPE de 8" a 12" el cual deberá llegar a una profundidad de 75% (3/4) de la profundidad del cárcamo y solo el 50% (1/2) de la longitud de este tubo que quede dentro del cárcamo deberá ser perforado con ranuras de 0.10 m de largo por 0.005 m de ancho en forma de trébol alrededor del tubo a cada 0.05 m. Por este tubo se introducirá la bomba para la extracción del lixiviado ya sea para su tratamiento o su recirculación, para detalles de la extracción ver el apartado "*Drenado de Cárcamos de Lixiviado*".

Por encima de este cárcamo se podrán colocar residuos para alcanzar los niveles para la colocación de las capas que conformará el sistema de sellado, o se podrá omitir la colocación de residuos y proceder a la colocación las capas del sistema de sellado.

Cárcamo con Refuerzo de Geored

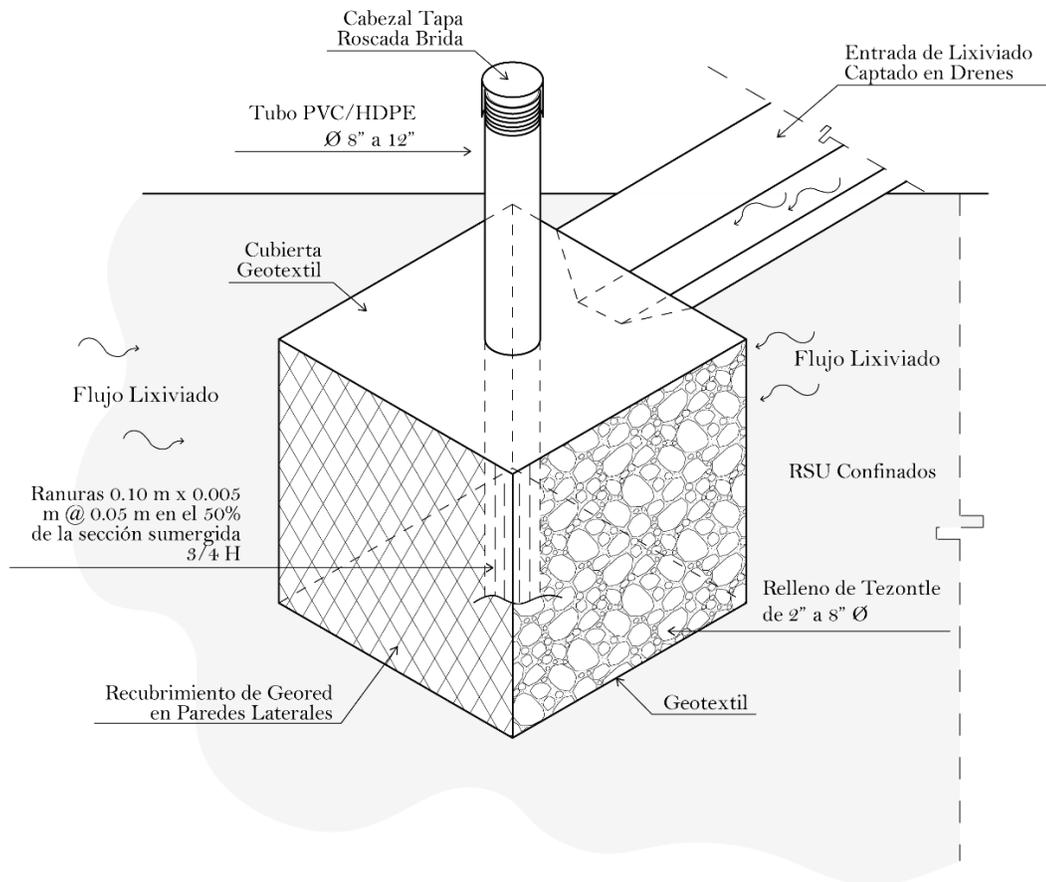


Figura 107. Diagrama de cárcamo simple con refuerzo de geored, filtro de tezontle y cubierta de geotextil para la captación de lixiviado

Fuente: elaboración propia

15.3.2. CÁRCAMO DE CONCRETO ARMADO

Este cárcamo con una estructura de concreto se realiza haciendo la excavación de un cubo en el que se podrá hacer el tendido y armado del acero que ha de ser recubierto con concreto de $f'c$ de 200 kg/cm^2 a 250 kg/cm^2 . Al cárcamo se le colocará una tapa o losa de concreto armado y un tubo de PVC cédula 40 u 80 o un tubo de HDPE de 8" a 12". Se recomienda que este tubo se coloque al centro del cárcamo. Dicho tubo deberá llegar a una profundidad de 75% (3/4) de la profundidad del cárcamo y sólo el 50% (1/2) de la longitud del tubo que haya quedado dentro del cárcamo deberá ser perforado con ranuras de 0.10 m de largo por 0.005 m de ancho en forma de trébol alrededor del tubo a cada 0.05 m. Por medio de este tubo se introducirá la bomba para la

extracción del lixiviado, ya sea para su tratamiento o su recirculación, Para detalles de la extracción ir al apartado “*Drenado de Cárcamos de Lixiviado*”.

Como alternativa, se pueden realizar las perforaciones al cuerpo de la estructura de concreto por donde el lixiviado sea filtrado, además del que será depositado por los sistemas de captación de lixiviado.

Otra alternativa es la colocación de un cárcamo prefabricado.

Por encima de este cárcamo se podrán colocar residuos que permitan alcanzar los niveles de colocación de las capas que conformarán el sistema de sellado, o se podrá omitir la colocación de residuos y proceder a la de las capas del sistema de sellado.

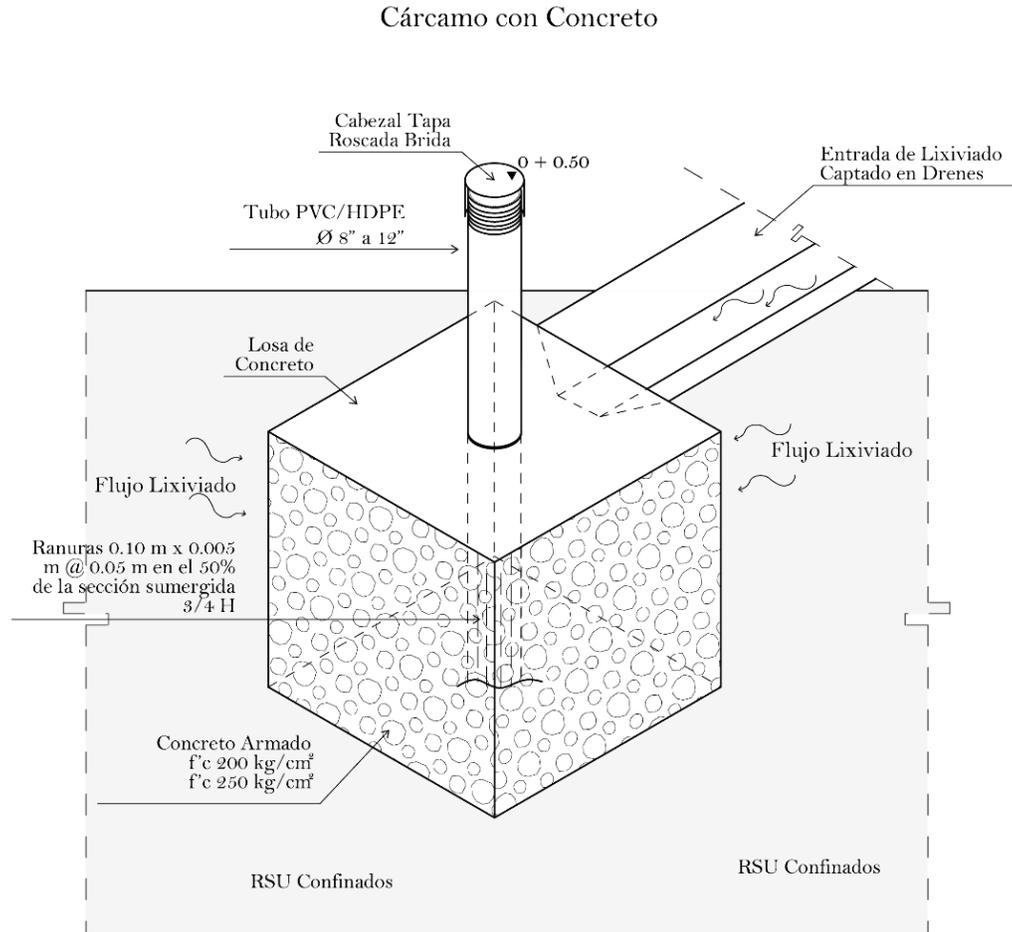


Figura 108. Diagrama de cárcamo de concreto armado para la captación de lixiviado

Fuente: elaboración propia

15.3.3. CÁRCAMO CON TANQUE TRICAPA (TINACO)

Para este sistema es necesario llevar a cabo la excavación que permita introducir un tanque tricapa de la misma capacidad que se haya determinado en el proyecto con base en los afloramientos o en los cálculos de generación de existencia de lixiviado. Dependiendo del tamaño y capacidad del tanque, será el tamaño de la excavación. Este tanque se perforará en sus paredes laterales para recibir lixiviado que llegue a escurrir, aparte del que será depositado por los sistemas de captación de lixiviado. Las perforaciones podrán ir de los 0.05 m a 0.10 m de diámetro en forma de trébol alrededor del tanque a cada 0.20 m.

Para dar una protección perimetral al tanque se le protegerá con una capa de un espesor de 0.30 m de material pétreo tipo tezontle de 2" a 8" de diámetro, mismo que será retenido por malla electrosoldada 66-1010. Es importante llevar el material pétreo hasta la altura de 0.10 m por encima de la tapa, de manera que pueda brindar protección superior al tanque.

Para el vaciado del cárcamo, se colocará al centro del mismo un tubo por la tapa del tanque. Dicho tubo deberá llegar a una profundidad de 75% (3/4) de la profundidad del cárcamo y sólo el 50% (1/2) de la longitud del tubo que haya quedado dentro del cárcamo deberá ser perforado con ranuras de 0.10 m de largo por 0.005 m de ancho en forma de trébol por todo el rededor a cada 0.05 m. El tubo podrá ser de PVC cédula 40 u 80 de HDPE de 8" a 12". Por el tubo mencionado se introducirá la bomba para la extracción del lixiviado, ya sea para su tratamiento o su recirculación. Para detalles de la extracción ver el apartado "*Drenado de Cárcamos de Lixiviado*".

Por encima de este cárcamo se podrán colocar residuos para alcanzar los niveles para la colocación de las capas que conformarán el sistema de sellado, o se podrá omitir la colocación de residuos y proceder a la colocación de las capas del sistema de sellado.

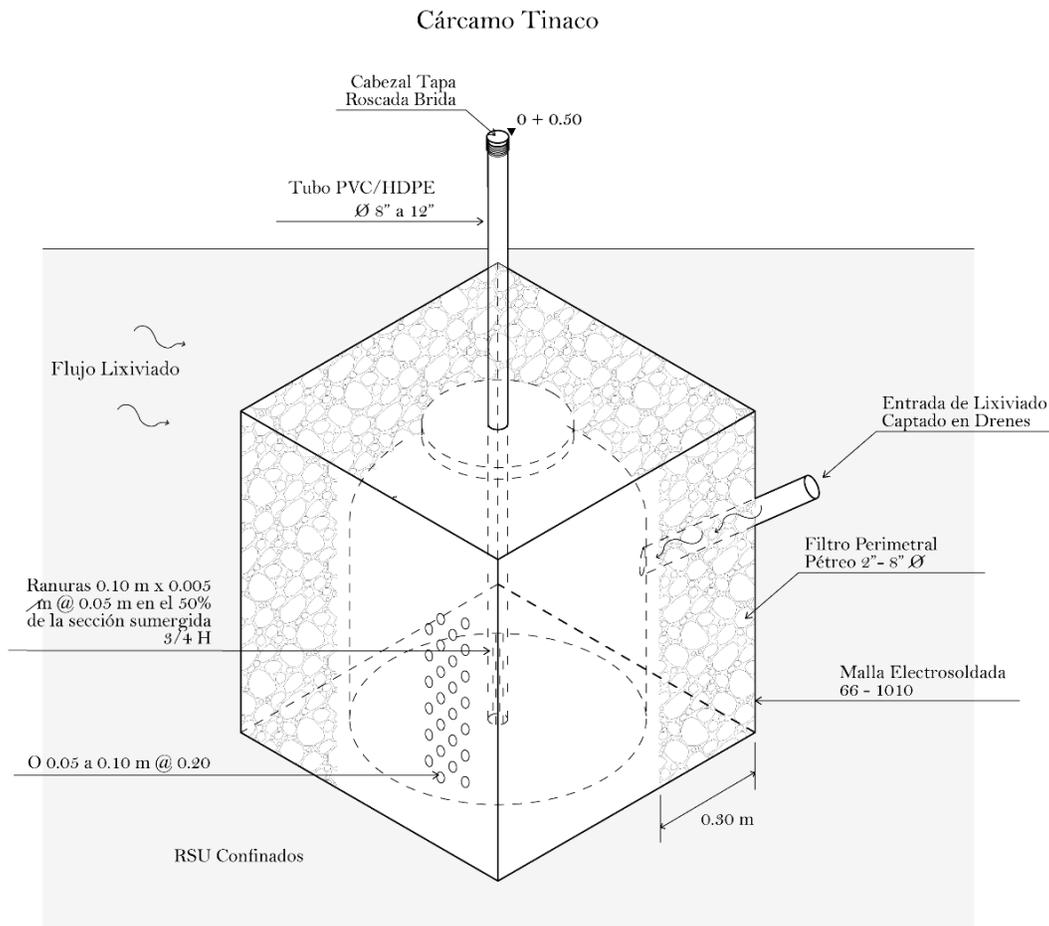


Figura 109. Diagrama de cárcamo con tanque tricapa (tinaco) para la captación de lixiviado

Fuente: elaboración propia

15.3.4. DRENADO DE CÁRCAMOS DE LIXIVIADO

El drenado de los cárcamos se deberá realizar por medio del tubo que se colocó para la extracción de lixiviado, mismo que deberá llegar al nivel 0+ 0.50 m, considerando el nivel 0+0.00 m la superficie de la cubierta vegetal. De igual modo, en el nivel 0+0.00 m, se deberá construir una placa de concreto pobre o armado de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. En el cabezal del tubo se colocará una tapa roscada o atornillable que después será removida cuando sea momento de realizar el monitoreo del tirante o la extracción del lixiviado. Es importante que el tirante de lixiviado a retener en el pozo sea del 60% al 70% del volumen del cárcamo. Una vez alcanzados los tirantes recomendados, se deberá realizar la extracción del lixiviado con una bomba sumergible antichispa de acero inoxidable de 4" a 8" con una potencia mínima de 0.5 HP (Caballos de fuerza). El lixiviado podrá ser cargado a un carro tanque (pipa),

conducido a un pozo de recirculación en un nivel superior o dispuesto en una laguna de evaporación, esto dependerá del sistema de control, tratamiento y monitoreo del lixiviado establecido en el proyecto de cierre y clausura del sitio.

Es importante que el monitoreo de los niveles de lixiviado se realice con una periodicidad establecida de al menos tres veces por semana (periodicidad que podrá disminuir o incrementar dependiendo del volumen presentado). Este monitoreo se debe realizar de manera manual por el encargado de operación y mantenimiento (O&M) con un medidor de agua de cinta plana que ayude a saber el nivel del tirante del pozo. Por cuestiones de practicidad y con el propósito de cumplir con el objetivo de este manual del cierre y clausura de vertederos, lo antes descrito es lo sugerido por tratarse de la opción más económica.

En otro sentido, y si se tienen los recursos, se puede instalar un sistema electrónico automatizado mediante un flotador de nivel para cisternas que ayude a conocer el nivel del tirante máximo alcanzado por el lixiviado. Cuando sea necesario, el medidor activará el microswitch interno que dé aviso sobre la necesidad de vaciado del pozo. Otra alternativa con un mayor equipamiento tecnológico, y, por tanto, un mayor costo, es la instalación de un sistema de control de bombeo que haga una interfaz con un software y una aplicación (APP) en donde sea posible tener el control de las bombas de manera remota. Es importante señalar que para esta última opción se debe tener una bomba en cada pozo mixto.

16. TRATAMIENTOS RECOMENDADOS PARA LIXIVIADOS

16.1. LAGUNAS

El sistema de lagunas es una estructura que se construye dentro del predio del sitio a través de excavaciones, aprovechando la diferencia de alturas o construyendo terraplenes que ayuden a la formación de una estructura que retenga el lixiviado.

Las dimensiones de estas estructuras pueden ser diversas dependiendo del espacio disponible y la cantidad de lixiviado que se quiera tratar.

Las lagunas, para el caso del tratamiento de lixiviado en SNC, se recomiendan de un tirante mínimo de 0.30 m y un máximo de 0.50 m, esto con el objetivo de dar un tratamiento rápido a los lixiviados. Para los sitios controlados y rellenos sanitarios, es recomendable un tirante máximo de 0.70 m, ya que, en

estos sitios, al tener un sistema impermeable que permite la retención del lixiviado en la base, se puede disponer de mayor volumen de lixiviado en las lagunas.

La estructura de la laguna se basa en un polígono que conformado por bordos o terraplenes de material térreo compactado a los cuales se recomienda dar una pendiente de talud 2:1 (horizontal-vertical). La altura del terraplén y el ancho de la corona dependerá del tirante seleccionado, los cuales deberán tener un bordo libre de al menos 0.5 m.

Una vez terminada la estructura de la laguna, este se deberá impermeabilizar, con una geomembrana de Polietileno de Alta Densidad (HDPE), por sus siglas en inglés) de un espesor mínimo de 1mm o 40 milésimas de pulgada como mínimo; esta geomembrana se deberá colocar en la base de fondo, taludes y corona, su anclaje se realizará en la parte exterior de los taludes.

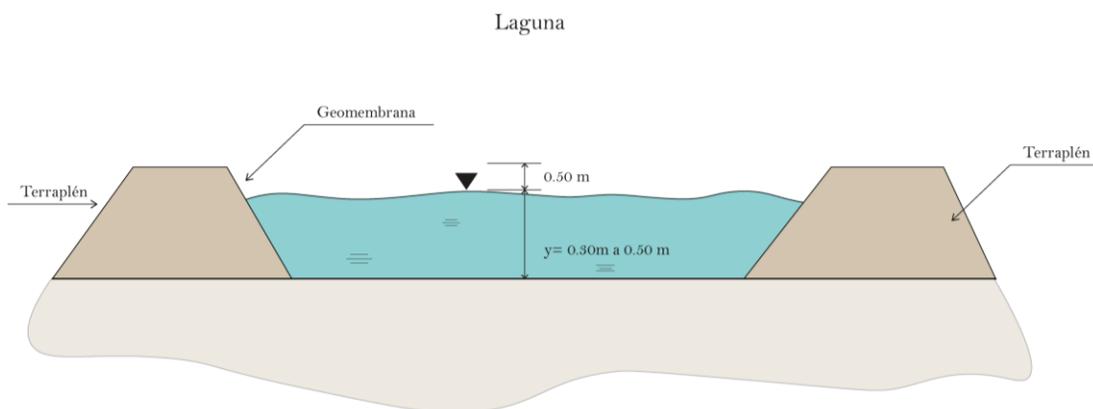


Figura 110. Diagrama de estructura de laguna para almacenamiento y tratamiento de lixiviado

Fuente: elaboración propia

El vertido del lixiviado se puede hacer conectando los drenes a la laguna, bombeando de los cárcamos a la laguna o través de carros tanques (pipas) que acarren el lixiviado fuera del cuerpo de agua.

Es importante tomar en cuenta que dicho sistema de tratamiento no es recomendable para zonas con una precipitación extrema, ya que, además de ayudar a reducir el volumen de lixiviado tratado en la laguna, la laguna almacenará agua pluvial. Sin embargo, para zonas con altas temperaturas podría representar un sistema idóneo para el tratamiento de tales fluidos.

Este manual propone tres alternativas para el funcionamiento de la laguna:

- Lagunas aireadas
- Lagunas facultativas
- Lagunas de evaporación

Estos sistemas de lagunas pueden ser aprovechados a su máxima capacidad en época de estiaje, ya que en temporada de lluvia pueden llegar a saturarse de agua pluvial y detener, con esto, el proceso de tratamiento de lixiviado. Una opción para evitar esto es cubrirlas con material impermeable durante la época de lluvias. Tal acción exceptúa a las lagunas facultativas. Otra alternativa es detener los procesos de tratamiento de laguna en época de lluvias y captar el agua pluvial para emplearla para riego en época de estiaje.

16.1.1. LAGUNAS AIREADAS

Una vez con la estructura construida e impermeabilizada, se debe colocar el sistema de aireación, ya sea en la base de fondo o en la superficie. Para mayor precisión ver el apartado "*Aireadores*".

La laguna puede constar o dividirse en dos celdas separadas con sus respectivos métodos de entrada del efluente a tratar. Al ser divididas, permiten trabajos de servicio y mantenimiento en cualquiera de las dos celdas, sin interrumpir la operación de la otra.

Si se decide cubrir la laguna en temporada de lluvia, es importante no detener el flujo de aire y tratar de descubrir la laguna en los días donde no haya precipitación.

Laguna con Aireadores

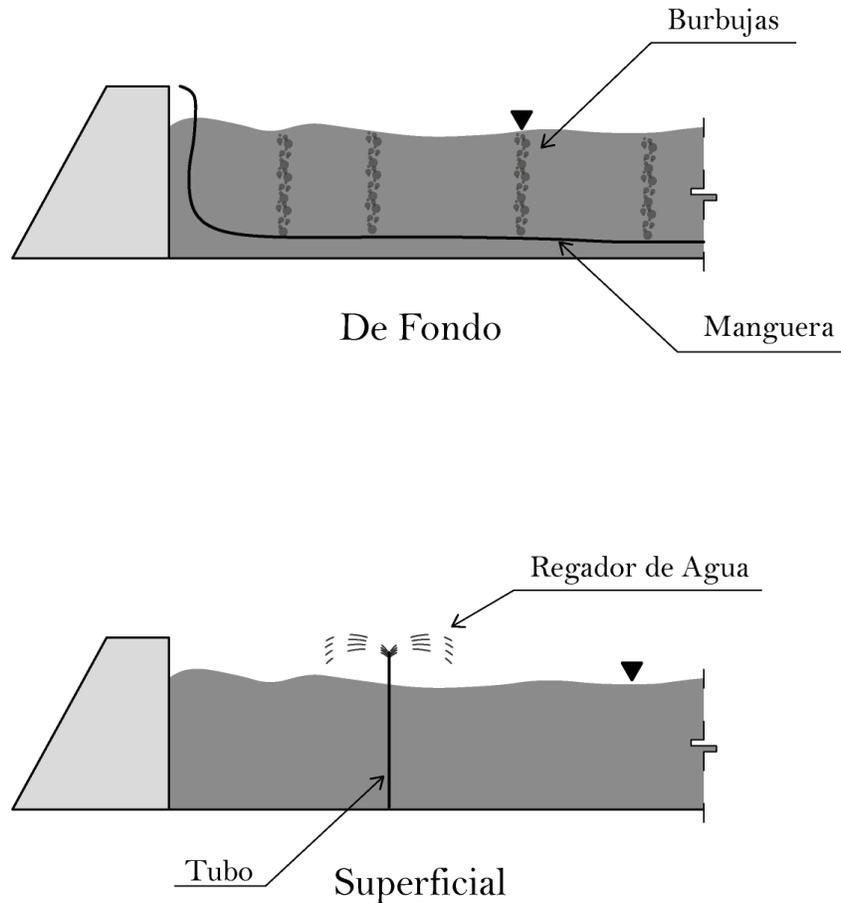


Figura 111. Diagrama de lagunas de evaporación con aireadores
Fuente: elaboración propia

16.1.2. LAGUNA FACULTATIVA

Teniendo la estructura de la laguna construida e impermeabilizada, se debe colocar el sistema de aireación para que proporcione oxígeno a los microorganismos que darán tratamiento al lixiviado. Este sistema de aireación puede ser superficial o sumergible. Para mayor precisión ver el apartado “Aireadores”.

La Laguna puede dividirse en dos celdas separadas con sus respectivos métodos de entrada del efluente a tratar. Al ser divididas, permiten trabajos de servicio y mantenimiento en cualquiera de las dos celdas sin interrumpir la

operación de la otra. Además, esto ayudaría a no interrumpir los procesos de estabilización y adaptación de los microorganismos, dado que se podría inocular el nuevo lixiviado con los microorganismos de la otra celda.

Un factor importante por considerar en las lagunas facultativas es la estabilización de la laguna, la cual consta en adaptar a los microorganismos que tratan el lixiviado, para estas lagunas es recomendable hacer experimentación a nivel laboratorio para seleccionar los microorganismos a usar, es importante tener en cuenta que este tipo de tratamiento es más lento en comparación al de evaporación y aireación.

16.1.3. LAGUNA DE EVAPORACIÓN

Este sistema es ideal para zonas con periodos cortos de lluvia y con temperaturas de medias a altas, ya que este factor es el principal para ayudar a la evaporación del lixiviado.

Este sistema no requiere mayor aditamento que la construcción e impermeabilización de la laguna.

Si se quiere acelerar un poco este tratamiento, es posible colocar un aireador, que, a diferencia de la laguna aireada (que requiere de un constante ciclo de aireación), puede trabajar por intervalos de tiempo con el objetivo de romper la capilaridad del espejo superficial. Este sistema de aireación, del mismo modo, puede ser superficial o sumergible. Para mayor precisión ver el apartado "*Aireadores*".

Si se decide cubrir la laguna en temporada de lluvia es importante tratar de descubrir la laguna en los días donde no haya precipitación.

16.1.4. AIREADORES

i) AIREADORES SUMERGIBLES

Para el sistema de aireación en el fondo es recomendable colocar aireadores sumergibles de fondo, que pueden ser un aireador fijo de fondo o un mezclador fijo de fondo.

Una alternativa es hacerlo con un serpentín de manguera plástica perforada a través de la cual se inyecte el aire. También puede colocarse un aspersor o

rociador de patrón (regador para regar el jardín) en el fondo e inyectar el aire por una manguera a la que esté conectado este aditamento.

ii) AIREADORES SUPERFICIALES

Para colocar los sistemas de aireación en la superficie, es recomendable usar aireadores flotantes, ya sea superficial flotante o fijo, aireadores de paletas, o un mezclador direccional flotante. La selección del aireador dependerá del recurso disponible.

Una alternativa económica es fijar una base metálica o plástica en la superficie, en el aspersor o rociador de patrón (regador), y un motor que recircula el flujo del fondo haciendo que este pase por el rociador, generando una aireación con el propio movimiento del lixiviado y rompiendo su capilaridad.

16.2. SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DEL LIXIVIADO

El objetivo de un sistema de extracción y recirculación del lixiviado es proveer la redistribución de los líquidos dentro de los residuos conformados en un SDF, de forma tal que aumente la producción de biogás y provea un tratamiento con alto contenido orgánico. Para cumplir con estos objetivos se requiere conocer las cantidades y calidades del lixiviado.

La recirculación del lixiviado debe ser usada para distribuir líquidos a secciones del SDF que estén secas, dado que, si se tiene un sitio saturado de lixiviado, no se recomienda ni se requiere una recirculación. Un SDF saturado necesita de un sistema de remoción de lixiviado para extraerlo, tratarlo, y disponer el exceso del mismo.

Una ventaja de la recirculación del lixiviado es que aporta humedad para la degradación anaerobia de los residuos dispuestos, además, puede traer beneficios, como remover la carga orgánica que es donde están presentes los ácidos grasos volátiles.

Una desventaja que tiene la recirculación del lixiviado es el incremento potencial de los asentamientos diferenciales, hecho que conduce a un aumento en los costos de mantenimiento si se trata de un sitio clausurado. Otra desventaja es el incremento potencial de impactos negativos a aguas y suelo si no se tiene una capa que impida la infiltración, si esta capa impermeable no está presente, el potencial impacto negativo se incrementa si las áreas del sitio están saturadas con lixiviado.

Para la implementación de este sistema en sitios no controlados o sitios controlados sin una capa de impermeabilización en el fondo, se debe tomar en cuenta la permeabilidad del suelo, ya que, si es un suelo es relativamente permeable, se corre el riesgo de que el lixiviado se infiltre al subsuelo es mayor; sin embargo, un suelo con alta permeabilidad la infiltración será mínima generando escurrimientos, los cuales se pueden controlar con drenes perimetrales.

La recirculación de lixiviado que este manual propone en dos formas:

- Pozos Verticales de Recirculación de Lixiviado
- Drenes de Recirculación de Lixiviado (Diagrama Ishikawa o espina de pescado)

16.2.1. POZOS VERTICALES DE RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADO

En la etapa de planificación del proyecto de clausura se deberá establecer la ubicación de los pozos de recirculación. Este manual recomienda que, en caso de tener un sistema de pozos verticales de extracción de biogás, se debe colocar un pozo de recirculación de lixiviado a una distancia media entre pozos de extracción, con el objetivo de no interferir con el área de influencia del pozo de biogás, (30 m para pozos en sitios no controlados). De igual modo, puede colocarse un pozo de recirculación por cada cuatro pozos dentro del diseño de pozos de extracción de biogás; lo anterior en forma de trébol y respetando las áreas de influencia. Si se tiene un sistema mediante zanjas o trincheras de extracción de biogás, será necesario colocar el pozo a una distancia mínima de 10 m de la trinchera donde se encuentre un tubo de captación de biogás.

Para sitios no controlados, así como para sitios controlados con ausencia de barrera impermeable en la base, la profundidad del pozo debe llegar máximo al 50% (1/2) de profundidad del estrato de residuos confinados. Para los rellenos sanitarios y sitios controlados con barrera impermeable, se recomienda una profundidad del 75% (3/4) de la profundidad del estrato de residuos confinados.

Pozo Recirculación de Lixiviado

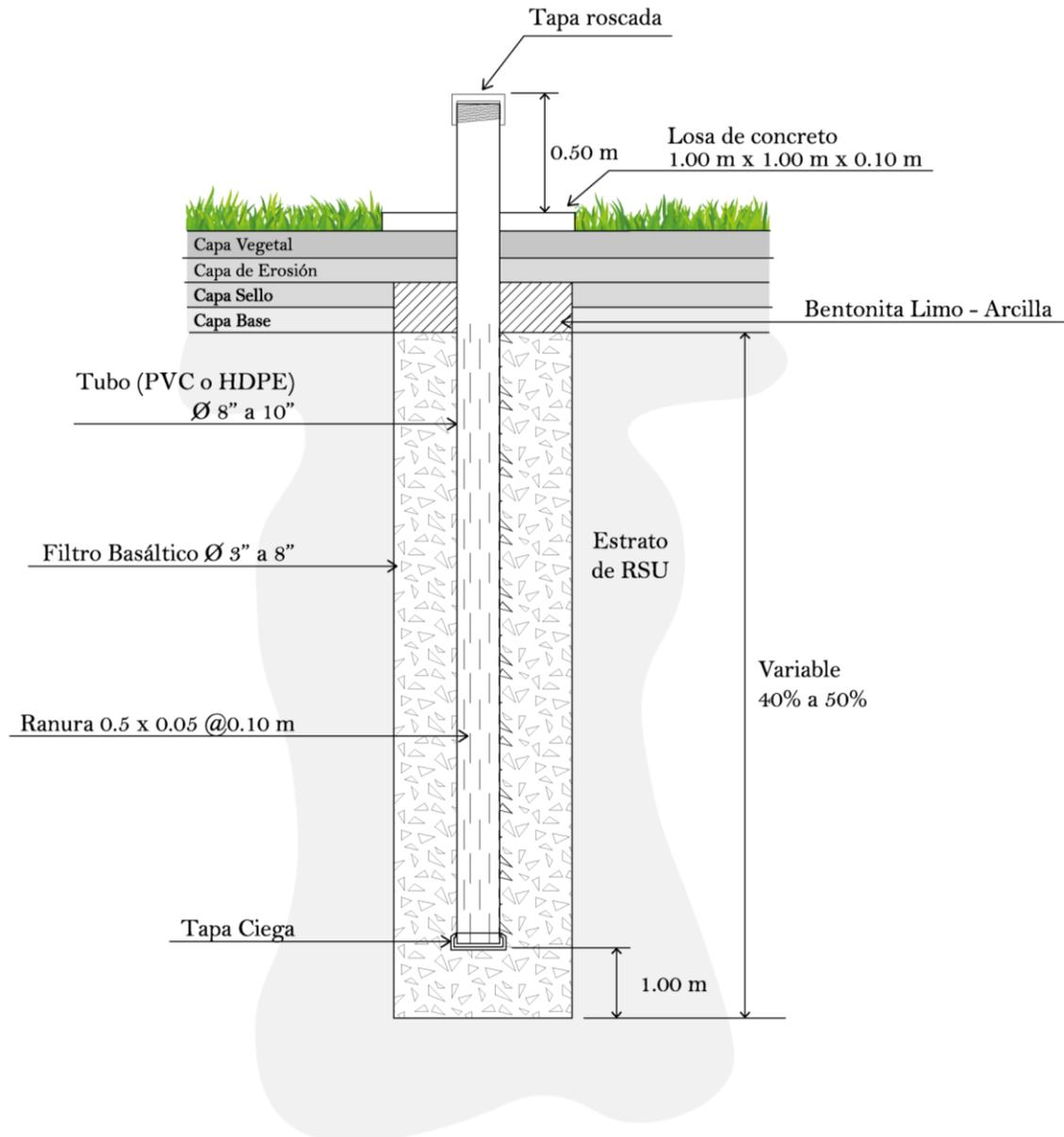


Figura 112. Diagrama de pozo vertical para la recirculación de lixiviado

Fuente: elaboración propia

Para la construcción y equipamiento de los pozos verticales de recirculación se recomienda lo siguiente:

Realizar la perforación de un pozo que abarque del 40% al 50% del estrato de residuos confinados. Dicho pozo se rellenará con un filtro a base de material

pétreo basáltico con una granulometría mixta de 3" a 8" de diámetro sin finos. En el interior y al centro del pozo se colocará un tubo de PVC cédula 40 u 80 o un tubo de HDPE de 8" a 10" de diámetro con ranuras de 0.5 m de largo por 0.05 m de ancho en forma de trébol alrededor del tubo a cada 0.10 m. Las perforaciones del tubo deben abarcar, al menos, el 75% de la longitud del tubo que tenga contacto con la capa de residuos confinados. Así mismo, se deberá colocar una tapa ciega con ranuras en el fondo o base del tubo.

El tubo vertical en la sección que tenga contacto con las capas del sistema de sellado ya no deberá ser perforado y deberá llegar al nivel 0+ 0.50 m, donde se le deberá colocar una tapa roscada o atornillable la cual será removida cuando se vaya a hacer la reinyección del lixiviado.

Como parte del sistema de sellado del pozo, se colocará una mezcla de bentonita con material limo-arcilloso (tepetate) alrededor del tubo, entre el estrato de residuos sólidos confinados y la capa sello. La mezcla de bentonita con material limo-arcilloso se realizará en una proporción de al menos 20% y 80% respectivamente. Una vez homogenizados los materiales, será necesario aplicar una humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM para posteriormente verterlo alrededor del tubo y proceder a su compactación con pisón de mano o mecánico.

En la superficie del pozo, en el nivel 0.00 m, se deberá construir un sistema de protección, el cual podrá ser mediante la construcción de una placa de concreto con dimensiones de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. Previo al colado de la placa, se debe considerar la colocación de un tubo de un diámetro mayor al tubo del pozo, para que al momento del colado de la losa y en todo momento este tubo quede adherido a la placa de concreto, y así permitir el libre deslizamiento de los tubos que forman parte del sistema del pozo. Este sistema ayudará a que la placa de concreto se comporte conforme se presenten los asentamientos diferenciales y evitar una flotación o ruptura.

El método de reinyección de lixiviado puede ser por medio de carros tanques (pipas), por bombeo desde los cárcamos, desde pozos mixtos o por sistemas automatizados de bombeo.

Isométrico Ishikawa

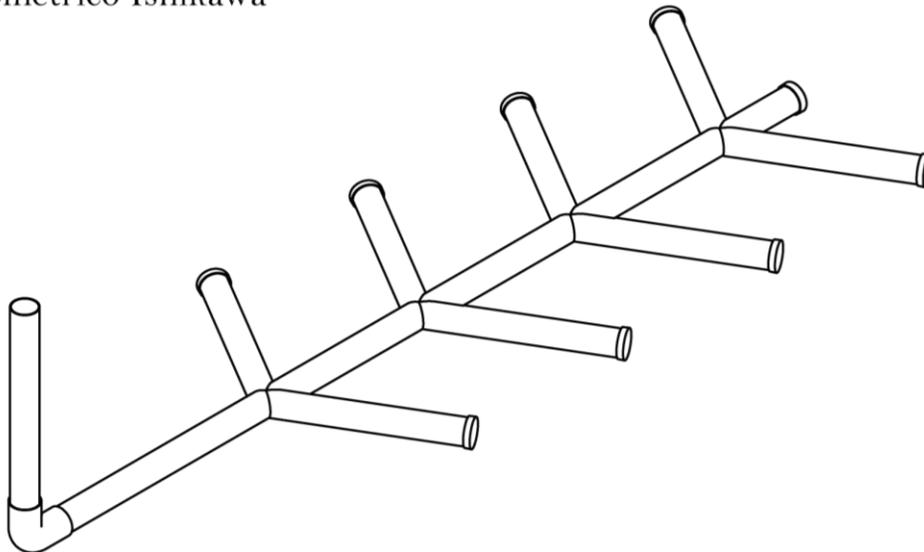


Figura 114. Isométrico del sistema central de dren de recirculación de lixiviado por principio del diagrama de Ishikawa o espina de pescado

Fuente: elaboración propia

Para la construcción y equipamiento de los drenes de recirculación se recomienda lo siguiente:

Realizar la excavación de una zanja superficial que tenga una profundidad de 1.20 m medidos desde el nivel 0.00 m de la capa de residuos confinados. En la base de la zanja puede o no colocarse una capa de geotextil de un largo suficiente que logre envolver la base de material pétreo y el tubo ranurado de manera horizontal.

La zanja deberá ser rellenada con un filtro a base de material pétreo basáltico con una granulometría promedio de 2" a 6" de diámetro sin finos, tanto en la base de la zanja como en la superficie, de modo tal que este filtro de material pétreo funcione como un encofrado para el tubo horizontal. La base o cama será rellenada de material pétreo con la granulometría antes mencionada, se recomienda un espesor de 0.10 m a 0.30 m y sobre esta se colocará el tubo y para el relleno por encima del tubo se recomienda un espesor de 0.30 m a 0.70 m.

Otra alternativa para el encofrado es haciendo uso de NFU que se encuentren en el sitio. Estos se deberán colocar sobre la cama o base de material pétreo a lo largo la zanja, dejando espacio de separación mínimo de 0.1 m y máximo de 0.2 m entre cada uno y colocando el tubo ranurado dentro de los NFU o colocando la mitad de un NFU por encima del tubo ya tendido, a estos NFU se les deberán realizar ranuras de 0.05 m de diámetro a cada 0.05 m, para evitar que el lixiviado reinyectado se almacene en ellos.

Al interior y al centro de la zanja se colocará un tubo corrugado de HDPE el cual puede ser de 4" a 8" de diámetro de manera horizontal. El tubo debe ser perforado con ranuras de 0.05 m de largo por 0.05 m de ancho en forma de trébol, y alrededor del tubo a cada 0.05 m. Las perforaciones del tubo deben abarcar al menos el 80% de su longitud.

En un extremo del tubo horizontal se colocará un codo de 90°, al que se le añadirá una sección vertical sin ranurar de 4" de diámetro, que puede ser de HDPE o PVC de cédula 40 u 80. Dicha sección será por donde se realice la reinyección del lixiviado. Esta sección vertical deberá llegar al nivel 0+ 0.50 m del sistema de sellado, donde se le deberá colocar una tapa roscada o atornillable la cual será removida cuando se vaya a hacer la reinyección del lixiviado. Así mismo se debe colocar tapas ciegas en los extremos de los tubos horizontales.

El tubo horizontal principal, así como sus ramales, deberán tener una pendiente en el ámbito del 0.5% al 3% para garantizar el flujo del lixiviado en todo el sistema. Estas pendientes se darán aprovechando la configuración del sitio, o con el aumento en la cama del tubo; lo que quiere decir que la pendiente se otorgará con colocación de más volumen de material pétreo. El punto cero se contará en donde se instale el tubo vertical de inyección de lixiviado, por lo que a partir de ese punto se dará la pendiente al tubo principal, en cuanto a los ramales se contará desde la intersección con el tubo principal.

Como parte del sistema de sellado del pozo, se colocará una mezcla de bentonita con material limo-arcilloso (tepetate) alrededor del tubo, entre el estrato de residuos sólidos confinados y la capa sello. La mezcla de bentonita con material limo-arcilloso se realizará en una proporción de al menos 20% y 80% respectivamente. Una vez homogenizados los materiales, será necesario aplicar una humedad óptima de $\pm 2\%$ PVSM para posteriormente verterlo alrededor del tubo y proceder a su compactación con pisón de mano o mecánico.

En la superficie del pozo, en el nivel 0.00 m, se deberá construir un sistema de protección, el cual podrá ser mediante la construcción de una placa de concreto con dimensiones de 1.00 m x 1.00 m con 0.10 m de espesor. Previo al colado de la placa, se debe considerar la colocación de un tubo de un diámetro mayor al tubo del pozo, para que al momento del colado de la losa y en todo momento este tubo quede adherido a la placa de concreto, y así permitir el libre deslizamiento de los tubos que forman parte del sistema del pozo. Este sistema ayudará a que la placa de concreto se comporte conforme se presenten los asentamientos diferenciales y evitar una flotación o ruptura.

El método de reinyección de lixiviado puede ser por medio de carros tanque (pipas), por bombeo desde los cárcamos, desde pozos mixtos o por sistemas automatizados de bombeo.

16.3. TRATAMIENTO DE LIXIVIADO EN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL (PTAR)

Identificada la ubicación del sitio de disposición final a clausurar, así como de la infraestructura de tratamiento de agua residual existente en la zona, se explorará la posibilidad de disponer el lixiviado para su tratamiento en dichas instalaciones. Para ello se debe tomar en cuenta la caracterización y el análisis de parámetros del lixiviado del sitio, en coordinación con la entidad operativa de la planta de tratamiento, el cual debe operar a la capacidad máxima que permita la planta, sin interferir su tren de tratamiento.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DE LIXIVIADO

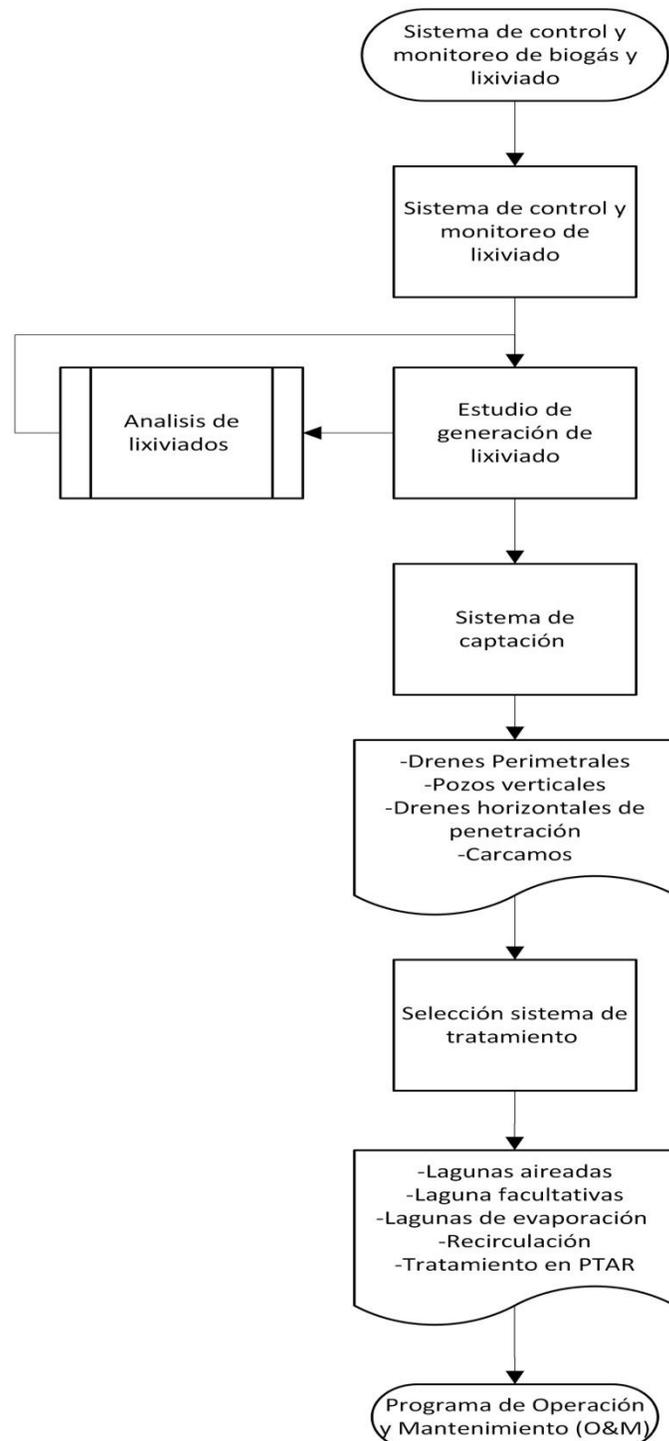


Figura 115. Diagrama de flujo para la aplicación del procedimiento del sistema de control y monitoreo de lixiviado

Fuente: elaboración propia

17. SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL

La escorrentía superficial debe ser controlada por un sistema de drenaje consistente en canaletas y areneros, lavaderos, trampas de sedimentos, disipadores de energía para prevenir la erosión de la cubierta final.

El sistema de drenaje superficial debe ser mantenido en buenas condiciones de trabajo mediante un programa de mantenimiento

Para el diseño y construcción del sistema de drenaje pluvial, este debe garantizar la expulsión del agua pluvial fuera del sitio; de lo contrario, el agua se infiltraría dentro del sitio y esto aumentaría el volumen del lixiviado.

Es importante considerar las siguientes actividades básicas de recabación de información en el Servicio Meteorológico Nacional (SNM) para la realización del diseño del drenaje pluvial:

- Información pluviométrica
- Información pluviográfica

Así mismo se debe tomar en cuenta el estudio de balance hídrico para el diseño de estas estructuras de evacuación de agua pluvial.

17.1. LLUVIA MEDIA

Se refiere a la determinación de la precipitación media de una cuenca en un intervalo de tiempo. Dependiendo de este dato se realiza el diseño de las obras hidráulicas.

La existencia del ciclo hidrológico, que determina que el agua en el planeta manifiesta un movimiento cíclico que por tanto se determina mediante la ecuación.

Precipitación = Escurrimiento + Infiltración + Evapotranspiración

Considerando que la evapotranspiración incluye la evaporación y la transpiración.

Para esto se utilizan los siguientes tres diferentes métodos:

17.1.1. MÉTODO ARITMÉTICO

Que consiste en el promedio aritmético simple de la suma de las alturas de precipitación de cada una de las estaciones pluviométricas entre el número de estaciones.

17.1.2. MÉTODO DE POLÍGONOS DE THIESSEN

En el cual se determinan las áreas de influencia de cada estación pluviométrica geoméricamente, y se suman los productos de la superficie de cada área de influencia por la precipitación medida en la correspondiente estación del área, dividiendo dicha suma entre la superficie total de la cuenca.

17.1.3. MÉTODO DE ISOYETAS

Que se obtiene tras dibujar las isoyetas de la superficie de la cuenca (líneas de igual precipitación), midiendo las áreas entre cada par de curvas, para después multiplicarlas por el promedio de precipitación entre las dos curvas limítrofes. Para realizar una suma de los productos de cada una de las áreas entre las curvas por el promedio de precipitación entre cada par de curvas correspondiente y dividirla entre la superficie total de la cuenca.

17.2. ESTRUCTURA DEL DRENAJE PLUVIAL

Las estructuras a diseñar no deberán de ser de un material demasiado pesado para evitar favorecer los asentamientos que se presenten constantemente, pero con la previsión de que tampoco sean de un material muy rígido que pueda generar fracturas con los asentamientos. Tampoco deben ser tan ligeras como para que presenten flotación sobre el nivel del terreno y no cumplan con el objetivo de captar la escorrentía pluvial.

Las estructuras por las que estará integrado el drenaje pluvial son:

- Cunetas
- Cajas rompedoras de presión
- Cajas deflectoras
- Areneros
- Lavaderos
- Cruces con caminos o bermas

Estas estructuras conformarán el drenaje pluvial y quedarán entre las capas de erosión y de cubierta vegetal.

17.2.1. CUNETAS

Son estructuras con una sección hidráulica trapezoidal o triangular que se trazan y construyen al pie de talud sobre la berma o en los constados de los caminos construidos, así como en la plataforma superior para la evacuación del agua pluvial.

La pendiente que tendrán será determinada por la topografía, del mismo modo, las dimensiones de la sección serán establecidas por el proyecto en función del área de aportación y desnivel del terreno.

Es recomendable instalar las cunetas en tramos o secciones longitudinales de 1.00 m a 1.50 m, con el objetivo y finalidad de que estas se puedan ir renivelando con el paso del tiempo en función de los asentamientos y deformaciones que se vayan presentando.

17.2.2. CAJAS ROMPEDORAS DE PRESIÓN

El uso de las cajas rompedoras de presión ayuda al sistema de canaletas que conforma el sistema de drenaje pluvial a controlar la presión que haya en el escurrimiento del flujo, evitando así desbordamientos y daños en los sistemas de conducción.

La caja rompedora de presión es un depósito cuya función es permitir que el flujo de agua descargue en esta y, con ello, se elimine la presión hidrostática y se establezca un nuevo nivel estático aguas abajo.

Estas cajas rompedoras de presión se colocarán en el inicio y al final de los lavaderos, así se ayudará a disminuir la presión del agua que baje de los ellos. También se colocará en el punto de conexión con el sistema de drenaje al que se direcciona la salida del drenaje pluvial

Su dimensionamiento será con base en lo estipulado en el proyecto, así mismo, en el proyecto se deberá considerar la colocación de un sistema de sedimentación que funcione como arenoso, de tal forma que las dimensiones deben considerar el espacio para poder desarrollar las actividades de limpieza.

La estructura de las cajas deflectoras será a base de concreto armado con las dimensiones y estructura que marque el proyecto.

17.2.3. CAJAS DEFLECTORAS

El uso de cajas deflectoras es debido a que el sistema de drenaje pluvial se realiza a través de cunetas a cielo abierto.

La función de las cajas deflectoras es concentrar varias cunetas de diferentes direcciones y encauzar los escurrimientos pluviales que confluyen hacia ellas para dirigirlos a un ducto, cuneta o lavadero, según sea el caso.

La forma de las cajas está en función de la llegada y salida de las cunetas, así como de los niveles de confluencia. Es importante recalcar que se les deberá colocar un sistema de sedimentación que funcione como arenero.

La estructura de las cajas deflectoras será a base de concreto armado con las dimensiones que marque el proyecto.

17.2.4. ARENEROS

La función de estas estructuras dentro del sistema de alcantarillado de agua pluvial es retener los sólidos transportados por el escurrimiento y retenerlos, con la finalidad de evitar azolves en el trayecto de las cunetas.

Se recomienda que cada arenero se ubique a una distancia de entre 50 a 100 metros con respecto a los otros o a las cajas deflectoras o rompedoras de presión que también funcionan como desarenadores. De la misma forma, se colocarán en zonas donde las cunetas cambien de sección hidráulica, o según la distancia que determine el proyecto.

17.2.5. LAVADEROS

Son estructuras que tienen la funcionalidad de conducir el caudal de un nivel superior a uno inferior entre bermas, así como de disminuir la carga de energía del caudal, mismo que tomará distintas velocidades debido a los desniveles,

Los lavaderos se colocarán sobre los taludes en los puntos que la topografía y la intersección de cunetas lo determine, de tal manera que capten el escurrimiento desde el punto superior para conducirlo al punto inferior.

Al inicio y final de cada lavadero se ubicará una caja amortiguadora con un arenero, donde se descargará el agua captada de las cunetas antes de ser conducida al lavadero. Esta caja ayudará a disminuir la velocidad y la presión del agua de las cunetas, así como para retener los sólidos

Los lavaderos se construirán de concreto armado de las dimensiones y formas que determine el proyecto. Podrán ser trapezoidales, rectangulares, circulares o triangulares, todo dependerá del proyecto.

A estos lavaderos se les podrá colocar difusores de velocidad que ayuden a protegerlos contra la erosión. Dicha barrera protectora que podrá hacerse mediante un zampeado de mampostería, colocación de lámina metálica corrugada, o la colocación de puntas de mampostería de manera vertical de forma cuatropeda. También se puede dar una forma escalonada al zampeado de mampostería.

17.2.6. CRUCES CON CAMINOS O BERMAS

En el trazo del drenaje pluvial se encontrarán cruces con caminos de acceso y bermas que deben ser librados sin interrumpir la red del drenaje pluvial ni la transitabilidad de caminos. Por tanto, para cruzar los sistemas de conducción de los escurrimientos pluviales de un extremo a otro se deben diseñar cruces en función del desnivel topográfico y su funcionalidad. Para esto se proponen dos tipos de cruces:

- Cruces por medio de tuberías
- Cruces por medio de trincheras de concreto armado

i) CRUCES POR MEDIO DE TUBERÍAS

Esta alternativa propone la instalación de un tubo que podrá ser de PVC, HDPE o Concreto reforzado, de la longitud y diámetro que establezca el proyecto para realizar el cruce de una berma o un camino.

Esta tubería se instalará en una caja rompedora de presión en ambos extremos. La tubería se pondrá de manera subterránea con un encofrado de material pétreo de 2" de diámetro que proteja al tubo. Este encofrado estará compuesto por una cama de 0.15 m y un encofrado de 0.30 m.

Es muy importante generar, siempre, una pendiente aguas abajo, con el objetivo de evitar estancamientos y conducir la escorrentía fuera del sitio.

ii) CRUCES POR MEDIO DE TRINCHERAS DE CONCRETO ARMADO

Esta alternativa esta propuesta para cruces donde no sea posible hacerlo con tubería, ya sea por diferencia de niveles topográficos, donde al enterrar el tubo a la profundidad que determine el proyecto se tengan que bajar los niveles de cuneta, y estos queden por fuera de las áreas de captación de agua pluvial. Por lo tanto, se propone como alternativa el uso de trincheras.

Las trincheras son estructuras de concreto armado de forma rectangular, las cuales, en la parte superior se les pondrá colocar una rejilla tipo Irving que, de la función de alcantarilla, o tapas de concreto armado. Ambas opciones para permitir el libre paso de vehículos.

Las trincheras estarán conectadas en sus extremos a cajas rompedoras de presión. A estas trincheras se les deberá otorgar una pendiente aguas abajo con el objetivo de evitar estancamientos y conducir la escorrentía fuera del sitio.

Esquema de Drenaje Pluvial

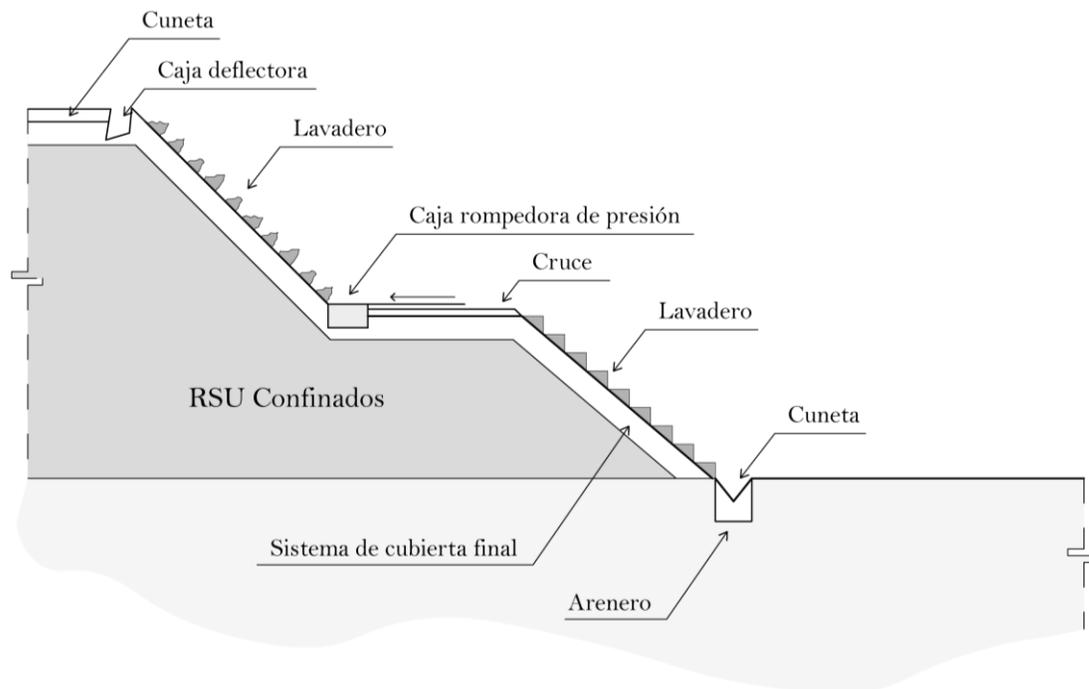


Figura 116. Diagrama del esquema del sistema de estructuras que conforman el drenaje pluvial

Fuente: elaboración propia

18. OBRAS COMPLEMENTARIAS

Cuando se realiza la clausura de un SDF, el lugar ya no tiene mayor actividad que aquellas de operación y mantenimiento (O&M), las cuales incluyen mantenimiento de caminos, mantenimiento a la cubierta final, mantenimiento a la señalética, conservación de obras hidráulicas y el monitoreo de los sistemas de control y monitoreo de biogás y lixiviado. Para ello se requiere infraestructura, como oficinas, laboratorios, almacenes y talleres; por lo tanto, en esta sección se describen las obras y actividades complementarias para conservar el SDF durante el tiempo de posclausura.

18.1. CERCADO PERIMETRAL

Se deberá realizar el delimitado del predio del sitio de disposición final. Este cercado podrá ser hecho a base de malla ciclónica con alambre calibre 10.5 con o sin serpentina. Otra opción para el cercado es a base de mampostería.

18.2. PLUMA DE ACCESO

En las puertas de acceso del sitio se deberán colocar plumas como sistema de control de entrada y salida de vehículos, estas serán a base de acero estructural de 3" de diámetro y deberán contar con una base soporte que permita el izaje, así como un contrapeso y fijación al piso con concreto armado o concreto ciclópeo de un $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$.

18.3. PUERTA DE ACCESO

Se deberán colocar puertas de acceso en las zonas que haya determinado el proyecto, como accesos y salidas. Las puertas deberán tener un ancho mínimo 4.00 m y 2.50 m de altura, podrán ser de lámina de calibre 20 o 22 o de tubo con malla ciclónica con alambre calibre 10.5. Estas puertas deberán ser recubiertas con pintura para una mayor durabilidad y deberán contar con candado.

18.4. CASETA DE VIGILANCIA

La caseta de vigilancia debe ser ubicada en cada acceso y salida del SDF clausurado. Se recomiendan dimensiones mínimas de 2.20 m x 3.00 m, construida, ya sea de materiales prefabricados o mampostería, con puerta de mínimo 1.20 m x 2.20 m de altura y ventanas de aluminio. Las ventanas deben

ser construidas con un mínimo de 1 m x 0.40 m. La caseta de vigilancia también debe contar con suministro de energía eléctrica, así como un cuarto de servicios higiénicos de 2.00 m x 2.20 m equipado con inodoro y lavabo.

18.5. OFICINA

La oficina debe ser construida desde la etapa de clausura en un área donde no se interfiera con los trabajos de movimiento de tierras, ésta tendrá el objeto de albergar al ingeniero encargado de la clausura, así como a las cuadrillas de topógrafos, biólogos y demás cuerpos técnicos que se requieran. Posterior a la etapa de clausura servirá para concentrará las actividades de organización y planificación de las actividades de O&M posclausura.

Se recomienda una oficina de dimensiones mínimas de 5.00 m x 3.00 m equipadas con sanitarios.

18.6. ALMACÉN DE EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

El objetivo es contar con un lugar para guardar las herramientas, insumos, aceites y lubricantes, pinturas, solventes y equipos que se utilizarán en las labores de O&M posclausura. Se recomiendan dimensiones mínimas de 4.00 m x 2.00 m.

18.7. SEÑALÉTICA

La señalética es el conjunto de sistemas de señalización que a su vez está integrado por señalamientos. Se trata de un lenguaje gráfico que, al ser aceptado convencionalmente, se constituye en un instrumento fundamental en materia de comunicación para los pobladores de una comunidad, especialmente para los conductores de vehículos, usuarios de transporte público y peatones. El propósito de este sistema de señalizaciones es facilitar la comunicación visual; sus elementos básicos de trabajo son los símbolos y los criterios de diseño y aplicación de los mismos.

Para el caso de la clausura de sitios de disposición final la señalización es una herramienta mediante la cual se permite informar a los trabajadores y visitantes sobre las características del lugar y las consideraciones a tener en cuenta dentro del mismo.

Se deberá colocar señalización tanto al interior del sitio como al exterior del sitio, desde el inicio de actividades de la clausura hasta la posclausura. Esta

señalización debe ser de carácter informativo, preventivo y restrictivo, las características de la señalización se deberán basar en dos normas, las cuales son Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEGOB-2011, Señales y avisos para protección civil. – Colores, formas y símbolos a utilizar y en la Norma Oficial Mexicana NOM-034-SCT2-2011, Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas.

18.7.1. SEÑALIZACIÓN AL INTERIOR

La señalización al interior está dirigida principalmente a informar sobre la localización de caminos, zona de pozos de biogás y lixiviados, así como de áreas de monitoreo de lixiviados, puertas de entrada y salida. Esta señalética se deberá ubicar en los caminos interiores, y periféricos. Así como en las zonas donde se encuentren pozos de biogás y lixiviados. Las dimensiones de los carteles se harán con base en la normativa señalada.

18.7.2. SEÑALIZACIÓN AL EXTERIOR

La señalización al exterior está dirigida, principalmente, de manera restrictiva e informativa. Así mismo, se deberá colocar señalización en los pozos de monitoreo que se construyan tanto aguas arriba como aguas debajo de sitio de disposición final.

19. PROGRAMA DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (O&M) POSCLAUSURA

Se debe realizar un plan de mantenimiento posclausura con el objetivo de garantizar la conservación del predio en lo referente a las características específicas sobre la clausura de un SDF clausurado, como son el mejoramiento del propio sitio y el de las condiciones ambientales alrededor del sitio evitando así continuar con la contaminación del suelo, agua y aire.

En este sentido el programa de operación y mantenimiento (O&M) de las instalaciones existentes es muy importante para la buena conservación del sitio, el periodo de posclausura será de un mínimo de 20 años y, por tanto, deberá realizarse un plan de mantenimiento con el objetivo de conservar el sitio con un aspecto idóneo durante los años posteriores a su clausura. Este plan de monitoreo debe considerar aspectos de conservación de drenajes pluviales, monitoreo de lixiviados, cubierta final, jardines, caminos, monitoreo de agua subterránea, erosión superficial, calidad del aire e infraestructura existente.

Es necesario establecer un programa general de mantenimiento del sitio clausurado, así como también nombrar a un responsable que contemple la revisión permanente de la infraestructura construida, de acuerdo con el proyecto.

Los aspectos de mayor relevancia que deben entrar en el plan de O&M son:

- Revisión de la estabilidad de los taludes
- Monitoreo y control de los asentamientos en la cubierta final
- Mantenimiento del sistema de drenaje pluvial
- Mantenimiento de la infraestructura
- Monitoreo y control del sistema de control y monitoreo de biogás y lixiviado
- Monitoreo de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas
- Monitoreo de la migración de contaminantes
- Control topográfico del sitio (altimetría y planimetría)
- Mantenimiento a la cubierta final

19.1. FUNCIONES DEL PERSONAL RESPONSABLE DEL MANTENIMIENTO

El encargado del mantenimiento tendrá la responsabilidad de llevar a cabo el plan de Operación y Mantenimiento de Posclausura del SDF clausurado.

Deberá especificar el tipo de personal a emplear de acuerdo con las habilidades y necesidades del sitio, indicando sus perfiles profesionales para cada tipo de trabajo de mantenimiento, así como del personal administrativo y de vigilancia.

También deberá especificar las funciones del personal para cada una de las actividades de mantenimiento y control que se incluyan dentro del plan de O&M posclausura. Así como para las actividades complementarias que se desarrollen al respecto. En ambos casos se especificará el cronograma de trabajo.

Será necesario, también, contar con un inventario de equipos y materiales a requerir, especificando de manera independiente los requerimientos por actividad de mantenimiento del programa de O&M posclausura.

19.2. PLAN DE MANTENIMIENTO Y CONTROL DE INFRAESTRUCTURA

En el plan de mantenimiento y control de la infraestructura deberá estar incluida oficina, almacenes, laboratorios y construcciones dentro del sitio. Este plan debe garantizar que estas instalaciones se encuentren en condiciones óptimas de pintura, limpieza y operatividad tanto para oficinas, bardas, perimetrales, casetas de vigilancia, puertas de acceso y salida, servicios sanitarios y otras infraestructuras que existan en el sitio.

19.3. PLAN DE MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DE BIOGÁS

Se debe contemplar un monitoreo y un mantenimiento permanente en los sistemas de control, extracción, destrucción térmica de biogás, el cual debe estar contemplado en el programa de O&M efectuándose de acuerdo con las disposiciones legales de la normativa vigente.

Como parte del plan de O&M del sistema de biogás, se deben de evaluar, con una periodicidad de 30 días, los siguientes factores:

- Determinación de la población en contacto con contaminantes atmosféricos
- Determinación de la dirección de vientos dominantes
- Evaluación de la eficiencia del sistema de captación, conducción y destrucción térmica o aprovechamiento del biogás
- Rutas posibles de migración
- Puntos de acumulación

Así mismo, se deberá realizar, como procedimiento general, la toma de muestras en los puntos venteo, pozos de extracción y periferia del sitio, con una frecuencia semestral analizando los siguientes parámetros:

Parámetros *in situ*:

- Metano
- Dióxido de Carbono
- Oxígeno
- Temperatura
- Migración
- Flujo
- Explosividad

Si el SDF cuenta con laboratorio, se debe realizar el análisis de los siguientes parámetros, en caso de no contar con dicha instalación, se debe contratar un laboratorio que los realice:

- | | |
|-----------------------|------------------------------|
| • Dióxido de Carbono | • Butano |
| • Oxígeno | • Helio |
| • Nitrógeno | • Alcanos |
| • Monóxido de Carbono | • Hidrocarburos no saturados |
| • Etano | • Compuestos halogenados |
| • Etileno | • Sulfuro de hidrógeno |
| • Acetaldehído | |
| • Propano | |

19.4. PLAN DE MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DE LIXIVIADOS

El monitoreo de los sistemas de control, captación y tratamiento de lixiviados debe estar contemplado en el programa de O&M debido a que los sistemas de lixiviado deben ser monitoreados permanentemente, con una frecuencia semestral, revisando la calidad del lixiviado, su madurez, pH y el nivel para ver si ha disminuido o aumentado.

Se deben monitorear y analizar los siguientes parámetros *in situ*:

- Temperatura
- Conductividad
- pH

Si el SDF cuenta con laboratorio se debe realizar el análisis de los siguientes parámetros, en caso de no contar con laboratorio, se debe contratar un laboratorio que los realice:

- | | |
|--|---|
| • Conductividad | • PCBs (Bifenilos Policlorados) |
| • CaCO ₃ | • VOCs (Compuestos Orgánicos Volátiles) |
| • DBO ₅ | • Calcio |
| • DQO | • Magnesio |
| • Sulfatos | • Sodio |
| • Cloruros | • Potasio |
| • Cianuros totales | • Hierro |
| • Fósforo total | • Manganeso |
| • Amonio | • Cromo |
| • Nitratos | • Cobre |
| • Nitrógeno Kjeldahl | • Níquel |
| • Fenoles | • Zinc |
| • AOX (Compuestos Orgánicos Halogenados) | |

19.5. PLAN DE MONITOREO DE ASENTAMIENTO Y FISURAMIENTO DE LA CUBIERTA FINAL DEL SITIO CLAUSURADO

El plan de mantenimiento de la cubierta final debe considerar, principalmente, a los asentamientos y grietas que se pudieran presentar en la cubierta final y tengan el potencial de producir modificaciones en los niveles del terreno, tanto en la plataforma como en bermas y taludes.

Para complementar y llevar acabo un adecuado plan del programa de O&M, se recomienda llevar a cabo un seguimiento de los asentamientos a corto, mediano y largo plazo, lo anterior, durante 20 años como referencia de la NOM-083-SEMARNAT-2003. Este seguimiento se debe realizar bajo una red de bancos de nivel como se indica a continuación:

19.6. MANTENIMIENTO A BANCO DE NIVEL FIJO

Se deberá dar mantenimiento a los bancos de nivel ubicados dentro y fuera del perímetro del sitio de disposición final, verificando la conservación de las placas de acero.

Se deberá dar mantenimiento a estos bancos de nivel, renovando el recubrimiento de pintura con periodicidad, cuidando que no sean removidas las placas y en caso de que ya no exista la placa, reponerla de inmediato.

Además del recubrimiento de pintura la protege la placa, se deberá hacer lo mismo a la nomenclatura del nombre del banco de nivel, así como volver a señalar el centro del banco de nivel con un círculo de color rojo.

19.7. MONITOREO DE ASENTAMIENTOS

El método por el cual se llevará acabo el monitoreo de los asentamientos, será por medio de levantamientos altimétricos por método de ida y vuelta.

La frecuencia con la que se deberá llevar a cabo el control altimétrico será de la siguiente manera:

- Los primeros 3 (tres) años de posclausura se deberá realizar un levantamiento mensual como mínimo
- A partir del cuarto año al sexto año de posclausura se deberá realizar cada seis meses
- A partir del séptimo año se deberá realizar anual

19.8. REPARACIÓN DE FISURAMIENTO

Los asentamientos de un relleno sanitario pueden provocar fisuramiento debido a:

- Degradación natural de la fracción orgánica contenida en la composición de los residuos sólidos dispuestos en el sitio.
- Reducción del volumen de lixiviado debido a la extracción o migración.
- Pérdida de humedad del material empleado para la construcción de la cubierta final.

Aunado a lo anterior, las cubiertas finales son expuestas a condiciones naturales, como vientos, lluvias y sequías; por ello, la cubierta final del sitio de disposición final debe conservarse en buenas condiciones y debe estar contemplado un mantenimiento en el programa de O&M.

Deben repararse oportunamente las posibles grietas superficiales generadas por la condición de drenaje adverso originado por los asentamientos. Las depresiones que se formen deben ser rellenadas con material de cubierta (arcillo arenoso). Estas adecuaciones se deben hacer, principalmente, en la temporada de estiaje, ya que en temporada de lluvias se podría acumular el agua pluvial y de alguna manera, dicha acumulación, puede incidir en la percolación del agua pluvial almacenada hacia el interior de las celdas, incrementar el nivel de lixiviados, acidificando el medio y transformando el ambiente reductor, en oxidante y reduciendo la generación de biogás.

19.9. PLAN DE MANTENIMIENTO Y CONTROL DE EROSIÓN DE TALUDES DEL SITIO CLAUSURADO

El control y mantenimiento de erosiones se da principalmente en la zona donde pudo haberse eliminado o retirado el pasto, y el material de cubierta se encuentre libre y expuesto a la erosión del viento o de la lluvia. Por tanto, es importante contar con un programa de mantenimiento para estos casos, así se evitarán que se pierdan la configuración de las capas de protección señaladas anteriormente y que los taludes pierdan sus características y dimensiones establecidas en el proyecto de clausura del sitio, es por ello que es importante mantener los taludes estabilizados a fin de prevenir la erosión del suelo.

Al igual que en planes de mantenimiento para la cubierta final, se debe dar mantenimiento a la cubierta vegetal, tanto para prevenir la erosión excesiva, como para evitar el crecimiento de árboles de raíces profundas que rompan la

condición de impermeabilidad. De igual manera, las grietas superficiales generadas por la condición de drenaje adverso originados por los asentamientos deben repararse oportunamente. Las depresiones que se formen deben ser rellenadas con material de cubierta (arcillo arenoso). Se recomienda hacer estas adecuaciones en la temporada de estiaje, ya que, en temporada de lluvias, la escorrentía podría erosionar las capas inferiores a la cobertura vegetal.

19.10. PLAN DE MANTENIMIENTO DE CUBIERTA VEGETAL

Se debe contar con un plan de mantenimiento de la cubierta vegetal, esto con el objetivo de mantener el sitio en condiciones donde el aspecto urbano se integre al mismo; de ello la importancia del programa, el cual, además de ayudar con el aspecto del sitio, ayudará a prevenir la erosión de las capas que forman el sistema de sellado. El plan de mantenimiento debe contar con riego y poda de la cubierta vegetal del sitio una vez realizada su clausura y durante los 20 años próximos de acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003.

El plan de mantenimiento a la cubierta vegetal será tanto para evitar erosión excesiva, así como para evitar el crecimiento de árboles de raíces profundas que rompan la condición de impermeabilidad y, como consecuencia, se rompa el ciclo anaerobio de generación de biogás al incrementar el nivel de lixiviados, acidificación el medio y transformación del ambiente reductor en oxidante. Las madrigueras de animales deben ser selladas y se deben conservar limpios los canales de drenaje. La cubierta final debe ser protegida de las actividades humanas, excavaciones no autorizadas, tráfico vehicular fuera de los caminos establecidos y asentamientos humanos ilegales.

Para el programa de riego, este debe realizarse semanalmente durante los meses de estiaje para mantener verde la cubierta vegetal. Para esto se deberá realizar el riego con 8 L/m^2 y así se evitar el riego excedente y con ello la acumulación de agua que nos aporte humedad para la generación lixiviados.

Para el programa de poda, este se debe realizar mensualmente durante la época de lluvias. Durante la época de estiaje se debe realizar cada mes y medio o cada dos meses.

Debe considerarse también la limpieza y recolección de papeles, hojas u otro tipo de residuos que pudiesen dar un mal aspecto al sitio clausurado. Este programa debe ser a consideración del encargado de O&M, dependiendo la zona en la que se ubique el sitio.

19.11. PLAN DE MONITOREO, MANTENIMIENTO Y CONTROL DE CAMINOS

El mantenimiento de los caminos se centrará, básicamente, en mantener su condición de transitabilidad vehicular, cuidando que no desaparezcan y que estén en condiciones de operatividad.

Debido a que los caminos estarán sobre el relleno sanitario, principalmente en las bermas, estos sufrirán asentamientos diferenciales a causa de la degradación de los residuos, por tanto, se recomienda un mantenimiento continuo con el objetivo de conservarlos transitables.

Dicho mantenimiento consiste en adicionar materiales en capas de 0.15 m de espesor, tratando de compactarlos en un rango de 90% a 95%. Este material puede ser producto de material de fresado, o mezcla asfáltica en frío, compensando las deformaciones por asentamientos.

El periodo de tiempo entre mantenimiento de caminos queda a juicio del ingeniero residente encargado del O&M de posclausura.

19.12. PLAN DE MONITOREO DE AGUA Y CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS

Se debe desarrollar un modelo geohidrológico durante la elaboración del proyecto de clausura y saneamiento del sitio. Con base a este modelo arrojado de un estudio geohidrológico se obtendrán informes de pruebas de resistividad y pozos de exploración, tanto aguas arriba como aguas abajo del SDF, con los cuales se podrá cumplir el objetivo de verificar que no haya contaminación de los cuerpos de agua por lixiviados, y si los hay, solucionarlos. Este monitoreo se debe realizar en canales, ríos, cuerpos de agua intermitentes (que solo conduzcan agua en temporada de lluvia) y aguas subterráneas.

Con base en el estudio geohidrológico y en sus resultados, se deberán localizar y construir pozos de monitoreo superficiales y profundos en las zonas designadas por el estudio en la periferia del predio, tanto en aguas arriba como aguas abajo, en áreas que potencialmente presenten conexión hidráulica entre los acuíferos superficiales y profundos.

Estos pozos deben recibir un monitoreo semestral, así como también de análisis de aguas. Para este caso, se deberán medir y monitorear, además de la presencia de lixiviado en el agua, los parámetros de la Tabla 2 y 3, extraídos

de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. En la Tabla 19 se enlistan los parámetros que deben ser monitoreados.

Tabla 19. *Parámetros a analizar para el monitoreo de agua superficial y subterránea*

Parámetros NOM-001-SEMARNAT-1996	
pH	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
Coliformes Fecales	Arsénico
Huevos de Helminto	Cadmio
Temperatura	Cianuro
Grasas y Aceites	Cobre
Materia Flotante	Cromo
Sólidos Sedimentables	Mercurio
Sólidos Suspendidos Totales	Níquel
Nitrógeno Total	Plomo
Fósforo Total	Zinc

Fuente: elaboración propia

Es importante señalar que estos parámetros deberán cumplir con los límites máximos permisibles que marca la norma, de acuerdo con las condiciones que señala la misma.

De haber algún límite que no se cumpla, deberá analizarse si es por cuestiones del SDF o causas ajenas, en caso de ser provocado por el sitio, estas fugas de contaminante deberán repararse.

19.13. PLAN DE MANTENIMIENTO Y CONTROL DE DRENAJE PLUVIAL

19.13.1. INSPECCIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL

Para el control y mantenimiento del sistema de drenaje pluvial, se recomienda hacer las siguientes acciones:

Para mejorar la eficiencia en el mantenimiento de los sistemas de drenaje pluvial, es conveniente que estos estén ubicados en un plano de localización, para la fácil ubicación de canales, cruces, cajas reductoras de presión, cajas de cambio de dirección y desarenador; por tanto, es importante tener un plano con la ubicación exacta, debido a que en la etapa de construcción puede haber variación entre lo que se tiene en gabinete y lo que se realiza en campo.

Posteriormente cuando ya el sistema de drenaje pluvial se encuentre en operación, se deben realizar recorridos de inspección, donde se podrán observar anomalías en la red de drenaje pluvial. Con estos recorridos de inspección se podrán plantear los requerimientos de reparación y mantenimiento, ayudando con eso a reducir el empleo de recursos humanos y materiales, una vez levantados estos datos se podrán iniciar los trabajos correspondientes. Es recomendable señalar con claridad sobre una bitácora los problemas identificados, así como la solución y los procedimientos que se realizaron para la reparación de los daños, indicando en los informes la fecha, clase, magnitud, duración, motivo y la frecuencia del problema.

El objetivo de los recorridos de inspección es conocer el estado de limpieza, condiciones de las estructuras y, sobre todo el adecuado funcionamiento hidráulico del sistema de drenaje pluvial.

19.13.2. LIMPIEZA DE CANALETAS Y DESARENADORES

Se debe comprender que los drenajes pluviales como obra de ingeniería, deben conservarse en el mejor estado de funcionamiento, y eso obliga a realizar una limpieza preventiva para evitar problemas de mayor importancia; de lo contrario, se deberán tomar acciones correctivas y estas acciones correctivas significarán un mayor gasto.

19.13.3. RENIVELACIÓN DE CANALETAS

Como resultado de probables asentamientos diferenciales, es preciso renivelar constantemente los canales para evitar que se formen columpios y se genere un mal manejo del funcionamiento del sistema de drenajes pluviales.

19.13.4. PLAN DE CONTROL DE FAUNA NOCIVA

La importancia de llevar a cabo un control integral de fauna nociva una vez clausurado el sitio, es la de evitar la proliferación de la misma y cuidar y prevenir los riesgos a los que se exponen los trabajadores encargados de la operación y mantenimiento (O&M), así como la población cercana al sitio clausurado. En la implementación de este plan de control de fauna se deberá considerar el control de insectos voladores, rastreros, roedores y fauna canina.

La proliferación de los animales que en algunas ocasiones se convierten en plagas, son portadores de diversas enfermedades que afectan la salud humana y generan problemas de salud pública si se desplazan hacia las áreas urbanas. Por ello, se debe desarrollar este plan de manera integral.

Se deberá formar una barrera física con plaguicidas de orden y uso urbano autorizados por la Secretaría de Salud en el perímetro del sitio.

Para el control de roedores, ratas y ratones, en las instalaciones del sitio clausurado se deberán utilizar raticidas anticoagulantes (crónicos) que permitan la eliminación completa de las colonias y, de preferencia, que estos raticidas sea en su presentación de pellets o bloques sólidos parafinados, que son de gran utilidad para áreas donde hay humedad y lluvia. Este tipo de cebo deberá colocarse en depósitos de almacenamiento residuos, almacenes, y canales donde la oferta de alimento no sea excesiva. Los raticidas mencionados deberán distribuirse por lo menos cada 50 m² formando una retícula en todo el sitio, además de protegerlos para evitar el contacto directo con los humanos o con sus mascotas. Este producto deberá ser utilizado por personal capacitado para colocar los cebos lo más próximo posible a los caminos de los roedores, directamente dentro de las cuevas o nidos identificados y en las dosis que el fabricante indique, de manera que pueda evitarse una sobrecarga de dosis en el sitio. Para el caso de las oficinas se colocarán trampas tipo cajas cebaderas de polipropileno o de acero inoxidable a cada 50 m de distancia en el perímetro; al interior, se colocarán en las esquinas con menor luz y mayor humedad y en las brechas entre estantes para colocar las trampas. Una vez realizada la colocación de los cebos y de las cajas cebaderas, el personal capacitado debe

calendarizar sus recorridos, por lo menos, cada quince días; ya sea para reponer aquellos cebos que desaparezcan o que se hayan ingerido, así como para vaciar las trampas y recoger organismos muertos, mismos que, una vez recolectados, se deberán colocar en una bolsa negra aplicando plaguicida para evitar la proliferación de moscas, chinches, y mosquitos para posteriormente cerrar la bolsa y disponerlos en el contenedor de residuos sólidos orgánicos.

Como actividad preventiva se deberán realizar recorridos por parte del personal operativo y capacitado en toda el área del sitio para ubicar los senderos, madrigueras y probables poblaciones de roedores. Es de vital importancia llevar una bitácora con el registro de los recorridos, así como de la disminución de la población y dar seguimiento de la probable migración que tengan estos roedores para poder tomar alternativas de control que eviten la proliferación de los mismos.

Otro aspecto que debe ocupar este plan de control de fauna nociva es el de la población canina, la cual debe disminuirse mediante controles físicos de captura y albergue.

Para el caso de insectos voladores y rastreros, es importante utilizar productos químicos líquidos como larvicidas y polvos con atrayente sexual para insectos voladores, aplicando los productos químicos por medio de equipos nebulizadores, aspersores manuales o motorizados, y protegiendo todo el rededor del SDF clausurado, así como las zonas habitacionales que se encuentren dentro del área de influencia del sitio.

De la misma manera se requiere que el personal operativo cuente con equipo de protección obligatorio como son:

- Goggles
- Casco
- Mascarilla
- Overol
- Guantes
- Botas

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AMBIENTAL PARA LA CLAUSURA DE VERTEDEROS A CIELO ABIERTO (SITIOS NO CONTROLADOS)

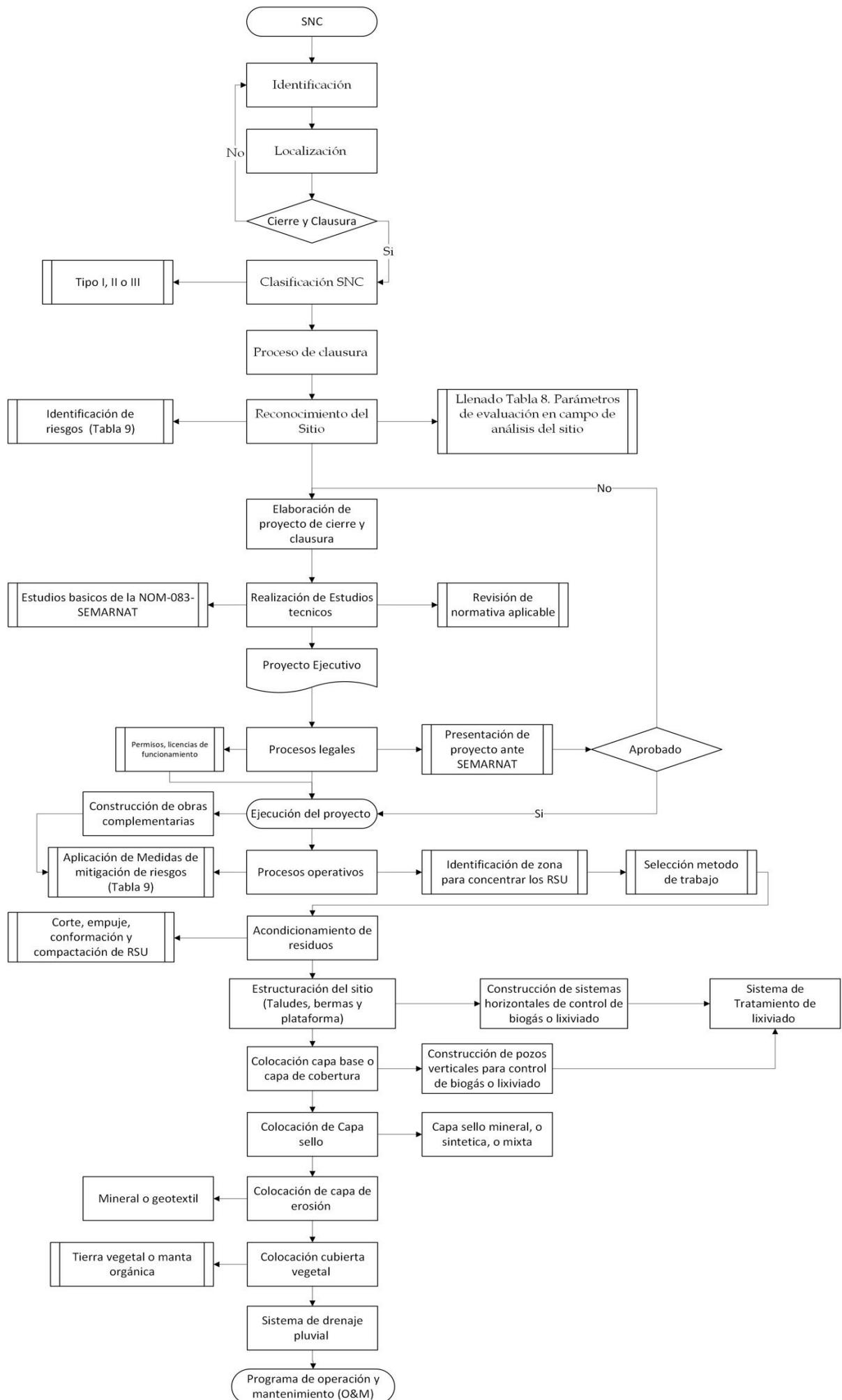


Figura 117. Diagrama de flujo del procedimiento para la aplicación de la metodología del manual para la clausura ambiental de vertederos a cielo abierto

Fuente: elaboración propia

CAPÍTULO VII

1. CONCLUSIONES

Derivado de la investigación y localización de los sitios de disposición final y la desatención por parte de las autoridades, es que se plantearon los objetivos de este trabajo, de entre los cuales, el principal fue el de desarrollar la metodología para la clausura de vertederos a cielo abierto.

Dentro del desarrollo de la investigación, se identificaron los factores legales, técnicos y administrativos que son desatendidos por las administraciones y, con base en estos factores, se plantearon las soluciones bajo las cuales las administraciones nuevas pueden aplicar este manual.

Dado que en México se cuenta con todos los instrumentos legales, administrativos, técnicos y normativos para llevar a cabo un manejo integral de los residuos sólidos urbanos y sitios de disposición final, se deben identificar mecánicas de seguimiento y vigilancia que hoy día hacen falta cumplir esos instrumentos. Así, se abre la interrogante sobre qué es lo que falta, si actitud, aptitud, o la voluntad de llevar a cabo los procedimientos necesarios para mejorar el entorno ambiental. Dado que al dejar de atender y de observar bajo la lupa los mecanismos mencionados, se ha llegado a contar con la cantidad actual de sitios no controlados, que lejos de dar un servicio, se convierten en un problema para el entorno del medioambiente, poniendo en riesgo la salud de la población. Por ello, es necesario que se asuma la responsabilidad de cada una de las autoridades en el papel que les compete y no desvirtuar esta responsabilidad culpando a la ciudadanía.

Con base en los objetivos establecidos, se logró la elaboración de un manual con una viabilidad y pluralidad técnica que, se espera, ayude a los cuerpos técnicos y administrativos encargados de los sitios de disposición final a transitarlos de sitios no controlados a sitios controlados para después poder llevarlos a su clausura y saneamiento.

En el presente trabajo se trata de llevar de la mano la toma de decisiones, acciones y las medidas para atender cada caso, partiendo del principio básico de la identificación del sitio, estructuración, clausura, saneamiento y la conservación, involucrando a todas las instituciones, factores y aspectos que tengan que ver en cada proceso.

De la misma manera, el manual señala, a través de diagramas de flujo de fácil uso, el rol de cada una de las partes involucradas en el ciclo y en el manejo de los residuos sólidos, así como en la disposición final de los residuos sólidos urbanos.

Así mismo, se hace énfasis en la importancia de que, al realizar el saneamiento de un sitio, éste no quede en el abandono y lleve un programa de mantenimiento y posclausura hasta que se estabilicen los procesos de descomposición de los residuos tal cual indica la respectiva norma.

El manual cumple con normativas y diversos procedimientos constructivos que ayudan a la toma de decisiones para la clausura y saneamiento de sitios de disposición final. Al contar con diversas alternativas, ayuda a que no se limite a una sola opción, esperando que este manual sea aplicado y escalado tanto a nivel federal como internacional para su aplicación en sitios de países de América Latina donde la situación es similar a la de México.

El trabajo realizado cumplió con los objetivos planteados, ya que está apegado a la realidad de los sitios no controlados, por lo que estas alternativas propuestas satisfacen de manera exitosa las necesidades de los mismo.

REFERENCIAS

1. Aguilar, Q., Taboada, P., & Ojeda, S. (2014). "Analysis of the feasibility of the recovery of landfill gas: a case study of Mexico." ("Characterization of the Parameters and Estimation of Potential Biogas ...")
2. Álvarez, A. López, R. (1999). El Servicio de Limpia en la Ciudad de México. Gobierno del Distrito Federal. Ed. Así funciona tu ciudad.
3. Álvarez, R. L. & Universidad Autónoma del Estado de México. (2016). Diagnóstico y Propuesta de Mejora del Tiradero Municipal de Villa Victoria Estado de México.
4. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Atlas Nacional de Riesgos. Sistema de información geográfica sobre riesgos. Peligro contaminación por residuos sólidos, 2021. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>
5. Cruz, R. Instituto de Ingeniería, UNAM. (2002). Anteproyecto de la Clausura del Tiradero a Cielo Abierto del Municipio de Tultitlán, Estado de México.
6. Departamento de Edafología, Facultad de Farmacia. UCM. (1995). Degradación y Conservación de Suelos.
7. Diario Oficial de la Federación. (2018). Ley General del Equilibrio Ecológico Y la Protección al Ambiente, Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988, Última reforma publicada DOF 05-06-2018.
8. Diario Oficial de la Federación. (2018). Ley General Para La Prevención Y Gestión Integral de Los Residuos, Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003, Última reforma publicada DOF 19-01-2018.
9. Diario Oficial de la Federación. (2000). Norma Mexicana, NMX-AA-005-SCFI-2000, Análisis de agua – determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba (cancela a la NMX-AA-005-1980).
10. Diario Oficial de la Federación. (2000). Norma Mexicana, NMX-AA-008-SCFI-2000, Análisis de agua – determinación del pH – método de prueba– (cancela a la NMX-AA-008-SCFI-1980).
11. Diario Oficial de la Federación. (2000). Norma Mexicana, NMX-AA-034-SCFI-2001, Análisis de agua–determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas–método de prueba (cancela a las NMX-AA-020-1980 y NMX-AA-034-1981).
12. Diario Oficial de la Federación. (1996). Norma Mexicana, NMX-AA-15-1985, Protección al ambiente – contaminación del suelo – residuos sólidos municipales – muestreo – método de cuarteo.
13. Diario Oficial de la Federación. (1996). Norma Oficial Mexicana, NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

14. Diario Oficial de la Federación. (1997). Norma Oficial Mexicana, NOM-002-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado.
15. Diario Oficial de la Federación. (1998). Norma Oficial Mexicana, NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
16. Diario Oficial de la Federación. (2006). Norma Oficial Mexicana, NOM-052-SEMARNAT-2005 Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
17. Diario Oficial de la Federación. (2003). Norma Oficial Mexicana, NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción operación, monitoreo, clausura y obras.
18. Díaz, D. C., Duran, R. J., & Universidad Industrial de Santander. (2005). Propuesta Metodológica para Clausura y Posclausura de Rellenos Sanitarios y/o Botaderos de Basuras. A.
19. Dpto. de Microbiología y Parasitología. Universidad de Alcalá. (2010). Estudio de la Diversidad Microbiana en Suelos de Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos. En A. J. Hernández & C. Bartolomé (Eds.), Estudio Multidisciplinar de Vertederos Sellados (pp. 97-107). UAH.
20. Editora Espacios Juventud, A.C. (1988) México. La Ciudad Más Grande del Mundo, Editora Espacios Juventud, A.C.
21. Facultad de Ingeniería, UNAM & Dirección General de Servicios Urbanos. (2002). Rehabilitación y Clausura de Tiraderos a Cielo Abierto, Apuntes Generales. México. CI-357.
22. Fukuoka City Environmental Bureau (1999), The Fukuoka Method, What is the semi-aerobic landfill.
23. Galindo, M. C., Facultad de Ingenierías, Universidad Cooperativa de Colombia, Ladino, J. I., & Villalba, A. A. (2017). Diagnóstico y mejoramiento del proceso de clausura de la celda transitoria de disposición de residuos sólidos del municipio de Cabuyaro en el departamento del Meta. A.
24. Gao, J., Oloibiri, V., Chys, M., Audenaert, W., Decostere, B., He, Y., Langenhove, H., Demeestere, K., & Hulle, S. (2015). The present status of landfill leachate treatment and its development trend from a technological point of view. *Reviews in Environmental Science & Biotechnology*, 14(1), 93122. <https://doi.org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/s11157-014-9349-z>
25. García J. E, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. (2020). La Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos en México. Estudio de caso del municipio de Tlalnepantla de Baz, Estado de México.
26. González, J. E, Facultad de Ingeniería, UNAM. (2002). Metodología Topográfica empleada en el Relleno Sanitario "Prados de la Montaña", Álvaro Obregón, D.F.
27. Henry, J. y Heinke, G. W. (1999). "Ingeniería Ambiental", Prentice Hall, México, 2da. Edición, Ed. Pearson Educación, México.

28. Hjort E, Facultad de Ciencias, UNAM. (2012). Calidad del Agua en Pozos Aledaños al Relleno Sanitario “La Perseverancia”, Cuautla, Morelos.
29. Japan International Cooperation Agency (JICA) & Secretariat of the Pacific Regional Environment Programme (SPREP). (2010). A practical guide to landfill management in Pacific Island countries and territories, Volume 1. In land based waste disposal.
30. Juárez, E y Rico, A. (2005). Mecánica de Suelos, México: Limusa.
31. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2014). Cuaderno estadístico y geográfico de la zona metropolitana del Valle de México 2013.
32. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). (2010). Sitios de disposición final reportados como destino de los residuos sólidos urbanos por entidad federativa .
33. K. Ham, R, University of Wisconsin–Madison. (2005). The Landfill As A Reactor: Biological and Chemical Processes. Baccini P.
34. Lobo, A., Szantó, M., & Llamas, S. (2015). Cierre, Sellado y Reinserción de Antiguos Vertederos. Experiencias en Iberoamérica.
35. Martín, S. & Universidad de Oviedo. (1997). Producción y Recuperación del Biogás en Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos: Análisis de Variables y Modelización.
36. Parra, N., Ovando Shelley, E., & Instituto de Ingeniería, UNAM. (2011). Aspectos Geotécnicos de los Rellenos Sanitarios en México. Pan–Am CGS.
37. Petts, J., Eduljee, G. 1993. Environmental Impact Assessment for Waste Treatment and disposal facilities
38. Quesada, L. (2017). Análisis de la Potencialidad de Ocurrencia de Vertederos Ilegales en la Isla de La Palma, España. Revista de Estudios Andaluces.
39. H. Ayuntamiento de Alvarado, Ver. (2002). Rediseño del sitio de disposición final de residuos municipales de la ciudad de Alvarado, Ver. Trabajo de campo para el Ayuntamiento de la misma ciudad.
40. Sánchez, J. (1993). Bosquejo Histórico de los Residuos Sólidos de la Ciudad de México. AMCRESPAC, México, D.F.
41. Santos, R., Contreras, A., & Rosa, E. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Cuba. (2019). Diseño de una planta para el tratamiento del lixiviado en el Vertedero de Sagua La Grande.
42. Science Direct, Villanueva–Estrada, R. E., & Rocha–Miller, R. (2019). Energy production from biogas in a closed landfill: A case study of Prados de la Montaña, Mexico City. En Sustainable Energy Technologies and Assessments (Vol. 31, pp. 236–244).
43. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), (2000). N–CTR–CAR–1–02–002/00, 02. Estructuras, 002. Zampeado
44. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), (2000). N–CTR–CAR–1–03–006/00, 03. Drenaje y Subdrenaje, 006. Lavaderos
45. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), (2009). N–CTR–CAR–1–03–014/09, 03. Drenaje y Subdrenaje, 014. Alcantarillas de Tubos Corrugados de Polietileno de Alta Densidad

46. Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (1996). Manual para la Rehabilitación y Clausura de Tiraderos a Cielo Abierto.
47. Secretaría De Seguridad Y Protección Ciudadana. Centro Nacional De Prevención De Desastres (CENAPRED). Sánchez, J. (2021). Guía Para El Control De Incendios En Vertederos De Residuos Sólidos.
48. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Dr. en Ing. Günther Wehenpohl, Ing. Heredia Cantillana, P., & Ing. Hernández Barrios, C. P. (2006, enero). Manual para la Supervisión y Control de Rellenos Sanitarios. SEMARNAT.
49. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2004. Guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003.
50. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Dirección General de Fomento Ambiental Urbano y Turístico. Dirección de Manejo Sustentable de Residuos Sólidos. (2009). Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y Residuos de Manejo Especial (RME).
51. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). Diagnóstico Básico Para La Gestión Integral De Los Residuos del año 2020, (DBGIR, 2020).
52. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2019). Tiraderos a cielo abierto dañan ambiente y salud humana. <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/tiraderos-a-cielo-abierto-danan-ambiente-y-salud-humana?idiom=es>
53. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2001). Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales.
54. Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México. Portal de Consulta del Sistema Integral de Residuos del Estado de México (SIREM), 2021. <http://187.188.85.202:8095/consulta-sirem/>
55. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, Coordinación Nacional de Protección Civil Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2021). Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/44.pdf> <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/44.pdf>
56. Sistema Geológico Mexicano (SGM). Sismología de México. (2017). Recuperado el 20 de septiembre de 2020. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>
57. Sistema Nacional De Protección Civil Centro Nacional De Prevención De Desastres. (2012). Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/descargas/Metodologias/Hidrometeorologico.pdf>
58. Tchobanoglous, G. (1993). Integrated Solid Waste Management. Mc. Graw-Hill

59. Tchobanoglous, G. y Kreith, Frank. (2002). Handbook of solid waste management. Mc. Graw-Hill
60. Tejeda Cota, D. Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste, S.C. (2013). Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en la Ciudad de La Paz, B.C.S.: Estrategia para su Gestión y Recomendaciones para el Desarrollo Sustentable.
61. Walter, I. (2000). Evaluación del Desarrollo de la Vegetación Autóctona de un Suelo Degradado Tratado con Residuos Sólidos Urbanos. En R. Calvo, S. García, & G. Cuevas (Eds.), Ecología (Vol. 14, pp. 89–102).
62. Zhang, H. (2020). Study on the Internal Force of Geomembrane of Landfill in Heavy Metal Contaminated Area. Earth Sciences Research Journal, 24(1), 111–118. DOI: <https://doi.org/10.15446/esrj.v24n1.85231>

En la vida es necesario entender que no es mejor el que ha llegado, ni el que pretenda ser más que el otro. Sino que el mejor, siempre será el que hizo la vereda por donde andamos nosotros.

J. Armenta, 1999