



MINISTERIO DE
DESARROLLO PRODUCTIVO,
RURAL Y AGUA

VICEMINISTERIO
DE RECURSOS HÍDRICOS,
RIEGO, AGUA POTABLE Y
SANEAMIENTO BÁSICO

Guía Técnica para el DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN, Y CIERRE de Rellenos Sanitarios Mecanizados



Guía Técnica para el

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN, Y CIERRE

de Rellenos Sanitarios Mecanizados

Ministerio de Desarrollo Productivo, Rural y Agua

Viceministerio de Recursos Hídricos, Riego, Agua Potable y Saneamiento Básico

Autoridades:

Oscar Mario Justiniano Pinto, Ministro de Desarrollo Productivo, Rural y Agua

Viviana Mariscal Montaña, Viceministra de Recursos Hídricos, Riego, Agua Potable y Saneamiento Básico

Elaboración:

Marcela Joffre Pereira. Dirección General de Gestión Integral de Residuos

Sergio Mauricio Morales, Helvetas Swiss Intercooperation Bolivia

Reider Hipolito Cari, Consultor externo Helvetas Swiss Intercooperation Bolivia

Aportes y revisión:

Marco Antonio Quispe, Dirección General de Gestión Integral de Residuos

Mariana Daza von Boeck, Helvetas Swiss Intercooperation Bolivia

Diseño y Diagramación:

Mateo Merino Aguilar. Consultor externo Helvetas Swiss Intercooperation Bolivia

María Emilia Barea Schmidt. Consultor externo Helvetas Swiss Intercooperation Bolivia

Fotos en portada e interiores:

Proyecto Basura Cero en Bolivia, Helvetas Bolivia

Esta es una publicación realizada con el apoyo del Proyecto Basura Cero en Bolivia de la Agencia Sueca de Desarrollo Internacional (ASDI), que implementa Helvetas Swiss Intercooperation en asocio con Swisscontact y la Fundación Aguatuya.

Esta publicación debe estar citada como:

MDPRA/VRHRAPSB/DGGIR/ Guía para el diseño, operación, mantenimiento y cierre de rellenos sanitarios mecanizados, 2026.

La Paz, marzo 2025

Segunda edición: mayo 2026

Prólogo

El Estado Plurinacional de Bolivia, desde la Ley N° 755, de Gestión Integral de Residuos, ha optado como política motivar y profundizar acciones en la prevención, aprovechamiento, y la disposición final ambientalmente segura de los residuos.

En ese marco, planteamos acciones estratégicas que permitan al Estado Boliviano la consolidación de la gestión integral de residuos, mejorando las condiciones de aprovechamiento, generando oportunidades para la transformación de sitios contaminados a sitios más sostenibles brindando mejores condiciones de vida para las poblaciones aledañas.

Bajo los lineamientos del nivel central se ha promovido el desarrollo de programas y proyectos para la implementación de la gestión integral de residuos en diferentes municipios del país, así como mejorar, la operación de infraestructura para el tratamiento y disposición final de residuos en rellenos sanitarios mecanizados que respondan a las condiciones técnicas y operativas requeridas.

Esta guía se constituye en un instrumento de gestión para todos los municipios del país que aún no han iniciado estos procesos. Su contenido ha sido elaborado con base en las experiencias probadas en distintos municipios, por lo que su estructura técnica responde y se adapta a las necesidades y condiciones locales.

Esperamos que este documento sea empleado por autoridades y técnicos municipales y que al mismo tiempo sea un material que fortalezca las capacidades técnicas municipales destinadas a transitar hacia una gestión de residuos más eficiente.

Oscar Mario Justiniano Pinto

Ministro de Desarrollo Productivo, Rural, y Agua



Relleno Sanitario Mecanizado de San Miguel de los Junos, Santa Cruz



Índice de acrónimos

AL	Lagunas Aireadas
ASDI	Agencia Sueca de Cooperación Internacional para el Desarrollo
ASP	Activated Sludge Process
°C	Grados Celsius
CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
CC	Capacidad de Campo
CH₄	Gas Metano
cm	Centímetro
CO₂	Dióxido de Carbono
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
CPE	Constitución Política del Estado
CTR	Complejo de Tratamiento de Residuos
D	Diámetro
DBO₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días
DGGIR	Dirección General de Gestión Integral de Residuos
DP	Derecho Propietario
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DS	Decreto Supremo
Geotextil N.T	Geotextil No Tejido
GIRS	Gestión Integral de Residuos Sólidos
GPS	Global Positioning System
H	Altura
H°A°	Hormigón Armado
H°C°	Hormigón Ciclópeo
Hab	Habitantes
HDPE	Polietileno de Alta Densidad
HELP	Hydrologic Evaluation of Landfill Performance
HRT	Hydraulic Retention Time (Tiempo de Retención Hidráulica)
H₂S	Ácido Sulfhídrico
IBNORCA	Instituto Boliviano de Normalización y Calidad
ISWA	International Solid Waste Association
Kg	Kilogramo
Km	Kilómetros
m	Metros
mm	Milímetro
MBR	Bioreactores de Membrana
NB	Norma Boliviana
NH₃	Amoniaco
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPS	Organización Panamericana de la Salud
pH	Potencial de hidrógeno
PMP	Porcentaje de Marchitamiento Permanente
PPC	Producción Per Cápita
PV	Peso Volumétrico
RAB-138	Reglamento sobre Operación de Aeródromos
RBC	Reactores Biológicos Rotatorios
RM	Resolución Ministerial
RSM	Relleno Sólidos Municipales
s	Segundos
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SEV	Sondeo Eléctrico Vertical
t	Toneladas
Tubo F.G.	Tubería de fierro galvanizado

UASB
UTM

Upflow Anaerobic Sludge Blanket
Universal Transverse Mercator

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	23
2	Reacciones que se generan en un relleno sanitario	25
3	Marco legal de los rellenos sanitarios mecanizados	28
4	Marco conceptual	31
	4.1. Glosario de términos.....	31
	4.2. Clasificación de residuos	33
	4.3. Clasificación de los Rellenos Sanitarios.....	33
	4.4. Ventajas y restricciones de un relleno sanitario mecanizado	35
	4.5. Vinculación de los rellenos sanitarios mecanizados a los Complejos de Tratamiento de Residuos (CTR)	35
	4.6. Procesos de rehabilitación de botaderos a rellenos sanitarios	37
	4.7. Métodos de operación de un relleno sanitario mecanizado.....	37
	4.8. Etapas de implementación de un relleno sanitario.....	39
5	Condiciones para la selección de sitio	42
	5.1. Aspectos preliminares del diseño de relleno sanitario mecanizado.....	42
	5.1.1. <i>Proyección de la población.....</i>	<i>42</i>
	5.1.2. <i>Producción per-cápita y generación total de residuos sólidos.....</i>	<i>42</i>
	5.1.3. <i>Cálculo de área para relleno sanitario</i>	<i>43</i>
	5.2. Evaluación de sitios para la ubicación del relleno sanitario	45
	5.2.1. <i>Criterios generales.....</i>	<i>45</i>
	5.2.2. <i>Criterios de distancia.....</i>	<i>46</i>
	5.2.3. <i>Criterios espaciales.....</i>	<i>46</i>
	5.2.4. <i>Criterios técnicos</i>	<i>47</i>
	5.2.5. <i>Criterios Ambientales.....</i>	<i>47</i>
	5.2.6. <i>Criterios Económicos</i>	<i>47</i>
	5.2.7. <i>Criterios Sociales</i>	<i>48</i>
	5.2.8. <i>Criterios Legales.....</i>	<i>48</i>
	5.3. Análisis de alternativas y selección de la alternativa más conveniente	48
6	Estudios preliminares del diseño de relleno sanitario mecanizado	52
	6.1. Estudios básicos de ingeniería	52
	6.1.1. <i>Topografía</i>	<i>52</i>
	6.1.2. <i>Estudio geológico</i>	<i>52</i>
	6.1.3. <i>Estudio geotécnico.....</i>	<i>53</i>
	6.1.4. <i>Estudios hidrogeológicos</i>	<i>55</i>

6.1.5. Estudios hidrológicos	56
6.1.6. Condiciones climatológicas	57

7

Diseño de relleno sanitario mecanizado 59

7.1. Requerimiento volumétrico.....	59
7.2. Dimensionamiento de la macrocelda	60
7.3. Dimensionamiento de la celda diaria	61
7.4. Sistemas de captación, conducción y/o tratamiento de lixiviados.....	62
7.4.1. Estimación de la generación de lixiviados	63
7.4.2. Sistemas de drenaje de lixiviados.....	66
7.4.3. Almacenamiento de lixiviados.....	68
7.4.4. Tratamiento de lixiviados.....	69
7.5. Manejo del biogás	73
7.6. Vías de acceso internas y externas	74
7.7. Drenaje pluvial	75
7.7.1. Dimensionamiento de zanjas de interceptación	79
7.7.2. Interceptación de aguas superficiales al interior del relleno.....	80
7.8. Cerco perimetral	82
7.9. Cerco vivo o áreas de amortiguamiento	82
7.10. Caseta de control o vigilancia.....	83
7.11. Balanza	83
7.12. Otras áreas del relleno sanitario mecanizado.....	83
7.13. Alternativa rellenos sanitarios secos o semi-secos.....	85
7.14. Alternativas de rellenos sanitarios semiaerobios “Fukuoka”.....	85

8

Construcción relleno sanitario mecanizado..... 88

8.1. Preparación del terreno.....	88
8.2. Criterios generales para la construcción de celdas	90
8.2.1. Barrera geológica	90
8.2.2. Capa base.....	90
8.2.3. Uso de geosintéticos	94
8.2.4. Letrero de obra	96
8.2.5. Construcción cerco perimetral	96
8.2.6. Canal perimetral.....	97
8.2.7. Caseta de seguridad	97
8.2.8. Instalaciones sanitarias y eléctricas	98
8.2.9. Seguridad y estabilidad del relleno sanitario	98
8.2.10. Muros de contención	98
8.2.11. Construcción de drenajes pluviales.....	98
8.2.12. Construcción de franja de amortiguamiento..	99

9

Operación de relleno sanitario mecanizado 100

9.1. Personal.....	100
9.2. Equipamiento y vehículos requeridos.....	102
9.2.1. Estimación de requerimientos de maquinaria para	

	<i>la construcción de las celdas en un relleno sanitario mecanizado</i>	111
9.3.	Herramientas	112
9.4.	Métodos de operación del relleno sanitario mecanizado.....	113
	<i>9.4.1. Construcción de la celda diaria de operación mecanizada</i>	116
	<i>9.4.2. Calendarización de la celda</i>	116
	<i>9.4.3. Delimitación de la celda</i>	117
	<i>9.4.4. Recepción y descarga de residuos sólidos</i>	118
	<i>9.4.5. Distribución de residuos</i>	118
	<i>9.4.6. Compactación de residuos</i>	119
	<i>9.4.7. Cobertura diaria</i>	120
	<i>9.4.8. Cobertura final terrea</i>	120
	<i>9.4.9. Cobertura final con carpeta vegetal</i>	121
9.5.	Manejo de lixiviados	123
9.6.	Manejo de biogás	123
9.7.	Manejo de sistemas de drenaje pluvial	123
9.8.	Operación en época de lluvias	123
9.9.	Celda de residuos bioinfecciosos	125
9.10.	Plan de operación	125
10	Mantenimiento del relleno sanitario	127
	10.1. Mantenimiento de maquinaria	128
11	Prevención de incendios en rellenos sanitarios mecanizados	130
12	Monitoreo y control de operaciones del relleno sanitario mecanizado	134
	12.1. Monitoreo a la vida útil	134
	12.2. Monitoreo de compactación.....	134
	12.3. Monitoreo a la cobertura diaria.....	134
	12.4. Monitoreo a la generación y calidad de lixiviados	135
13	Monitoreo del relleno sanitario mecanizado	136
	13.1. Monitoreo.....	136
	13.2. Control.....	139
14	Cierre de relleno sanitario mecanizado	140
	14.1. Reconformación del relleno / talud	142
	14.2. Post uso de la infraestructura y equipamiento existente	143
	14.3. Controles posteriores al cierre del relleno sanitario...143	
15	Post clausura de relleno sanitario mecanizado	144
	Bibliografía	144

Índice de tablas

Tabla 1.	Normas técnicas aprobadas mediante resolución sobre residuos sólidos.....	30
Tabla 2.	Características de los rellenos sanitarios según su tipología	34
Tabla 3.	Formato de tabla de proyección de generación de residuos.....	43
Tabla 4.	Cálculo de área para relleno sanitario.....	44
Tabla 5.	Densidad celda diaria referencial	45
Tabla 6.	Puntajes asignados a parámetro (a)	49
Tabla 7.	Puntajes asignados a parámetro (b).....	49
Tabla 8.	Rangos de puntaje total.....	49
Tabla 9.	Análisis de factores y parámetros para la identificación de sitios	50
Tabla 10.	Estudios y análisis previos requeridos para rellenos sanitarios mecanizados	52
Tabla 11.	Densidad de acuerdo con el grado de compactación	59
Tabla 12.	Valores recomendados del coeficiente “k”	66
Tabla 13.	Tipología de tratamiento de lixiviados	69
Tabla 14.	Velocidades por tipo de material.....	76
Tabla 15.	Valores empíricos para obtener el coeficiente de escurrimiento (k)	77
Tabla 16.	Coeficiente de retraso	78
Tabla 17.	Pendientes típicas de taludes en zanjas no revestidas.....	78
Tabla 18.	Coeficiente de rugosidad	79
Tabla 19.	Parámetros para la capa mineral de base	91
Tabla 20.	Personal propuesto para relleno sanitario mecanizado	101
Tabla 21.	Equipamiento mínimo requerido para un relleno sanitario mecanizado	103
Tabla 22.	Coeficiente de gestión.....	105
Tabla 23.	Tipo de terreno	110

Tabla 24.	Coefficiente de transformación.....	110
Tabla 25.	Tiempo de duración del ciclo en segundos por tipo de terreno.....	110
Tabla 26.	Uso de las herramientas en el relleno sanitario.....	112
Tabla 27.	Cuadro de selección de método de trabajo	114
Tabla 28.	Proyección ingreso de residuos	134
Tabla 29.	Proyección ingreso de residuos	134
Tabla 30.	Proyección material de cobertura (MC), residuos + MC.....	135
Tabla 31.	Parámetros y frecuencias referenciales para el monitoreo de aguas.....	137
Tabla 32.	Parámetros de monitoreo del aire	138
Tabla 33.	Parámetros de monitoreo del suelo	138

Índice de figuras

Figura 1.	Jerarquización de la gestión integral de residuos sólidos.	23
Figura 2.	Evolución en el mejoramiento de la disposición final de Residuos Sólidos Municipales.....	24
Figura 3.	Características del gas y lixiviado de un relleno sanitario	26
Figura 4.	Residuos admitidos en rellenos sanitarios mecanizados.	33
Figura 5.	Diagrama de un relleno sanitario.....	33
Figura 6.	Clasificación de rellenos sanitarios.....	34
Figura 7.	Ventajas y restricciones de los rellenos sanitarios.....	35
Figura 8.	Planimetría del complejo de tratamiento de residuos de del municipio de La Guardia	36
Figura 9.	Requisitos generales para rehabilitar un botadero a un relleno sanitario	37
Figura 10.	Método de trinchera	38
Figura 11.	Método de área	38
Figura 12.	Método combinado (área y trinchera).....	39
Figura 13.	Etapas para la implementación de un relleno sanitario mecanizado	39
Figura 14.	Flujograma de procedimientos para el diseño y construcción de un relleno sanitario	40
Figura 15.	Coefficiente de permeabilidad k (cm/s)	54
Figura 16.	Recomendaciones técnicas para la protección de acuíferos.....	54
Figura 17.	Ciclo de los lixiviados.....	57
Figura 18.	Condiciones de la celda.....	58
Figura 19.	Geometría de prismoides.....	60
Figura 20.	Zanjas y drenes de lixiviados.....	67
Figura 21.	Distribución de sistema de drenaje de lixiviados.....	68
Figura 22.	Criterios de precipitación y evapotranspiración para la selección de sistemas de almacenamiento de lixiviados	68
Figura 23.	Sistema de almacenamiento de lixiviados.....	69
Figura 24.	Lagunas de estabilización	70

Figura 25.	Construcción referencial de chimeneas	73
Figura 26.	Esquema de sistema de drenaje pluvial	76
Figura 27.	Esquema de drenaje pluvial (Zanjas)	80
Figura 28.	Direccionamiento de las aguas lluvias en la superficie del relleno sanitario	81
Figura 29.	Cerco perimetral de malla olímpica	82
Figura 30.	Detalle cerco vivo	82
Figura 31.	Balanza electrónica	83
Figura 32.	CRETIB	84
Figura 33.	Almacenamiento residuos domésticos peligrosos.....	84
Figura 34.	Relleno sanitario semi-seco.....	85
Figura 35.	Rellenos sanitarios tradicionales vs Fukuoka	86
Figura 36.	Imagen esquemática de corte talud-banquina para emplazamiento en terrenos ondulados	89
Figura 37.	Importancias de las barreras geológicas.....	90
Figura 38.	Construcción de capa base CON barrera natural.....	91
Figura 39.	Construcción de capa base SIN barrera natural	93
Figura 40.	Sistema de impermeabilización sintética	95
Figura 41.	Anclaje geomembrana	95
Figura 42.	Cerco perimetral con malla olímpica.....	96
Figura 43.	Vista frontal y en planta - Caseta de control.....	97
Figura 44.	Bulldózer o tractor de orugas con hoja tapadora.....	104
Figura 45.	Compactador con ruedas metálicas	105
Figura 46.	Cargador neumático	106
Figura 47.	Cargador de ruedas.....	107
Figura 48.	Excavador de orugas.....	108
Figura 49.	Retroexcavadora.....	109
Figura 50.	Camión volqueta.....	110
Figura 51.	Casos de inestabilidad del suelo y del cuerpo de basura	115

Figura 52.	Los 8 pasos en la operación de celdas de un relleno sanitario mecanizado	116
Figura 53.	Ejemplo de desarrollo de un relleno sanitario en varias fases, estudio de preinversión del GAM Oruro	117
Figura 54.	Descarga de residuos sólidos	118
Figura 55.	Distribución y conformación de residuos en celda	118
Figura 56.	Compactación de residuos	119
Figura 57.	Recomendaciones en un crecimiento vertical de celdas.....	119
Figura 58.	Cobertura diaria de celda	120
Figura 59.	Cobertura final terrea	121
Figura 60.	Cobertura final con carpeta vegetal	121
Figura 61.	Beneficios de la cubierta intermedia de residuos.....	122
Figura 62.	Manejo y cobertura de las celdas	122
Figura 63.	Acciones en épocas de lluvias	124
Figura 64.	Acciones preventivas y de contingencia, en épocas de lluvia.....	124
Figura 65.	Componentes del plan de operación	126
Figura 66.	Mantenimiento de áreas verdes.....	128
Figura 67.	Niveles de incendios en disposición final.....	130
Figura 68.	Proceso de detección y seguimiento a incendios.....	131
Figura 69.	Control de propagación del incendio	132
Figura 70.	Métodos de control y eliminación de incendios	133
Figura 71.	Capa final de la celda.....	140
Figura 72.	Construcción de capa impermeable	141
Figura 73.	Aplicación de capa de humus.....	141
Figura 74.	Arborización	141
Figura 75.	Inestabilidad que pasa por el pie del talud con un suelo de fundación rígida	142
Figura 76.	Inestabilidad que pasa por debajo del pie del talud con un suelo de fundación blando	143



Relleno Sanitario Mecanizado "El Ingenio", El Alto

1. Introducción

Durante siglos los residuos de las poblaciones se han eliminado en forma indiscriminada, creando promontorios de gran volumen en las cercanías de las ciudades. Como la mayoría de los residuos eran orgánicos, la naturaleza terminaba incorporándolos naturalmente al suelo, teniendo como consecuencia lo que se podría llamar una mínima contaminación. Con el tiempo, al tener un crecimiento bastante notorio de los asentamientos humanos, comenzaron a aparecer botaderos en los que la basura se tapaba con tierra, pero sin controles que evitaran la contaminación del suelo y las reservas de agua que están en el mismo. A partir de ello es que surge el método de relleno sanitario, el cual es una técnica de disposición final de residuos sólidos que no necesita gran cantidad de recursos humanos y económicos para su ejecución en los pequeños pueblos o ciudades (Fernández, 2010).

Tomando en cuenta las limitaciones tecnológicas y económicas que tienen los países en vías de desarrollo, la Organización Panamericana de la Salud (OPS) ha realizado estudios de factibilidad en los cuales recomienda la implementación de rellenos sanitarios parcialmente mecanizados o denominados mecanizados, ya que dichas técnicas pueden ser aplicadas a poblaciones mayores.

Así, el relleno sanitario mecanizado se presenta como una alternativa técnica y económica para poblaciones urbanas y rurales que generen entre diez y cuarenta toneladas diarias de residuos.

Mediante la técnica de operación mecanizada se requiere periódicamente de equipo pesado para la adecuación del sitio, la construcción de vías internas y excavación de zanjas o material de cobertura, lo cual permite a poblaciones intermedias, optimizar sus recursos económicos y técnicos, a través del empleo temporal programado de equipos y maquinaria específica, a fin de mantener y controlar la disposición final adecuada de los residuos.

La gestión integral de residuos (GIRS) conlleva a la selección y aplicación de técnicas, tecnologías y programas idóneos para lograr metas y objetivos específicos de gestión de residuos. En esta gestión se enmarca una jerarquía diseñada con la perspectiva de prevención dejando la disposición final como última alternativa, promoviendo la reducción y minimización como primer rango de la gestión integral, situación que se observa en la figura 1.



La gestión integral de residuos – GIRS, se constituye en una estrategia que en el contexto del desarrollo local moviliza a todos los actores en torno al logro de objetivos comunes, relacionados con el fortalecimiento de la capacidad de gestión, ya sea comunitaria o municipal. La GIRS va dirigida a responder a la problemática de los residuos mediante soluciones via-

bles y sostenibles, así como también por medio de la adopción de tecnologías apropiadas, la participación de las comunidades en todos los aspectos del manejo de los residuos y en el cuidado responsable del ambiente. Todo ello va encaminado a incidir positivamente en la salud pública en la comunidad, en el municipio y en el país (Jaramillo, 2002).

La gestión de los residuos sólidos, poniendo énfasis en el vertido controlado (conocido también como “vertido sanitario controlado”), empezó a principios de los años cuarenta en los Estados Unidos, siendo Nueva York y California las ciudades pioneras. Con la finalidad de regular y controlar la disposición de los residuos, se establecieron normativas “estandar” para los botaderos controlados municipales y se desarrollaron campañas para la eliminación de botaderos convencionales, es así como se establecieron normativas estándar para los botaderos controlados municipales y se llevaron campañas para la eliminación de botaderos convencionales (Tchobanoglous, 1994). En la Figura 2, se puede observar de manera descriptiva la evolución de los métodos de disposición.

Figura 2. Evolución en el mejoramiento de la disposición final de Residuos Sólidos Municipales



Fuente: Elaboración propia en base a Tchobanoglous, 1994.

En consecuencia, la disposición final es la última etapa operacional de la gestión de residuos sólidos, es la instalación destinada a la disposición sanitaria y ambientalmente segura de los residuos sólidos en la superficie o bajo tierra, de acuerdo con principios y métodos de la ingeniería sanitaria y ambiental. No obstante, tomando en cuenta el principio de la jerarquización, hoy en día, la disposición final de los residuos sólidos es el último destino de estos.

2. Reacciones que se generan en un relleno sanitario

Cambios físicos. Los cambios físicos más importantes están asociados con la compactación de los residuos sólidos municipales; la difusión de gases dentro y fuera del relleno sanitario; el ingreso de agua y el movimiento de líquidos en el interior y hacia el subsuelo; los asentamientos causados por la consolidación y descomposición de la materia orgánica depositada.

Reacciones químicas. Las reacciones químicas que ocurren dentro del relleno sanitario e incluso en los botaderos abarcan la disolución y suspensión de materiales y productos de conversión biológica en los líquidos que se infiltran a través de la masa de residuos; la evaporación de compuestos químicos y agua, la adsorción de compuestos orgánicos volátiles, la deshalogenación y descomposición de compuestos orgánicos y las reacciones de óxido-reducción que afectan la disolución de metales y sales metálicas (la importancia de la descomposición de los productos orgánicos reside en que estos materiales pueden ser transportados fuera del relleno sanitario o del botadero de basura con los lixiviados).

Reacciones biológicas. Las más importantes reacciones biológicas que ocurren en los rellenos sanitarios son realizadas por los microorganismos aerobios y anaerobios, y están asociadas con la fracción orgánica contenida en estos. El proceso de descomposición empieza con la presencia del oxígeno (fase aerobia); una vez que los residuos son cubiertos, el oxígeno empieza a ser consumido por la actividad biológica. Durante esta fase se genera principalmente dióxido de carbono. Una vez consumido el oxígeno, la descomposición se lleva a cabo sin él (fase anaerobia) durante la cual, la materia orgánica se transforma en dióxido de carbono, metano y cantidades traza de amoníaco y ácido sulfhídrico.

Líquido lixiviado o percolado. Son líquidos que se generan por la liberación del exceso de agua de los residuos sólidos y por la percolación de agua pluvial a través de los estratos de residuos sólidos que se encuentran en las fases de descomposición. El lixiviado es considerado como el principal y gran contaminante generado en un relleno.

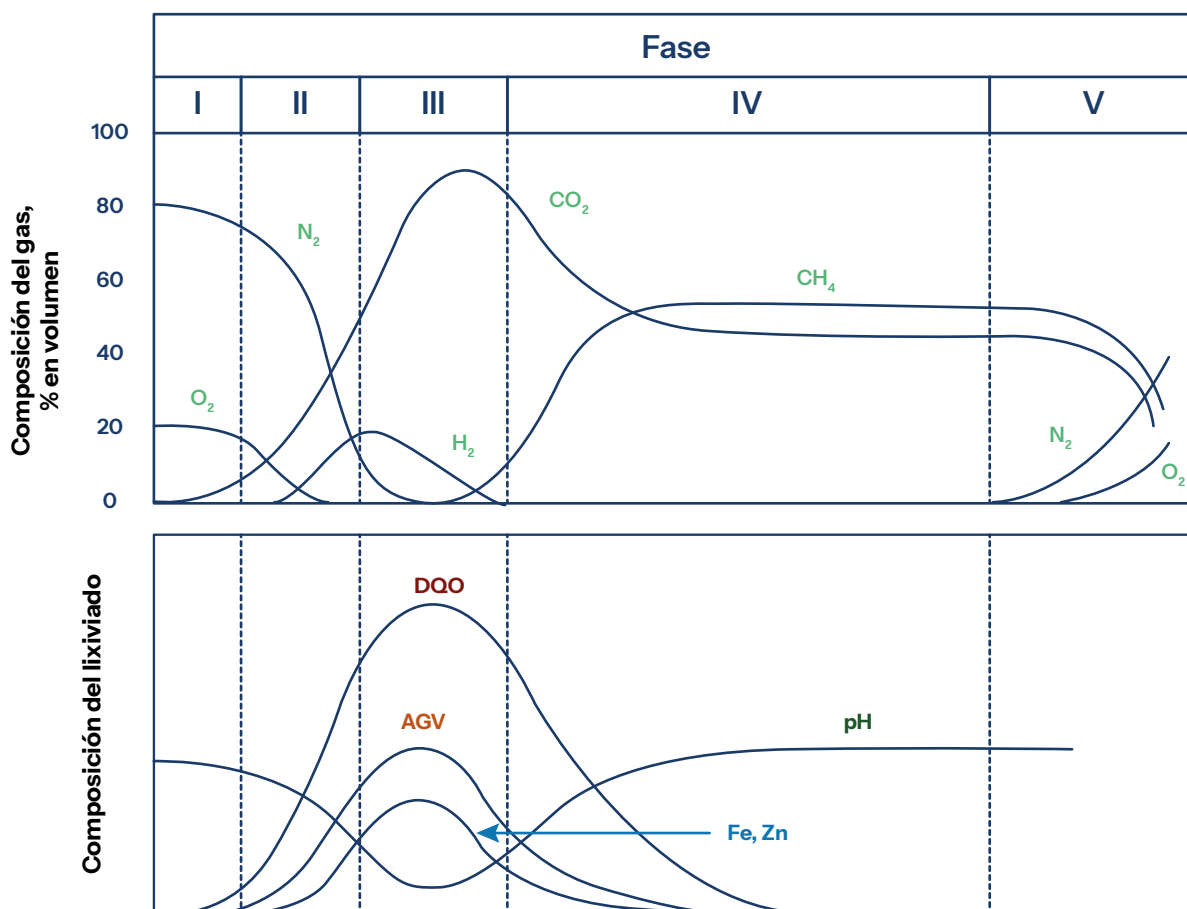
Las aguas de lluvia que atraviesan las capas de residuos aumentan su volumen en una proporción mucho mayor que la que producen los residuos, de ahí la importancia de interceptarlas y desviarlas para evitar el incremento de lixiviado, de lo contrario, podría haber problemas en la operación del relleno y contaminación en las corrientes y nacimientos de agua y pozos vecinos.

Gases. Un relleno sanitario se comporta como un digestor anaerobio. Debido a la descomposición o putrefacción natural de los residuos, no solo se producen líquidos sino también gases y otros compuestos. La descomposición de la materia orgánica por acción de los microorganismos presentes en el medio tiene dos etapas: aerobia y anaerobia. La aerobia es aquella fase en la cual el oxígeno que está presente en el aire contenido en los intersticios de la masa de residuos enterrados es consumido rápidamente; y la anaerobia es la que predomina en el relleno sanitario porque no pasa el aire y no existe circulación de oxígeno, de ahí la producción de cantidades apreciables de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), así como trazas de gases de olor punzante, como el ácido sulfhídrico (H_2S), amoníaco (NH_3) y mercaptanos. Cuando el gas metano se acumula en el interior del relleno y migra a las áreas vecinas, puede generar riesgos de explosión. Por lo tanto, se recomienda una adecuada ventilación de este gas, aunque en los pequeños rellenos este no es un problema muy significativo.

La biodegradación de los residuos sólidos sigue un esquema de cinco etapas en su proceso, las cuales se basan en consideraciones teóricas.

- **Fase I: Aeróbica.-** Inicia inmediatamente después de la disposición de los residuos sólidos en el relleno sanitario y en la que las sustancias fácilmente biodegradables se descomponen por la presencia de oxígeno y se propicia la formación de dióxido de carbono (CO_2), agua, materia parcialmente descompuesta registrando temperaturas entre 35 y 40 °C.
- **Fase II: Aeróbica - Transición.-** Comienza a descender la concentración de oxígeno, con el desarrollo de condiciones anaeróbicas en la que ocurre el proceso de Fermentación, actúan los organismos facultativos con la producción de ácidos orgánicos y la reduce significativamente el pH, condiciones propicias para la liberación de metales en el agua y la generación de dióxido de carbono (CO_2).
- **Fase III: Anaeróbica - Ácida.-** Resultado de la acción de organismos formadores de metano (CH_4), que, en las condiciones adecuadas, actúan lenta y eficientemente en la producción de este gas mientras reducen la generación de dióxido de carbono (CO_2), el valor de pH llegará a 5 o menos, la conductividad se incrementa por la disolución de ácidos orgánicos, los valores de carga orgánica se incrementan.
- **Fase IV: Metanogénica estable.-** Registra la más alta producción de metano oscilando entre 40-60% de metano (CH_4) en volumen, los Ácidos Grasos Volátiles en el lixiviado se descomponen inmediatamente en biogás, por las condiciones anaeróbicas los lixiviados tendrán alta concentración de amoníaco, los valores de pH se neutralizan y la conductividad se reduce
- **Fase V: Estabilización - Maduración.-** La producción de metano (CH_4) comienza a disminuir y la presencia de aire atmosférico introduce condiciones aeróbicas en el sistema, disminuye a humedad y la conversión del material biodegradable.

Figura 3. Características del gas y lixiviado de un relleno sanitario



Fuente: Elaboración propia en base a Tchobanoglous, 1994

Estas fases afectan la composición del biogás, y la duración de cada fase se encuentra determinada por las condiciones climáticas y los factores operativos del relleno sanitario.

Las Fases I y II pueden durar desde varias semanas hasta dos años (o más), favoreciendo el proceso de biodegradación, las altas temperaturas de aire ambiente, la alta compactación y la disposición de residuos en capas delgadas y celdas pequeñas, reduciendo el tiempo transcurrido para estas fases.

Las Fases III y IV tienen una duración aproximada de unos cinco años, en función de la operación del relleno sanitario y, en particular, de la cantidad de humedad de los residuos sólidos dispuestos, debido a que el alto contenido de humedad incrementará significativamente las reacciones biológicas, reduciendo el tiempo transcurrido en las Fases III y IV y, por tanto, aumentando la cantidad de biogás generado con el tiempo.

La Fase V puede tener una duración de varias décadas, hasta que los residuos dispuestos logren finalmente la estabilización, depende en gran medida de las medidas adoptadas en la operación del relleno sanitario para garantizar el aumento de su tiempo de vida útil (Camargo, 2009).



3. Marco legal de los rellenos sanitarios mecanizados

El ordenamiento jurídico establecido y vigente en el país para el diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios mecanizados, como la construcción de rellenos sanitarios, debe ser de cumplimiento por las Entidades Territoriales Autónomas.

Constitución Política del Estado Plurinacional de Bolivia, enero 2009:

En los artículos pertinentes establece:

Artículo 33:

Determina que las personas tienen derecho a un medio ambiente saludable protegido y equilibrado.

Artículo 299:

II. Las siguientes competencias se ejercerán de forma concurrente por el nivel central del Estado y las entidades territoriales autónomas:

1. Preservar, conservar y contribuir a la protección del medio ambiente y fauna silvestre manteniendo el equilibrio ecológico y el control de la contaminación ambiental.

Artículo 302:

I. Son competencias exclusivas de los gobiernos municipales autónomos, en su jurisdicción:

Aseo urbano, manejo y tratamiento de residuos sólidos en el marco de la política del Estado.

En ese sentido, en el marco de sus competencias la operación de los rellenos sanitarios es responsabilidad de los Gobiernos Autónomos Municipales, pudiendo realizarla de manera directa, desconcentrada o terciarizada buscando preservar, conservar y contribuir a la protección del medio ambiente y fauna silvestre, manteniendo el equilibrio ecológico y el control de la contaminación.

Ley N° 1333 de Medio Ambiente. Aprobado el 27 de abril de 1992, establece los lineamientos para regular las acciones antropogénicas con respecto al medio ambiente, enfocadas a lograr el desarrollo sostenible, son los siguientes artículos:

Artículo 17:

Es deber del Estado y la sociedad, garantizar el derecho que tiene toda persona y ser viviente a disfrutar de un ambiente sano y agradable en el desarrollo y ejercicio de sus actividades.

Ley N° 755 de Gestión Integral de Residuos. Aprobada el 28 de octubre de 2015 tiene por objeto “establecer la política general y el régimen jurídico de la Gestión Integral de Residuos en el Estado Plurinacional de Bolivia, priorizando la prevención para la reducción de la generación de residuos, su aprovechamiento y disposición final sanitaria y ambientalmente segura, en el marco de los derechos de la Madre Tierra, así como el derecho a la salud y a vivir en un ambiente sano y equilibrado”.

Artículo 9:

Cierre de botaderos y remediación de sitios contaminados generados por la gestión inadecuada de los residuos, y la implementación de rellenos sanitarios para la disposición final ambiental y sanitariamente segura de los mismos.

Artículo 31:

La disposición final de los residuos, debe realizarse en rellenos sanitarios u otras instalaciones de confinamiento, las mismas que deben contar con la infraestructura y equipamiento acorde al tipo de residuo, cantidad y volumen, cumpliendo todas las condiciones técnicas, ambientales y de seguridad durante su construcción, operación y cierre. Estas instalaciones deberán funcionar prioritariamente para residuos no aprovechables.

En síntesis, la disposición final de los residuos debe realizarse en rellenos sanitarios u otras instalaciones de confinamiento, las mismas que deben contar con la infraestructura y equipamiento acorde al tipo de residuo, cantidad y volumen, cumpliendo todas las condiciones técnicas, ambientales y de seguridad en el marco de los derechos de la Madre Tierra, así como el derecho a la salud y a vivir en un ambiente sano y equilibrado.

Reglamento General de la Ley N° 755 de Gestión Integral de Residuos. Aprobado mediante Decreto Supremo el 19 de octubre de 2016 tiene por objeto “reglamentar la Ley N°755 de 28 de octubre de 2015, de Gestión Integral de Residuos, para su implementación en observancia al derecho de la salud, al vivir en un ambiente sano y equilibrado, así como los derechos de la Madre Tierra”.

Artículo 68:

- i. El diseño de los rellenos sanitarios estará en función de las características y cantidades de los residuos, sus fluctuaciones y estimaciones para el futuro.
- ii. En función a la cantidad y tipo de residuos a disponer, los rellenos sanitarios deberán contar con el personal, maquinaria, equipos y sistemas de control necesarios.

En resumen, la operación de los rellenos sanitarios debe garantizar el personal, maquinaria y equipos suficientes que permitan su correcto funcionamiento, así mismo los sistemas de control en observancia al derecho de la salud, al vivir en un ambiente sano y equilibrado, así como los derechos de la Madre Tierra.

Otros documentos referenciales.

Las normas técnicas sobre saneamiento básico para la optimización de parámetros en la gestión de residuos, se detallan a continuación:

Tabla 1. Normas técnicas aprobadas mediante resolución sobre residuos sólidos.

Número	Descripción
NB - 742	Terminología sobre residuos sólidos y peligrosos.
NB - 743	Determinación de parámetros e indicadores de diseño sobre residuos sólidos municipales.
NB - 744	Preparación de muestras para su análisis de laboratorio.
NB - 745	Determinación de humedad.
NB - 746	Determinación de cenizas.
NB - 747	Determinación de pH - método de potenciómetro.
NB - 748	Determinación de nitrógeno total.
NB - 749	Determinación de azufre.
NB - 750	Determinación de poder calorífico superior.
NB - 751	Determinación de materia orgánica.
NB - 752	Determinación de relación carbono - nitrógeno.
NB - 753	Prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
NB - 754	Residuos sólidos - Procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos sólidos considerados peligrosos.
NB - 755	Residuos sólidos - Parte 1: Basureros diferenciados - Requisitos que deben cumplir para su diseño y ubicación en vías y áreas públicas.
NB - 756	Residuos sólidos - Recipientes para el almacenamiento de residuos sólidos domésticos y asimilables a domésticos - Requisitos.
NB - 757	Medio ambiente - Características que deben reunir los sitios para ubicar sistemas de disposición final de residuos sólidos municipales.
NB - 758	Residuos sólidos - Características, listados y definición de residuos peligrosos.
NB - 759	Medio ambiente - Características que deben reunir los sitios para ubicar sistemas de disposición final de residuos peligrosos (excepto para residuos radioactivos).
NB - 760	Medio ambiente - Requisitos para el diseño, construcción, operación y monitoreo de un relleno sanitario.

Fuente: Adaptado de IBNORCA.

De la Tabla 1, las principales normas técnicas y vigentes relacionadas con la disposición final de los residuos sólidos son la NB 757 y NB 760.

4. Marco conceptual

4.1. Glosario de términos

Biogás. Gas combustible que se forma a partir de la descomposición de materia orgánica, compuesto principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), pero suele tener otros compuestos, los cuales actúan como impurezas.

Botadero. Lugar de disposición final de residuos que no cumple con normas técnicas, ni disposiciones ambientales vigentes, creando o pudiendo crear riesgos sanitarios o ambientales.

Celda. Es el bloque unitario de construcción de un relleno sanitario.

Cierre técnico de botaderos. Sellado de un botadero cumpliendo las condiciones establecidas en la normativa técnica correspondiente.

Clausura. Suspensión definitiva de un sitio de disposición final o instalación de tratamiento de residuos, por no cumplir con los requisitos que establezca la normativa técnica correspondiente.

Complejo de Tratamiento de Residuos (CTR). Las instalaciones que incluyan dentro de sus componentes el tratamiento de residuos orgánicos, reciclables y la disposición final sanitaria y ambientalmente segura de los residuos no aprovechables.

Disposición final. Etapa de la gestión operativa de los residuos que consiste en depositar de forma permanente los residuos en un espacio físico.

Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS). Sistema conformado por procesos de planificación, desarrollo normativo, organización, sostenibilidad financiera, gestión operativa, ambiental, educación y desarrollo comunitario para la prevención, reducción, aprovechamiento y disposición final de residuos, en un marco de protección a la salud y el medio ambiente.

Jerarquización de la gestión los residuos sólidos. Se define como la priorización de acciones dentro de la gestión integral de los residuos sólidos: para reducir la generación de residuos, maximizar el aprovechamiento de los residuos y minimizar la disposición final de los residuos.

Lixiviado. Líquido resultante de la descomposición del residuo orgánico dispuesto en el sitio de disposición final, así como de la infiltración del agua pluvial a través de los residuos y que puede generar contaminación.

Manejo adecuado. Son aquellas acciones realizadas por el generador, mediante el almacenamiento, separación y entrega de sus residuos a un operador autorizado, o su recolección y transporte hacia las instalaciones de tratamiento y/o disposición final cuando corresponda, en el marco de la normativa vigente.

Plan de cierre de las instalaciones de disposición final. Se entiende que el cierre comprende las actividades preliminares, y el post cierre a las actividades después del cierre, por lo que el plan debe confrontar las siguientes cuestiones, un diagnóstico de la situación actual y proyecto de cierre.

Plan de Pos Cierre. Conjunto de actividades ejecutadas posterior al cierre de un relleno sanitario, para el mantenimiento de las instalaciones relacionadas con el sitio de disposición final.

Riesgo. Probabilidad o posibilidad de que el manejo, la liberación al ambiente y la exposición aun material o residuo, ocasionen efectos adversos en la salud humana, en los demás organismos vivos, en el agua, aire, suelo, en los ecosistemas, o en los bienes y propiedades pertenecientes a los particulares.

Recuperador o Reciclador. Persona natural o jurídica que realiza actividades de recuperación de residuos en vías o áreas públicas para su aprovechamiento.

Relleno sanitario manual. Es la obra de ingeniería, cuyo funcionamiento se desarrolla de forma manual, en el cual sólo se requiere maquinaria para obras de mejoramiento o ampliación de las instalaciones, así como para la extracción, traslado o distribución de material de cobertura y sistemas complementarios.

Relleno sanitario semi-mecanizado. Es aquel sitio, en el que se requiere maquinaria convencional compacta, en el frente de trabajo, para realizar funciones de extendido, extracción, traslado, distribución de material de cobertura, construcción de drenes, obras complementarias, asimismo para el mejoramiento y ampliación de los sistemas complementarios.

Relleno sanitario mecanizado. Es aquel sitio, en el que se requiere de forma permanente maquinaria especializada en el frente de trabajo, para realizar funciones de extendido, compactado, extracción, traslado, distribución de material de cobertura, construcción de drenes, obras complementarias, asimismo para el mejoramiento y ampliación de los sistemas complementarios.

Relleno de seguridad. Instalación o infraestructura que cumple con las condiciones técnicas, sanitarias y ambientales donde pueden depositarse o confinarse residuos con características de peligrosidad previo tratamiento.

Remediación. Conjunto de medidas a las que se someten los sitios contaminados para eliminar o reducir los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos.

Residuos sólidos. Materiales en estado sólido o semisólido de características no peligrosas, especiales o peligrosas, generados en procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control, reparación o tratamiento, cuyo generador o poseedor decide o requiere deshacerse de estos, y pueden ser susceptible de aprovechamiento o requieren sujetarse a procesos de tratamiento o disposición final.

Sitio Contaminado. Área, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de éstos que ha sido modificada en sus características naturales por efecto de residuos que, por sus cantidades y características, representan un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes de las personas.

Sostenibilidad de la gestión integral de residuos sólidos. Se define como el proceso de planificar, ejecutar, controlar y mejorar la gestión integral de residuos sólidos, en base a criterios técnicos, económicos, sociales y ambientales de tal forma que pueda garantizarse su desarrollo y continuidad en el tiempo.

Vector. Cualquier material u organismo que pueda servir como vehículo transmisor de enfermedades a humanos o animales.

4.2. Clasificación de residuos

La Ley 755 clasifica por sus características, en residuos no peligrosos, especiales y peligrosos. Por su fuente de generación, se clasifican en residuos municipales e industriales, finalmente, por su gestión operativa, se clasifican en residuos municipales, especiales y peligrosos. En ese sentido los residuos admitidos para un relleno sanitario mecanizado son:

Figura 4. Residuos admitidos en rellenos sanitarios mecanizados.

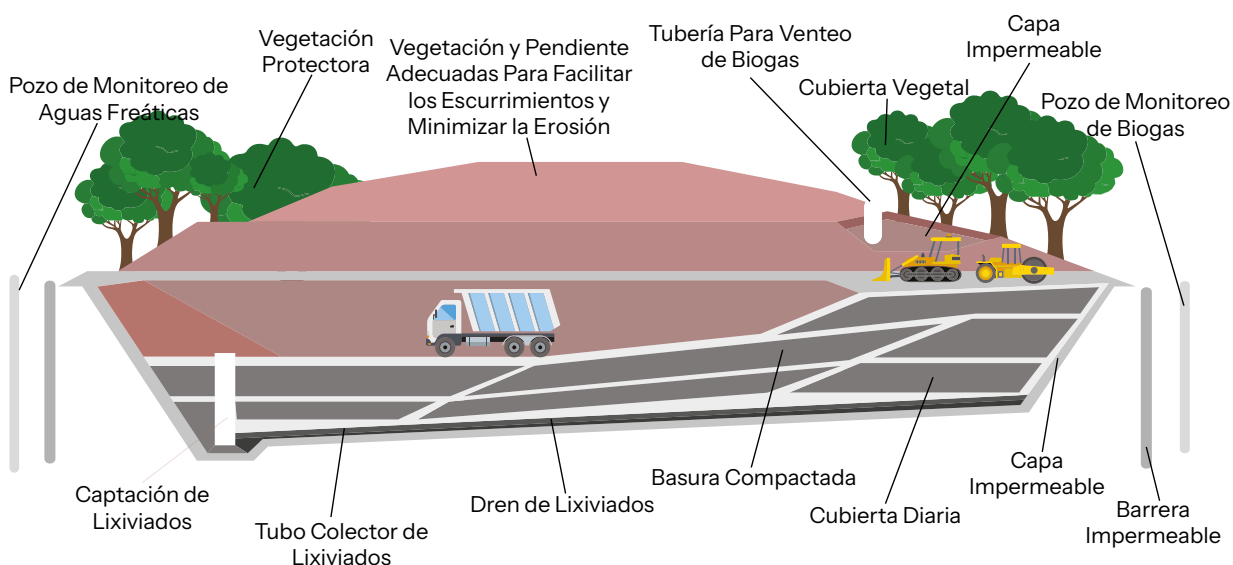


Fuente: Elaboración propia en base a R.M. 432, 2015

4.3. Clasificación de los Rellenos Sanitarios

De acuerdo con la Ley 755 la disposición final de los residuos debe realizarse en rellenos sanitarios u otras instalaciones de confinamiento, las mismas que deben contar con la infraestructura y equipamiento acorde al tipo de residuo, cantidad y volumen, cumpliendo todas las condiciones técnicas, ambientales y de seguridad durante su construcción, operación y cierre. Estas instalaciones deberán funcionar prioritariamente para residuos no aprovechables.

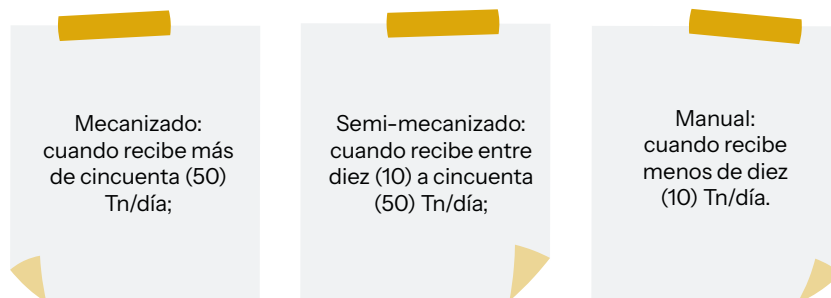
Figura 5. Diagrama de un relleno sanitario.



Fuente: Elaboración propia en base a Browning, 1991

Los rellenos sanitarios pueden clasificarse de acuerdo con la cantidad de residuos a disponer en:

Figura 6. Clasificación de rellenos sanitarios.



Fuente: Elaboración propia en base a D.S. 2954, 2016

El término mecanizado se refiere a que la operación de distribución, compactación y confinamiento de los residuos puede ser ejecutada con el apoyo permanente de equipamiento y con el apoyo de una cuadrilla de hombres y el empleo de algunas herramientas manuales.

Se requiere equipo pesado de manera temporal para la adecuación del sitio que considera la preparación de la base de soporte o la excavación de zanjas y la extracción de material de cobertura de acuerdo con el método de relleno; y en algunos casos para la operación, esto permite que municipios intermedios que no posean equipo pesado permanente, dispongan adecuadamente sus residuos.

Tabla 2. Características de los rellenos Sanitarios según su tipología.

Características	Relleno Mecanizado
Poblaciones ≤ 5.000 habitantes	No
Poblaciones 5.000 a 15.000 habitantes	No
Poblaciones entre 15.000 a 80.000 habitantes	No
Poblaciones mayores a 80.000 habitantes	Si
Utilización de herramientas menores (pala, carretilla, pico, trinche, rastrillo)	Si
Utilización de maquinaria adaptada (tractor agrícola) o de potencia menor	No
Utilización de maquinaria pesada combinada (bulldozer ó tractor sobre orugas, retro excavadora, pala cargadora)	Si
Mano de obra no calificada (operarios) personal municipal	Si
Mano de obra calificada (operarios)	Si
Báscula de pesaje	Si
Impermeabilización natural de la celda (arcilla)	Si corresponde
Impermeabilización artificial (geosintéticos, geomembranas)	Si
Sistemas de captación y tratamiento primario de lixiviados	Si
Sistemas de captación y tratamiento secundario y/o terciario de lixiviados	Si
Pozos de monitoreo de aguas subterráneas	Si

Sistemas de captación y venteo de biogás	Si
Sistemas de captación y tratamiento de biogás	Si corresponde
Cerco perimetral	Si
Caseta de control	Si
Área administrativa (oficinas, vestidores, comedor, baños.)	Si
Área de mantenimiento de maquinaria	Si
Área de almacenamiento de combustible y sustancias controladas	Si

Fuente: *Elaboración propia, 2024.*

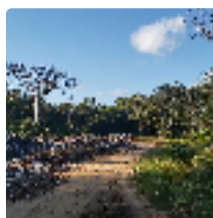
4.4. Ventajas y restricciones de un relleno sanitario mecanizado

Figura 7. Ventajas y restricciones de los rellenos sanitarios.



VENTAJAS

- Bajar costos de operación y mantenimiento.
- Generar empleo de mano de obra no calificada.
- Recuperar terrenos que hayan sido considerados improductivos o marginales, tornándolos útiles para la construcción de un parque, área recreativa, campo deportivo, etc.
- Un relleno sanitario mecanizado puede comenzar a funcionar en corto tiempo como método de eliminación.
- Se considera flexible, ya que no precisa de instalaciones permanentes y fijas, y también debido a que está apto para recibir mayores cantidades adicionales de residuos con poco incremento de personal. (OPS/OMS, 2001).



RESTRICCIONES

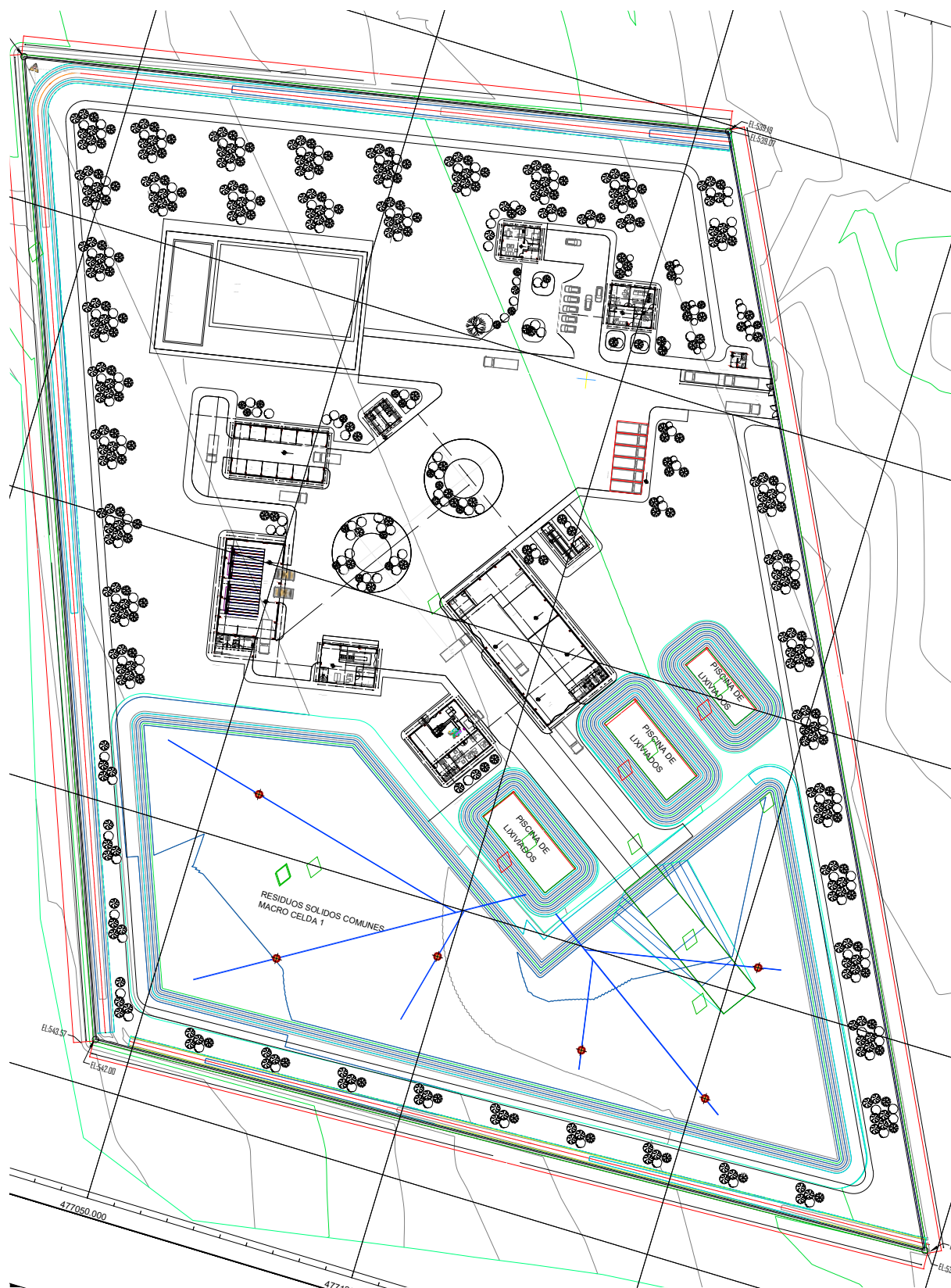
- La negativa de la población en establecer un relleno sanitario mecanizado cerca de su localidad al asociar el término “relleno sanitario” al de un “botadero a cielo abierto”.
- La supervisión constante de la construcción para mantener un alto nivel de calidad de las operaciones. En las pequeñas poblaciones, la supervisión de rutina diaria debe estar en manos del encargado del servicio de aseo.
- La falta de capacidad económica para implementar las obras iniciales de un relleno sanitario mecanizado.
- Una limitante que se presenta en algunos casos, es no poder contar con material de cobertura, ya que para ellos se requiere de equipo, y a veces no se logra compatibilizar ambas tareas.

Fuente: *Elaboración propia, 2024.*

4.5. Vinculación de los rellenos sanitarios mecanizados a los Complejos de Tratamiento de Residuos (CTR)

La Ley 755 define a los *Complejo de Tratamiento de Residuos (CTR)* como: aquellas instalaciones que incluyan dentro de sus componentes el tratamiento de residuos orgánicos, reciclables y la disposición final sanitaria y ambientalmente segura de los residuos no aprovechables.

Figura 8. Planimetría de complejo de tratamiento de residuos del municipio de La Guardia



Fuente: Estudio de diseño técnico de preinversión, Municipio La Guardia, Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2024

Si bien en un CTR se debe contemplar acciones de disposición final segura (relleno sanitario u otra metodología) los rellenos sanitarios mecanizados son un complemento a este complejo, y serán diseñados acorde a los criterios descritos en la presente guía.

4.6. Procesos de rehabilitación de botaderos a rellenos sanitarios

La rehabilitación del botadero como relleno sanitario es la acción de recuperar o restituir la capacidad de un sitio de disposición final con el objetivo de continuar la operación de forma segura desde el punto de vista ambiental y de salud. Se podrá realizar, siempre y cuando se cumplan las normas técnicas vigentes y los requisitos generales señalados a continuación:

Figura 9. Requisitos generales para rehabilitar un botadero a un relleno sanitario.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

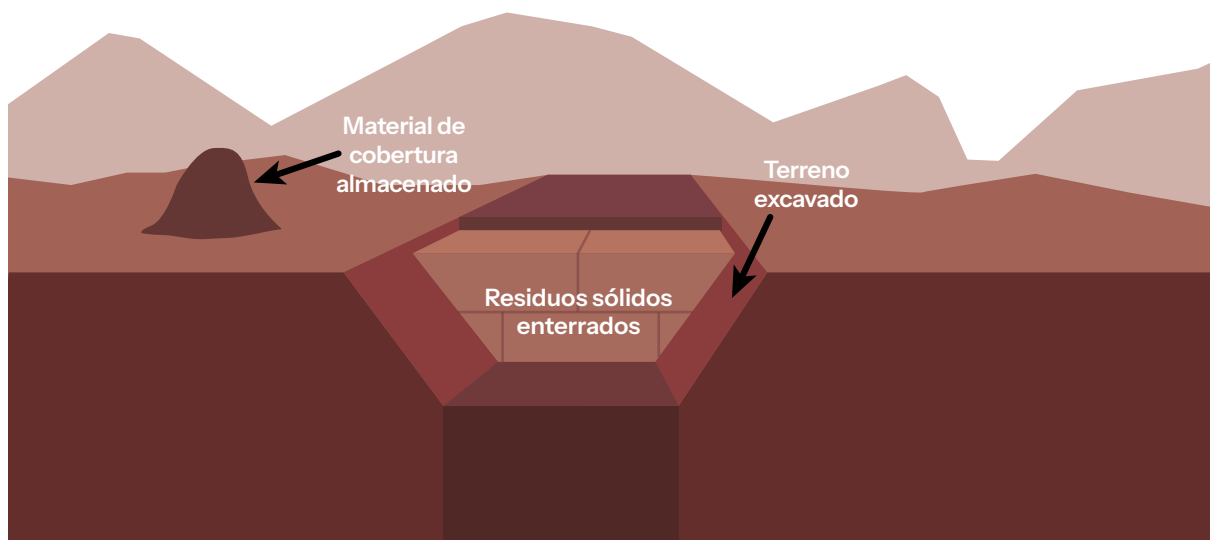
En ese sentido de ser posible, la construcción de un relleno sanitario mecanizado podrá ser implementado en sinergia con el cierre del botadero en un mismo predio, esto con la finalidad de optimizar el uso de espacios.

4.7. Métodos de operación de un relleno sanitario mecanizado

El método de operación está dado por la topografía del terreno, disponibilidad de material de cobertura que se utilizará y por la profundidad del nivel freático. De acuerdo con las características del terreno, el relleno sanitario puede construirse de acuerdo a los siguientes métodos:

Método de zanja o trinchera. Este método es usado normalmente donde el nivel del agua freática es profundo, las pendientes del terreno son suaves y las trincheras pueden ser excavadas utilizando equipos para el movimiento de tierras. Este método consiste en depositar los residuos sobre el talud inclinado de la trinchera (talud 3:1), donde son esparcidos y compactados con el equipo adecuado en capas hasta formar una celda que posteriormente será cubierta con el material excavado de la trinchera, con una frecuencia mínima de una vez al día esparciéndolo y compactándolo sobre los residuos.

Figura 10. Método de trinchera.



Fuente: Jaramillo, 2002

Método de Área. Este método se puede usar en cualquier tipo de terreno disponible como canteras abandonadas, inicio de cañadas, terrenos planos y depresiones. Consiste en depositar los residuos sobre el talud inclinado compactando en capas inclinadas para formar la celda que será cubierta con tierra. Las celdas se construyen inicialmente en un extremo del área a rellenar y se avanza hasta terminar en el otro extremo.

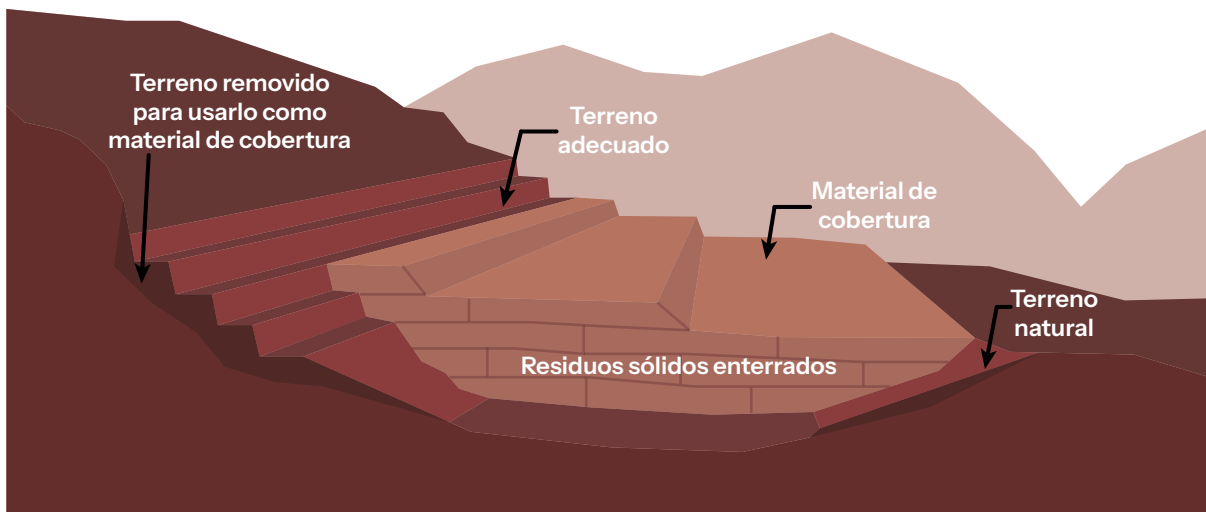
Figura 11. Método de Área



Fuente: Jaramillo, 2002

Método Combinado. Denominado también rampa, ya que en algunos casos se pueden combinar los dos métodos anteriores, por ejemplo, se inicia con el método de trinchera y posteriormente se continúa con el método de área en la parte superior. Otra variación del método combinado consiste en iniciar con un método de área, excavando el material de cubierta de la base de la rampa, formándose una trinchera, la cual servirá también para ser rellenada. Los métodos combinados son considerados los más eficientes ya que permiten ahorrar el transporte del material de cubierta (siempre y cuando exista éste en el sitio) y aumentan la vida útil del sitio.

Figura 12. Método combinado (área y trinchera).

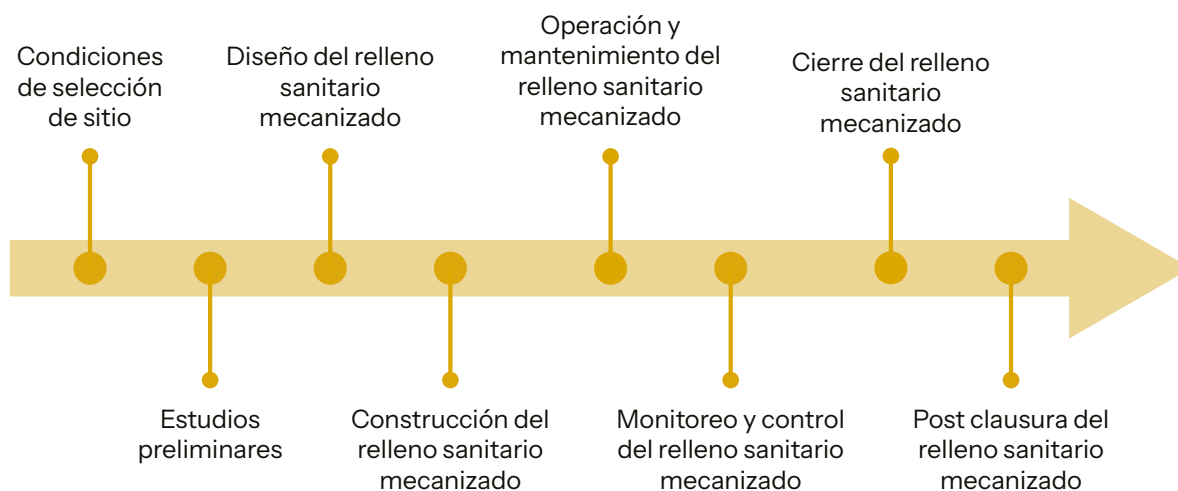


Fuente: Jaramillo, 2002

4.8. Etapas de implementación de un relleno sanitario

Todas las fases de implementación del relleno sanitario, deben ser estudiadas y planificadas adecuadamente.

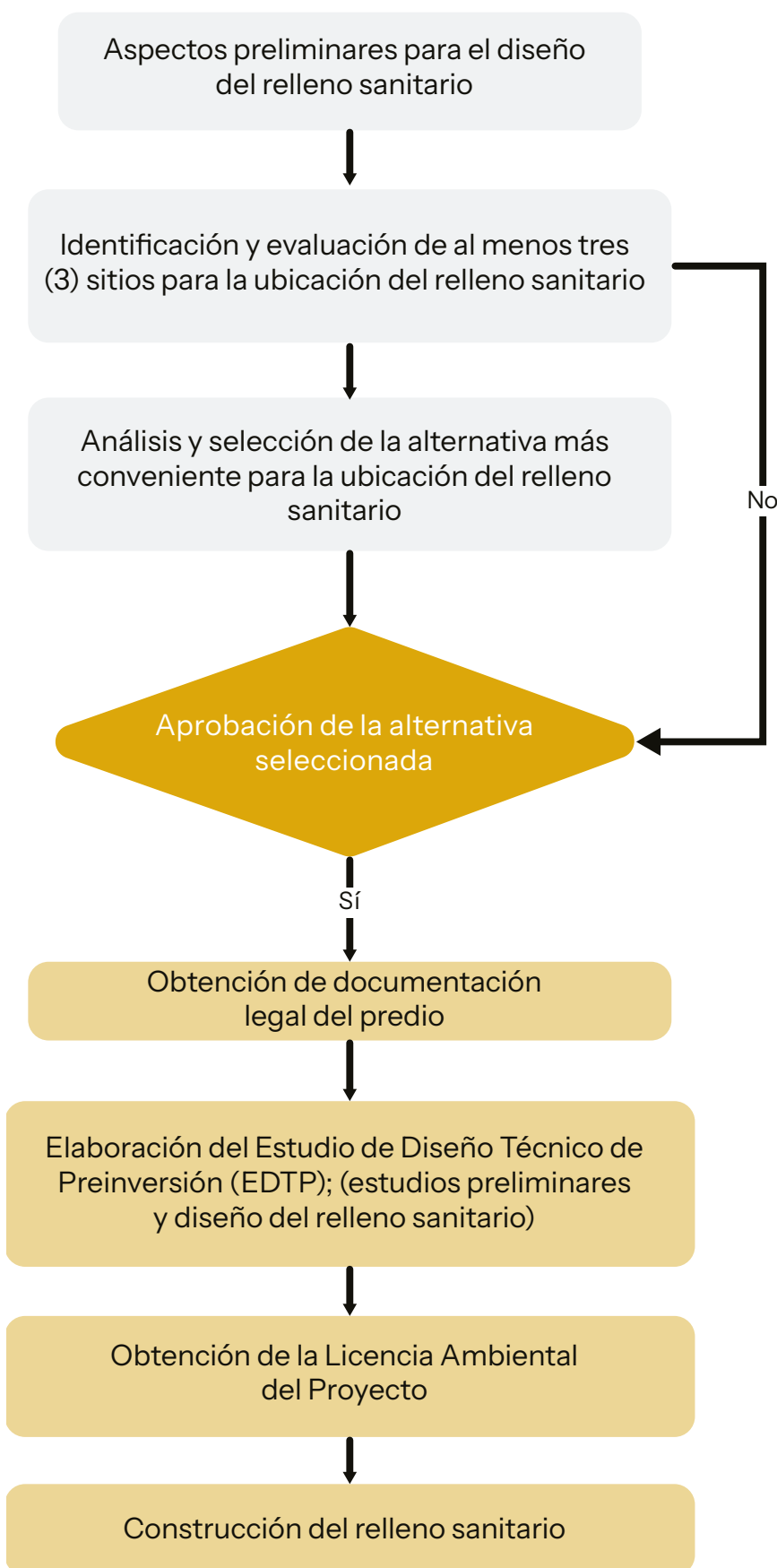
Figura 13. Etapas para la implementación de un relleno sanitario mecanizado.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Para poder comprender esquemáticamente como se desarrollan las actividades para el diseño y construcción de rellenos sanitarios mecanizados se detalla el siguiente flujograma:

Figura 14. Flujograma de procedimientos para el diseño y construcción de un relleno sanitario.



Fuente: Elaboración propia, 2024.



Relleno Sanitario Mecanizado de Kara Kara, Cochabamba

5. Condiciones para la selección de sitio

5.1. Aspectos preliminares del diseño de relleno sanitario mecanizado

5.1.1. Proyección de la población

Es necesario conocer información demográfica de la población a la cual servirá el proyecto como el número de habitantes y la tasa de crecimiento poblacional, así como la generación per cápita de residuos por habitante día, con ello se podrá definir la cantidad de residuos sólidos que se proyecta disponer en el relleno sanitario mecanizado.

Previo al diseño de un relleno sanitario, se deberá determinar el área requerida para la disposición final de residuos, las obras complementarias y área de amortiguamiento con un horizonte de vida útil mínimamente de 15 años. Para realizar este cálculo, se deberá considerar la siguiente información:

- Población actual y proyectada mínimamente de 15 años.
- Producción per-cápita (Kg/hab-día)
- Generación total de residuos sólidos (t/día)

Para contar con la información de la población se podrá contar con información de los datos censales del INE que respalden la cantidad de habitantes del municipio.

Para fines de la presente guía se empleará el método matemático geométrico, cuya característica supone que la población crece a una tasa constante, lo que significa que aumenta proporcionalmente en cada período de tiempo. El crecimiento geométrico, se describe a partir de la siguiente fórmula:

$$P_f = P_o (1 + r)^t$$

Donde:

P_f = Población futura (proyectada)

P_o = Población actual (año base)

r = Tasa de crecimiento de la población (%)

t = Variable tiempo (en años)

Para el cálculo de la población, en caso de un decrecimiento, se adopta una tasa de crecimiento poblacional de 1%.

En caso de no existir información respecto a la tasa de crecimiento, este indicador podrá calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$r = (P_f/P_o)^{\frac{1}{t}} - 1$$

5.1.2. Producción per-cápita y generación total de residuos sólidos

La producción per cápita (PPC), determina la cantidad promedio de residuos sólidos que se genera por persona en un determinado periodo de tiempo. Este indicador puede calcularse aplicando la siguiente fórmula:

$$PPC = \frac{\text{Cantidad de Residuos Generados}}{\text{Población}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{hab - día}} \right)$$

En caso de no contar con información respecto a la cantidad generada, este indicador puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$PPC = \frac{\text{Cantidad recolectada} \left(\frac{t}{\text{día}} \right)}{\text{Población atendida} \cdot \text{Cobertura} \cdot 1000} \left(\frac{kg}{\text{hab} - \text{día}} \right)$$

De esta manera la estimación de la generación de residuos (GR) a disponer en el relleno sanitario mecanizado, será:

$$GR = PPC \left(\frac{kg}{\text{hab} - \text{día}} \right) \cdot \text{Pob} (N^{\circ}\text{hab})$$

La generación puede ser proyectada conociendo un índice de crecimiento:

$$GR_f = GR_o (1 + r)^t$$

Donde:

GR_f = Generación futura (proyectada)

GR_o = Generación actual (año base)

r = Tasa de crecimiento de la población (%)

t = variable tiempo (en años)

A partir de este dato se proyectará la cantidad de residuos sólidos a disponer en el relleno sanitario mecanizado pudiendo ser diaria, mensual, anual y durante el tiempo de vida útil de la infraestructura.

Tabla 3. Formato de tabla de proyección de generación de residuos.

Año	Población (hab.)	Generación de residuos (t/día)	Generación de residuos (t/mes)	Generación de residuos (t/año)
1				
...				
n				

Fuente: Elaboración propia, 2024.

El parámetro básico para el diseño de un sitio de disposición final, es la cantidad de residuos a tratar en el mismo, así como su composición y características (densidad, humedad, etc.).

5.1.3. Cálculo de área para relleno sanitario

Un relleno sanitario mecanizado, se diseña generalmente un sistema de celdas rellenas sucesivamente. Esas celdas no deben tener una altura mayor a 5 metros, por causa de la compactación (Tabla 4).

Tabla 4. Cálculo de área para relleno sanitario.

Año	POB (hab.)	PPC (kg/ hab /día)	Cantidad de residuos solidos			Volumen (m ³)			
			RSD (t/día)	RSND (t/día)	RSM (t/día)	Residuos solidos compactados		Material de cubierta	
						Diaria/ semanal (m ³)	Anual (m ³)	Diaria (m ³)	Anual (m ³)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	
			(2)*(1)/1000	(3)*(2)0%	(3+4)*365	(3+4)*7/6/ Densidad	6*365	6*0.15	8*365
1									
...									
n									

Fuente: *Elaboración propia, 2024.*

Donde:

1. Población urbana o población del área de estudio municipal.
2. Producción per-cápita.
3. Generación diaria de residuos sólidos domiciliarios (RSD) comprende los residuos generados en fuente domiciliaria (RSUDOM) por la población en toneladas.
4. Generación diaria de residuos sólidos no domiciliarios (RSND) comprende los residuos generados en fuentes no domiciliarias (áreas públicas, mercados, comercio y otros asimilables a domiciliarios). Para el cálculo de la generación de residuos sólidos no domiciliarios, puede considerarse entre el 20 a 30% de lo generado en los domicilios, dependiendo las actividades desarrolladas en el municipio y el contexto socio económico.
5. Generación anual de residuos sólidos municipales (RSM) comprende la suma de los residuos sólidos domiciliarios y residuos sólidos no domiciliarios es decir $RSM = (RSD + RSND)$ por 365 días al año.
6. Volumen Residuos sólidos recién compactados (VRSMDC) comprende la cantidad de residuos sólidos municipales recién recolectados y dispuestos (t/día). En Rellenos Sanitarios Mecanizados, puede considerarse una densidad de 0,7 - 0,8 t/m³.
7. Volumen anual de residuos sólidos municipales compactados (VRSMAC), es decir $VRSMAC = VRSMDC * 365$.
8. Volumen diario/semanal (de acuerdo con la frecuencia de recolección) de material para cobertura (VMCD), referente al material requerido para realizar la cobertura diaria en la disposición de residuos (en promedio corresponde al 15%), es decir $VMCD = VRSMDC * 15\%$.
9. Volumen anual de material para cobertura (VMCA), es decir $VMCA = VMCD * 365$
10. Volumen anual de residuos sólidos municipales estabilizados (VRSMEA), comprende la estabilización (densidad) de los residuos sólidos municipales recolectados por la acción mecánica y biológica. En rellenos sanitarios mecanizados, puede considerarse una densidad de 0,6 t/m³.
11. Volumen total anual requerido para disposición de residuos sólidos municipales (VRSMTA), comprende el volumen anual de residuos municipales estabilizados (VRSMEA) más el volumen anual requerido de material para cobertura (VMCA), es decir $VRSMTA = VRSMEA + VMCA$
12. Volumen total anual acumulado requerido para disposición de residuos sólidos municipales (VRSMTA)

			Área requerida	
Residuos sólidos estabilizados (m ³ /año)	Relleno sanitario		Relleno A _R	Relleno A _T
	(m ³)	Acum.		
(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
(5)/Densidad (t/m ³)	(9)+(10)		(11)/H	(12)/H

13. Área total anual requerida (A_R) comprende el área a disponer, en función al volumen total anual requerido para disposición y la altura preestablecida (H), es decir $A_R = VRSMT_A / H$. Se debe considerar que de tratarse de método de área para el relleno sanitario esta altura será máxima de 5 metros para rellenos mecanizados y hasta 30 metros para rellenos mecanizados. En rellenos sanitarios mecanizados la profundidad dependerá del nivel de la napa freática, el tipo suelo y la estabilidad.
14. Área total acumulada requerida (A_T), es decir $A_T = VRSMT_A / H$

Es preciso aclarar que se puede prolongar la vida útil del relleno sanitario, promoviendo la separación de materia orgánica e inorgánica en origen.

Si no se cuenta con la información de densidad de residuos se podrá adoptar los siguientes datos para un relleno sanitario mecanizado:

Tabla 5. Densidad celda diaria referencial.

Diseño	Densidad (kg/m ³)
Celda diaria (residuos recién compactados)	700
Volumen del relleno (residuo estabilizado en el relleno sanitario mecanizado)	800

Fuente: Elaboración propia, 2025

5.2. Evaluación de sitios para la ubicación del relleno sanitario

Por las características de preparación que requiere el sitio de disposición final, es recomendable realizar esfuerzos mancomunados donde dos o más municipios compartan la operación del sitio de disposición final, considerando que la generación total debe encontrarse por encima de 50 t/día. Las condiciones ideales que debe reunir el sitio para que pueda ser utilizado como un relleno sanitario se describen a continuación.

5.2.1. Criterios generales

- Las instalaciones para la disposición final de residuos deben cumplir con la planificación de ordenamiento territorial y uso de suelos, considerando prioritariamente el beneficio de la colectividad, sobre intereses particulares.

- Respetar la normativa respecto a vías nacionales, departamentales y municipales.
- El emplazamiento de un sitio para disposición final de residuos sólidos debe estar dentro de la planificación del ordenamiento territorial o uso del suelo del municipio.
- Podrá emplazarse dentro de terrenos fiscales, municipales, agrícolas o privados según convenga. En caso de que los terrenos no pertenezcan al gobierno municipal éste o el representante legal deberá tramitar la adquisición, expropiación, cesión gratuita u otro procedimiento necesario.

5.2.2. Criterios de distancia

La distancia mínima desde el límite del perímetro de la macrocelda deberá cumplir con los siguientes criterios:

Proximidad a centros poblados. Los rellenos sanitarios mecanizados podrán estar ubicados a la distancia mínima requerida de acuerdo con normativa vigente.

Proximidad a aeropuertos. Conforme lo establece el Reglamento sobre Operación de Aeródromos RAB-138, con el fin de prevenir los peligros de choque con aves y otros animales, se establece el área de prevención de fauna, dentro la zona de protección aeronáutica de un aeródromo a una distancia de 4 km, desde el perímetro del área de movimiento de un aeródromo hacia afuera (DGAC, 2021).

Proximidad a otras instalaciones. Se deberán listar las infraestructuras existentes cercanas al área de influencia, tales como: líneas de transmisión, torres de energía eléctrica, gasoductos, oleoductos o poliductos, acueductos, servidumbres de paso y en general las obras civiles y de comunicación. El sitio seleccionado deberá estar fuera de estas instalaciones y en su caso respetar las franjas o derechos de vía correspondiente. Se recomienda establecer una distancia mínima de 500 m desde el límite del terreno.

5.2.3. Criterios espaciales

Vida útil del terreno. Comprende la disponibilidad de área para garantizar el funcionamiento del relleno sanitario durante el horizonte vida del proyecto, por lo que se recomienda identificar sitios que garanticen al menos una vida útil de 15 años y 8 años para celdas que formen parte de proyectos de rehabilitación de botaderos.

Topografía del terreno. El sitio debe estar localizado preferentemente en terreno con pendiente entre 3 a 12%, no debe ubicarse en terreno con pendiente mayor a 25% por las dificultades de operación que conlleva. Asimismo, terrenos con pendiente menor al 3%, generalmente son difíciles de manejar por las aguas de escorrentía y los lixiviados; sin embargo, no se excluyen estos sitios.

Distancia a cuerpos de agua naturales. El relleno sanitario mecanizado deberá estar ubicado a una distancia prudente de lagos, lagunas, vertientes, humedales, o ríos y arroyos con flujo permanente; y debe considerar las medidas de mitigación de posibles impactos ambientales; como mínimo se requerirá una distancia de 100 metros.

Ubicación en zonas inundables. El sitio preferentemente no deberá localizarse dentro de una zona de inundación. Usar periodos de retorno de 25 años o una valoración técnica en función al tamaño del sitio de disposición.

5.2.4. Criterios técnicos

Hidrogeología. En los potenciales sitios deberá realizarse sondeos para establecer el perfil estratigráfico y el nivel freático. Deberán realizarse un sondeo cada cinco hectáreas con una profundidad entre 3-5 metros de profundidad mínimamente.

Hidrología. Es necesario conocer todo lo referente al agua en un determinado espacio y tiempo, ya sea agua superficial o subterránea, incluyendo también las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración, entre otros.

Barrera geológica. La barrera geológica es una capa de suelo natural de baja permeabilidad que se encuentra arriba de la primera capa freática. El valor recomendado del espesor del suelo entre el nivel de desplante del suelo y el nivel máximo de subida de aguas freáticas será de 1,5 m.

Textura. Los suelos con características arcillosas (arena gruesa gredosa o greda franco-arcillosa) son los más recomendables ya que son suelos poco permeables; en segundo término, se pueden aceptar los limo-arcillosos (franco limoso pesado, franco limo arcilloso o arcillo limoso liviano); en tercer término, están los arcillo limosos (arcillo limoso pesado y arcilloso).

Permeabilidad. Es recomendable ubicar suelos con permeabilidad menor a 10^{-6} cm/s, si es mayor la alternativa podría no considerarse, debe tener un espesor mínimo de 1m o demostrar que la llegada de contaminantes a un cuerpo de agua debe ser mayor a 100 años.

5.2.5. Criterios Ambientales

Afectación paisajística. Se refiere a las alteraciones al paisaje del área seleccionada, debido a su potencial natural y turístico. En lo posible, deben evitarse áreas que afecten estos aspectos.

Barreras naturales (taludes, bosques). Las barreras naturales son importantes para prevenir la dispersión de las emisiones del relleno sanitario (malos olores, gases de relleno, dispersión de materiales livianos, etc.) y mitigar el efecto visual y paisajístico del área seleccionada.

Flora y fauna. Se debe considerar que el proceso constructivo requerirá de movimiento de tierras y del medio biótico, por lo que se recomienda que el área seleccionada presente el mínimo de cobertura vegetal y fauna nativa del lugar.

Dirección del viento predominante. La dirección del viento predominante es importante debido a las molestias que puede causar tanto en la operación, por el polvo y el posible transporte de malos olores a las áreas vecinas. En general, el sitio de emplazamiento del relleno sanitario no debe tener dirección de viento predominante a centros poblados.

5.2.6. Criterios Económicos

Distancia de recorrido en el transporte de residuos sólidos. Se deberá evaluar la distancia de recorrido desde el centro de gravedad del municipio o localidad (por lo general corresponde a la plaza principal del casco urbano) hasta el sitio identificado. Desde el punto de vista de costos de transporte y tiempos de atención, la distancia no deberá superar los 25 Km de recorrido; el relleno sanitario debe estar lo más cerca posible del área urbana, especialmente si se trata de un municipio menor.

Disponibilidad de material para cobertura. Es recomendable la identificación de sitios que cuenten con material de cobertura en el mismo sector o en sus proximidades, de manera de disminuir costos en el traslado de material.

Caminos de acceso. Los sitios identificados, deberán contar preferentemente con vías y condiciones de acceso al menos regulares, esto minimizará el costo de acondicionamiento de vías. Asimismo, se deberá garantizar los derechos de vías o prever las expropiaciones necesarias.

Uso actual del terreno y sus colindancias. Se debe verificar que los terrenos no cuenten con uso productivo actual, se preferirán áreas improductivas y mineralizadas por procesos erosivos. Asimismo, debe analizarse las potencialidades de la zona respecto al desarrollo urbano, agrícola, industrial u otro que podrían afectar la economía del entorno.

Se evitará ubicar los proyectos en áreas o zonas comprometidas o afectadas por problemas de límites territoriales.

5.2.7. Criterios Sociales

Interés en el proyecto. Durante la etapa de identificación de alternativas, se deberá evaluar el interés en el proyecto por parte de las autoridades locales y comunitarias en apoyar la implementación del nuevo relleno sanitario.

Necesidad de servidumbre para acceso. Comprende la identificación y valoración de las vías de acceso hacia el terreno desde el punto de vista de usos y costumbres por parte de las comunidades colindantes.

Tipo de asentamientos. Deberá determinarse las características demográficas y sociales de cada una de poblaciones asentamientos cercanos, referente a la legalidad o no de los mismos. En terrenos donde existan asentamientos no saneados probablemente puedan presentarse mayores conflictos sociales.

5.2.8. Criterios Legales

Propiedad de terreno. Se debe contar con un análisis legal referente a la propiedad de terreno (pública, privado, comunitario).

Estado jurídico de los predios. Comprende la verificación legal de los documentos en los estratos judiciales que corresponde a derechos reales, de manera de verificar si los predios no tienen gravamen o hipoteca, los impuestos prediales, la función social que cumplen los predios y la legalidad de propiedad. Si se presentan dificultades jurídicas con la compra del terreno (resistencia de los propietarios, incertidumbre concerniente a los títulos de propietario etc.), la construcción del relleno sanitario se puede postergar por un lapso importante.

5.3. Análisis de alternativas y selección de la alternativa más conveniente

Así mismo, de acuerdo a normativa vigente como mínimo se deberán analizar al menos 3 alternativas de sitios para la ubicación del relleno sanitario de acuerdo a los parámetros establecidos en la tabla 9, siendo necesario que se considere lo siguiente:

Puntaje máximo (a).

Comprende el valor asignado de acuerdo con las particularidades de cada parámetro evaluado, puede variar en la escala de 3 a 1.

Tabla 6. Puntajes asignados a parámetro (a)

Parámetro A	Valor	Interpretación
Mejor Valor	3	Cuando cumple o sobrepasa valores límite o de referencia
Valor Medio	2	Cuando se encuentra entre los límites menor y mayor, la valoración se realiza respecto al mejor valor.
Peor Valor	1	Cuando ocurre lo contrario, es decir que se encuentra fuera de los valores límite o de referencia.

Fuente: Elaboración propia, 2024

Importancia del parámetro (b).

La importancia del parámetro se puede establecer en función del criterio del equipo multidisciplinario. La escala puede variar de 1 a 3.

Tabla 7. Puntajes asignados a parámetro (b)

Parámetro (b)	Valor
Muy importante	3
Medianamente importante	2
Sin importancia	1

Fuente: Elaboración propia, 2024

Por lo general, los factores sociales y legales presentan mayor importancia, frente al resto de los factores.

Ponderación del parámetro (a * b).

Establece una regla de cálculo, que consiste en la multiplicación del valor de puntaje máximo por el valor de Importancia del parámetro. En la tabla 9, se presenta un cuadro de apoyo para la selección de alternativas y selección del sitio o terreno más apto.

Puntaje máximo del sistema de evaluación.

Resulta de la sumatoria de los puntajes máximos de cada parámetro, que permita la calificación de cada una de las alternativas:

Tabla 8. Rangos de puntaje total.

Evaluación del terreno	
Puntaje ponderado total	Calificación
0 – 49	Malo o terreno no aceptable o de opción marginal
50 – 99	Regular o terreno moderadamente aceptable
100 – 179	Bueno o terreno aceptable
Mayor a 180	Muy bueno o terreno aceptable de primera opción

Fuente: Elaboración propia, 2024

Tabla 9. Análisis de factores y parámetros para la identificación de sitios

Factores/ Parámetros	Valor mínimo permisible	Mejor valor
		3
Proximidad a centros poblados*	1.000 m	> 1.000 m
Proximidad a aeropuertos	4.000 m	> 4.000 m
Proximidad a otras instalaciones	500 m	> 500 m
Vida útil del terreno	15 años	> 15 años
Topografía del terreno	n.c	3% a 12%
Distancia al pozo de agua potable	500 m	> 500 m
Distancia a cuerpos de agua naturales	500 m	> 500 m
Ubicación en zonas inundables	Retorno 25 años	> 25 años
Hidro geología (manto acuífero)	150 años	> 150
Barrera geológica	1,50 m	> 1,50
Textura	n.c	Greda franco
		Arcillosa
Permeabilidad	10-6 cm/s	<10-6
Afectación paisajística	n.c	Baja o inexistente
Existencia de barreras naturales (taludes, bosques)	n.c	Alta
Presencia de flora y fauna	n.c	Baja o inexistente
Dirección del viento predominante	n.c	En sentido contrario
Distancia de recorrido en el transporte de residuos sólidos	20 km	< 20
Disponibilidad de material para cobertura	n.c	Material de cobertura en el sitio
Caminos de acceso	n.c	Transitable
Uso actual del terreno y sus colindancias	n.c	Terreno improductivo
Interés en el proyecto	n.c	Interés favorable
Necesidades de servidumbre para acceso	n.c	No
Tipo de asentamientos	n.c	< a 100 familias ilegalmente asentadas
Propiedad del terreno (derecho propietario)	n.c	Público
Estado jurídico de los predios	n.c	Terreno saneado

Fuente: Elaboración propia, 2024

*La distancia requerida tanto para centros poblados, aeropuertos y cuerpos de agua se contabiliza desde el límite del perímetro de la macrocelda.

Puntaje máximo (a)		Importancia del factor (b)	Importancia del factor (a*b)
Valor medio	Peor valor		
2	1		
Criterios de distancia			
x	< 1.000 m*	3	
x	< 4.000 m	3	
x	< 500 m	3	
Criterios espaciales			
x	< 15 años	3	
x	< 25% o < 3%	3	
x	< 500 m	3	
x	< 500 m	3	
x	< 25 años	3	
Criterios técnicos			
x	< 150	3	
x	< 1.50	3	
Arcillo	Sin presencia de arcilla	3	
Limoso			
Entre 10-5 y 10-6	>10-5	3	
Criterios ambientales			
Media	Alta	2	
Media	Baja o inexistente	2	
Media	Alta	2	
En otro sentido	En el mismo sentido	2	
Criterios económicos			
x	>20	2	
Material de cobertura próxima al sitio	Sin material de cobertura	2	
Requiere hacer mejoras	Requiera apertura	2	
Terreno de pastoreo	Terreno productivo	3	
Criterios sociales			
Interés medio	Sin interés	2	
x	Si	2	
Entre 100 y 200 familias asentadas ilegalmente	> a 200 familias asentadas ilegalmente	3	
Criterios legales			
Comunitario	Privado	3	
Terreno con documentación faltante	Terreno en litigio	3	

6. Estudios preliminares del diseño de relleno sanitario mecanizado

6.1. Estudios básicos de ingeniería

El cuadro siguiente detalla los estudios y análisis previos requeridos para la construcción del relleno sanitario mecanizado:

Tabla 10. Estudios y análisis previos requeridos para rellenos sanitarios mecanizados

Estudios y análisis	Relleno mecanizado
Topográfico	x
Geológico	x
Geotécnico	x
Hidrogeológico	x
Hidrológico	x

Fuente: Elaboración propia, 2024

6.1.1. Topografía

El relleno puede diseñarse y operarse en una topografía que permita un mayor volumen aprovechable por hectárea para la disposición final de los residuos. Una vez definido el sitio y adquirida la propiedad del terreno por el municipio, se desarrollará el levantamiento topográfico y se solicitará el plano con el terreno original a una escala de 1:250 ó 1:500, con las elevaciones representadas con curvas de nivel por cada metro y acotadas cada metro, junto a cortes y elevaciones longitudinales y transversales cada 5 metros.

Todo informe topográfico deberá anexar información y los planos respectivos propios del área levantada. En ese sentido se recomienda, que el estudio topográfico presente los siguientes resultados:

- Memoria descriptiva del levantamiento topográfico de la zona elegida para la disposición final de los residuos sólidos municipales, para identificar las dificultades en cuanto a la accesibilidad al terreno.
- Plano de ubicación: Este plano además deberá incluir las vías de acceso al área elegida, cercanía con centros poblados cercanos, actividades humanas próximas y/o áreas de interés para el proyecto de relleno sanitario.
- Plano topográfico: En el que se deberá incluir una ficha de datos técnicos conteniendo coordenadas UTM de los vértices del área en Datum WGS 84.
- Plano perimétrico: Conteniendo el cuadro de datos técnicos con la siguiente información:
 - Medida de los ángulos interiores de todos los vértices del polígono.
 - Lados del polígono debidamente acotados.
 - Área del polígono.

6.1.2. Estudio geológico

El estudio geológico se realiza con el objeto de obtener su descripción estratigráfica, así como su geometría y distribución, considerando también la identificación de discontinuidades, tales como fallas y fracturas. Asimismo, se debe incluir todo tipo de información

existente que ayude a un mejor conocimiento de las condiciones del sitio; esta información puede ser de cortes litológicos de pozos perforados en la zona e informes realizados por alguna institución particular u oficial.

Se deberá definir de manera precisa, la estratigrafía del sitio. Para ello se realizará un sondeo cada cinco hectáreas con una profundidad entre 3m a 5m por debajo de la cota inferior del relleno sanitario o hasta llegar a un estrato de material consolidado impermeable.

Los terrenos identificados no deberán estar ubicados sobre o cerca de fallas geológicas ni en zonas con riesgos de estabilidad ni deben tener la posibilidad de ocurrencia de inundación por acumulación de aguas pluviales o avenidas.

Los planos geológicos serán a escala suficiente y deberán incluir información en planta y en profundidad presentando diferentes cortes geológicos del área a ser implementada.

6.1.3. Estudio geotécnico

Se realiza con el objeto de obtener su descripción estratigráfica, así como su geometría y distribución, considerando también la identificación de discontinuidades, tales como fallas y fracturas. Asimismo, se debe incluir todo tipo de información existente que ayude a un mejor conocimiento de las condiciones del sitio; esta información puede ser de cortes litológicos de pozos perforados en la zona e informes realizados por alguna institución particular u oficial y/o la evaluación de un especialista geólogo.

Tipo de suelo. Un relleno sanitario debe estar localizado de preferencia sobre un terreno cuya base sean suelos areno-limo-arcillosos (arena gruesa gredosa, greda franco-arcillosa); también son adecuados los limo-arcillosos (franco-limoso pesado, franco-limo-arcilloso, arcillo-limoso liviano) y los arcillo-limosos (arcillo-limoso pesado y arcilloso). Es mejor evitar los terrenos areno-limosos (franco-arenosos) porque son muy permeables.

Granulometría. El análisis consiste en separar y clasificar por tamaños el material del suelo, para determinar el diámetro efectivo de las partículas, así como para saber si están bien o mal graduadas; es decir, si existen o no partículas de diferente tamaño; esto mediante la obtención del coeficiente de uniformidad del suelo. Los resultados pueden representarse mediante una curva granulométrica, que indica gráficamente el porcentaje acumulado en peso de las partículas que componen el suelo.

Compactación. El análisis de compactación tiene la finalidad de aumentar la densidad del suelo mediante la aplicación de una carga, disminuyendo con esto la porosidad. Para elegir el material de cubierta se deberá compactar en el laboratorio una muestra del suelo para obtener la humedad óptima de compactación, que es aquella con la que se logra, al ser compactado, la máxima densidad; es decir con la que se obtiene la menor relación de vacíos. Posteriormente debe determinarse la permeabilidad de la muestra compactada para determinar su nuevo coeficiente de permeabilidad. Ya en obra, el suelo se compactará por capas de un espesor y una humedad óptima establecida por los resultados obtenidos en el laboratorio.

Permeabilidad del suelo. Es la mayor o menor facilidad con que la percolación del agua ocurre a través de un suelo. El coeficiente de permeabilidad (k) es un indicador de la mayor o menor dificultad con que un suelo resiste a la percolación del agua a través de sus poros. En otras palabras, es la velocidad con la que el agua atraviesa los diferentes tipos de suelo. En la siguiente figura se puede identificar el tipo de suelo y su relación con el coeficiente de permeabilidad.

Figura 15. Coeficiente de permeabilidad k (cm/s)

k (cm/s)	10 ²	10 ¹	10	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Drenaje	Bueno						Malo		Prácticamente impermeable			
Relleno sanitario	Pésimo								Bueno			
Tipo de suelo	Grava gruesa (Cascajo)	Arena limpia, arena mezclada con grava		Arena muy fina, suelos orgánicos e inorgánicos, mezcla de limo-arenoso y arcilla				Suelo impermeable modificado por efecto de la vegetación y la intemperización				
				Suelo impermeable; por ejemplo: arcilla homogénea debajo de la zona de intemperización								

Fuente: Jaramillo, 2002

Profundidad del nivel freático. Se deberán preferir los terrenos bien drenados. Los terrenos pobremente drenados, es decir, se deben drenar de manera artificial. En estos casos es mejor descartarlos, sobre todo los que permanecen inundados durante largos periodos.

En condiciones ideales de búsqueda de sitio para la ubicación de un relleno sanitario, sería preferible seleccionar terrenos donde el nivel freático esté a una profundidad significativa, como 20 o 25 metros. Esta profundidad ofrece una barrera natural muy eficaz contra la posible contaminación de los acuíferos y reduce la necesidad de medidas adicionales de protección.

- Una profundidad de 20 a 25 metros entre la base del relleno y el nivel freático proporciona una protección natural robusta contra la migración de lixiviados, minimizando el riesgo de contaminación.
- Esta distancia permite que cualquier posible contaminación sea atenuada significativamente antes de llegar al acuífero.

Sin embargo, en situaciones donde esto no sea viable, se deben aplicar cuidadosamente las recomendaciones técnicas para mantener la protección del acuífero, adaptando las medidas según las condiciones específicas del sitio.

A continuación, se describe las recomendaciones técnicas para la protección de acuíferos:

Figura 16. Recomendaciones técnicas para la protección de acuíferos

1. Evaluación del Tipo de Suelo

Permeabilidad del Suelo: Los suelos con baja permeabilidad (como arcillas compactas) ofrecen una mayor protección contra la infiltración de lixiviados hacia el agua subterránea. En suelos más permeables (como arenas o gravas), la distancia entre la base del relleno y el nivel freático debe ser mayor para evitar el riesgo de contaminación.

Espesor del Suelo: Un espesor adecuado de suelo impermeable o semipermeable actúa como barrera natural. La presencia de capas de suelo con diferentes propiedades puede influir en la recomendación de la distancia mínima.

2. Características Hidrogeológicas

Nivel Freático Fluctuante: Es importante considerar que el nivel freático puede variar estacionalmente. Un margen de seguridad debe contemplar estas fluctuaciones para evitar que el agua subterránea se acerque a la base del relleno en épocas de lluvias.

Velocidad de Flujo Subterráneo: En zonas donde el flujo de agua subterránea es rápido, la distancia entre el relleno y el nivel freático debe ser mayor para reducir el riesgo de lixiviados contaminantes alcanzando acuíferos importantes.

3. Recomendación de Altura Mínima

Suelos Impermeables (arcillas, limos): Una altura mínima de 1.5 a 2 metros puede ser suficiente, considerando que el suelo actuará como una barrera adicional.

Suelos Moderadamente Permeables (arenas finas, limos arenosos): Se recomienda una altura mínima de 2.5 a 3 metros.

Suelos Altamente Permeables (arenas gruesas, gravas): La altura mínima debe ser de al menos 3 a 4 metros y puede requerir medidas adicionales, como la instalación de barreras geomembranas.

4. Consideraciones Adicionales

Estudios Geotécnicos y de Hidrogeología Local: Cada sitio debe ser evaluado individualmente para determinar la distancia mínima adecuada. Esto incluye pruebas de permeabilidad, análisis del flujo subterráneo, y monitoreo estacional del nivel freático.

Implementación de Barreras Adicionales: En suelos con alta permeabilidad o donde no se puede mantener la distancia recomendada, se deben considerar barreras adicionales como geomembranas, sistemas de drenaje de lixiviados, y capas de compactación de suelo (arcillas).

Fuente: Elaboración propia, 2024

Dado que Bolivia presenta una gran variabilidad en tipos de suelo y condiciones geológicas, es fundamental no aplicar una regla generalizada. En lugar de eso, cada región debe ser evaluada con base en sus características específicas, utilizando normativas internacionales como referencia y adaptándolas según los resultados de los estudios locales.

6.1.4. Estudios hidrogeológicos

Uno de los factores básicos para la selección de área es evitar que pueda haber alguna contaminación de los acuíferos, por eso es muy importante realizar un estudio hidrogeológico para conocer la profundidad a la que se encuentra el nivel freático del agua subterránea, así como la dirección y velocidad del escurrimiento o flujo de esta.

El objetivo principal del estudio hidrogeológico es la localización de los mantos acuíferos, así como la información de escurrimiento, la velocidad, dirección de movimiento y los cortes estratigráficos de los suelos, de tal manera que se cuente con información acerca de la disponibilidad de tierra para cobertura y sus características geológicas, las cuales ayudarán a conocer el volumen disponible de material de cubierta y la línea de máxima excavación en la operación del relleno sanitario.

Estudios geofísicos. Previo a la ubicación de piezómetros o pozos de monitoreo pueden llevarse a cabo estudios geofísicos que nos permitirán tener información de las características del suelo en profundidad y que suelen ser más económicos que la perforación de

sondeos. Existen varios métodos geofísicos, aunque por simplicidad normalmente, en el caso de los datos requeridos para la ubicación de rellenos sanitarios se usan los sondeos eléctricos verticales.

Sondeo Eléctrico Vertical. El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) consiste en determinar la resistividad del subsuelo a diferentes profundidades, para así inferir la composición litológica del mismo y/o el tipo de fluidos que contiene. El método de SEV presenta los cambios de resistividad de las rocas en profundidad bajo el centro de medición en un mismo punto. El dispositivo más utilizado es de tipo Schlumberger18, el cual consiste en un arreglo de cuatro electrodos. Al efecto se utiliza una fuente externa para generar corriente que se introduce al subsuelo a través de los electrodos A y B, esta corriente genera un campo de potenciales, la diferencia de potenciales se mide entre los electrodos M y N. La profundidad investigada está relacionada con la distancia de los electrodos A y B. La lectura de corriente (I) y la diferencia de potenciales (ΔP) permiten calcular la resistencia (R).

Para el Sondeo Eléctrico Vertical se recomienda al menos un punto por cada 5 Ha de superficie y de una longitud de hasta 250 metros.

Un mapa piezométrico de las aguas subterráneas. Este mapa nos indica la dirección del flujo de agua subterráneas y se realiza mediante la ubicación y lecturas de nivel de agua en piezómetros o pozos de monitoreo; también pueden usarse como puntos de medición, pozos de abastecimiento que puedan estar cerca del área.

6.1.5. Estudios hidrológicos

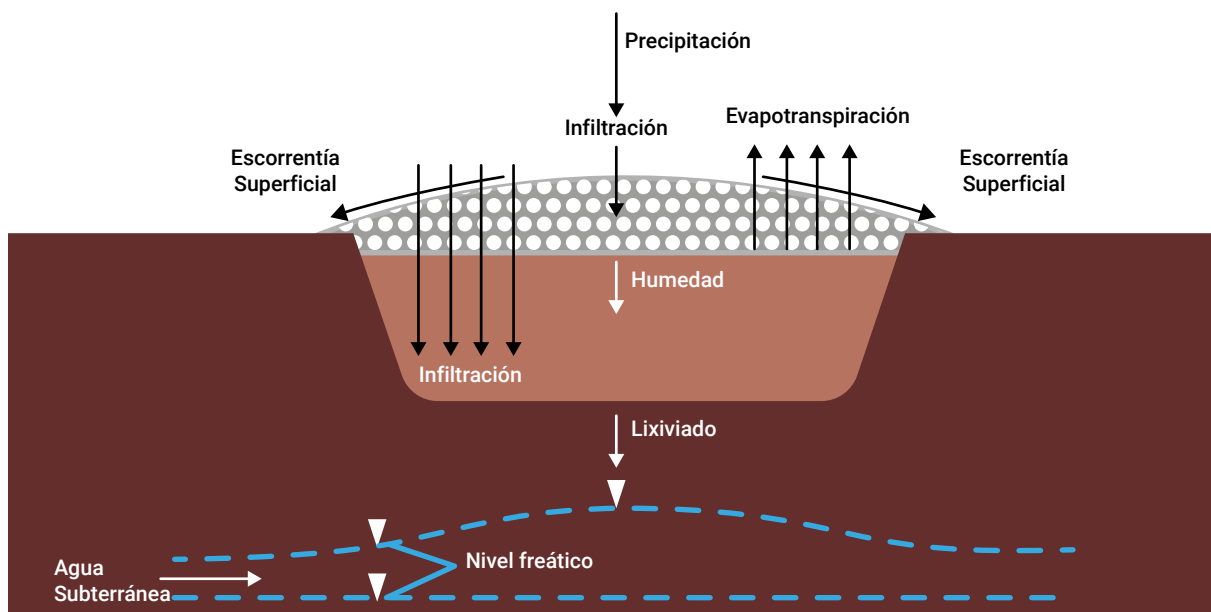
Se denomina hidrología al estudio de la distribución, espacial y temporal, así como las propiedades del agua presente en la atmósfera y en la corteza terrestre. Esto incluye las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y el equilibrio de las masas glaciares. Un estudio hidrológico es todo lo referente al agua que ingresa en una cuenca, ya sea agua superficial o subterránea, y el impacto que genera en su suelo (ejemplo cuánto drena y cuánto escurre y llega al río).

Precipitación pluvial. La precipitación pluvial tiene influencia en el diseño del relleno, especialmente en el diseño de los drenajes, el cálculo de volumen de lixiviados que se generará potencialmente, el cálculo de agua de escurrimiento superficial y finalmente en el diseño de las áreas de trabajo en la operación del relleno sanitario. La precipitación pluvial se mide en milímetros, que equivale al espesor de la lámina de agua que se formaría, a causa de la precipitación, sobre una superficie plana e impermeable.

Evapotranspiración. Del agua que es precipitada sobre la tierra, una gran cantidad es resquebrajada a la atmósfera, como vapor, a través de la acción combinada de la evaporación y la transpiración. La evapotranspiración puede medirse a través de métodos directos e indirectos; los primeros proporcionan el consumo total del agua requerida, utilizando para ello aparatos e instrumentos para su determinación. Los segundos en forma directa y bajo la utilización de fórmulas empíricas, obtienen los consumos de agua a través de todo el ciclo vegetativo de la planta.

Hidrología del área. Se debe identificar todos los acuíferos junto con la red de agua superficial y la dirección de flujo del agua. Una parte de los problemas de operación causados por la disposición de residuos sólidos son consecuencia de una deficiente captación de agua de escurrimiento; partiendo de esa base es muy importante que el sitio seleccionado esté lo más lejos posible de corrientes superficiales y cuerpos receptores de agua, y cuente con una adecuada red de drenaje pluvial para evitar escurrimientos dentro del relleno sanitario.

Figura 17. Ciclo de los lixiviados



Fuente: Vasco, 2015

6.1.6. Condiciones climatológicas

La ubicación del área deberá seleccionarse de tal manera que la condición climática sea favorable para la ubicación del relleno sanitario. La dirección del viento predominante es importante, debido a las molestias que puede causar tanto en la operación, por el polvo y papeles que se levantan, como por el posible transporte de malos olores a las áreas vecinas.

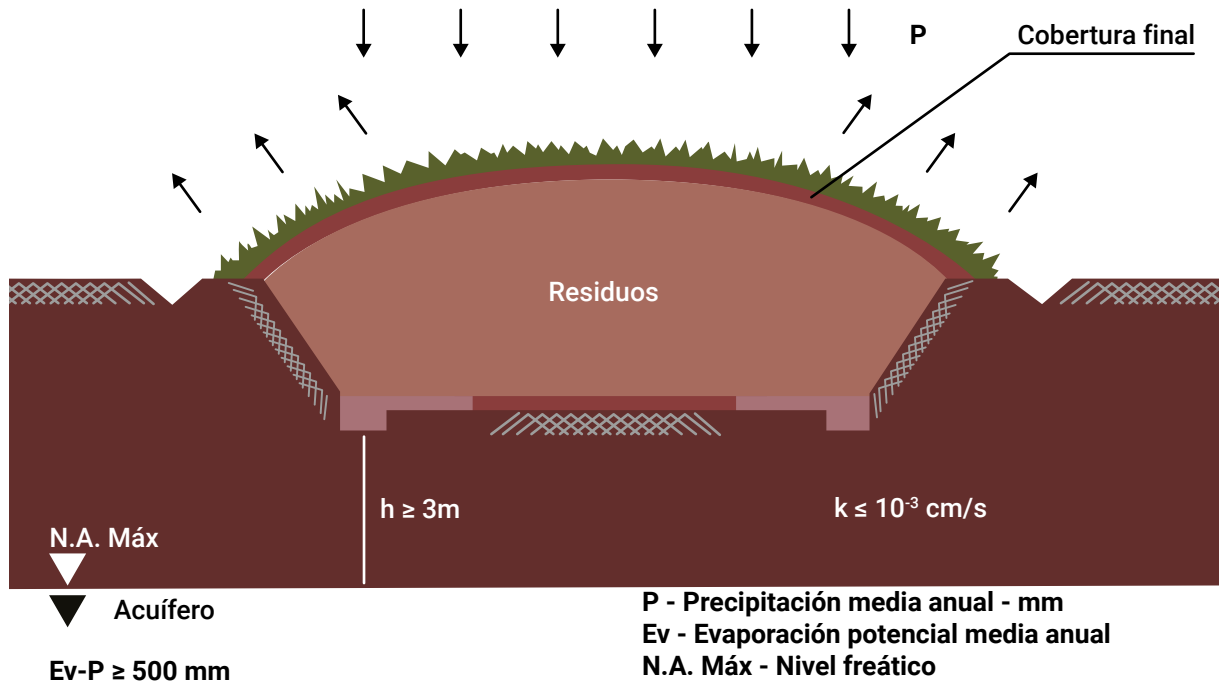
Asimismo, será importante conocer las condiciones meteorológicas de precipitación, temperatura y humedad relativa serán favorables a la biodegradación de los residuos.

La precipitación pluvial, la evaporación, la temperatura son los principales datos climatológicos que se deben recopilar para establecer las especificaciones de diseño de la infraestructura del relleno sanitario, sobre todo en lo que se refiere a los lixiviados, y con ello tener un mejor conocimiento de las condiciones a las que estará sometida el Relleno Sanitario, en la figura 18.



Piscina de Lixiviados en el Relleno Sanitario Mecanizado de Kara Kara, Cochabamba

Figura 18. Condiciones de la celda



Fuente: Vasco, 2015

Sera necesario conocer la dirección del viento y, sobre todo, los registros de precipitación pluvial de la zona para el diseño de los diferentes sistemas de drenaje de agua y lixiviado.



7. Diseño de relleno sanitario mecanizado

7.1. Requerimiento volumétrico

Para determinar la capacidad requerida del sitio, primero es necesario determinar el volumen de residuos y después el volumen que éstos ocuparían en el relleno sanitario, los cuales se calculan aplicando una de las siguientes fórmulas:

$$V_{\text{Residuos}} = \text{PPC} \cdot P_f \cdot 365 \cdot \frac{t}{\partial}$$

Donde:

V_{Residuos} = Volumen de residuos (m³)
PPC = Producción per cápita (Kg/hab-día)
 P_f = Población (hab)
 t = Vida útil del relleno (años)
 ∂ = Densidad de los residuos (kg/m³)

La densidad de residuos varía según su estado de compactación, como se detalla a continuación:

Tabla 11. Densidad de acuerdo con el grado de compactación.

Residuos solidos	Densidad
En el recipiente domiciliario	105 - 210 kg/m ³
En el recolector	350 - 630 kg/m ³
Compactada mediante maquinaria	700 - 800 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia en base a Jaramillo, 2002

Los residuos totales depositados serán la sumatoria del volumen anual por cada año de operación.

$$V_{\text{Residuos}} = \frac{365 \cdot T_d}{P_v}$$

Donde:

V_{Residuos} = Volumen de residuos (m³)
 T_d = Toneladas recolectadas diariamente (t/día)
 P_v = Peso volumétrico o densidad de los residuos compactados en el relleno (t/m³)

La capacidad del relleno debe ser la suma total del volumen de residuos depositados más el material de cobertura (20% del volumen de residuos), así:

$$V_{\text{Relleno}} = \text{Capacidad del relleno} = V_{\text{Residuos}} + V_{\text{Cobertura}}$$

La vida útil debería ser mínimamente de 15 años; de lo contrario, no se justifican los gastos para la adquisición y preparación del terreno.

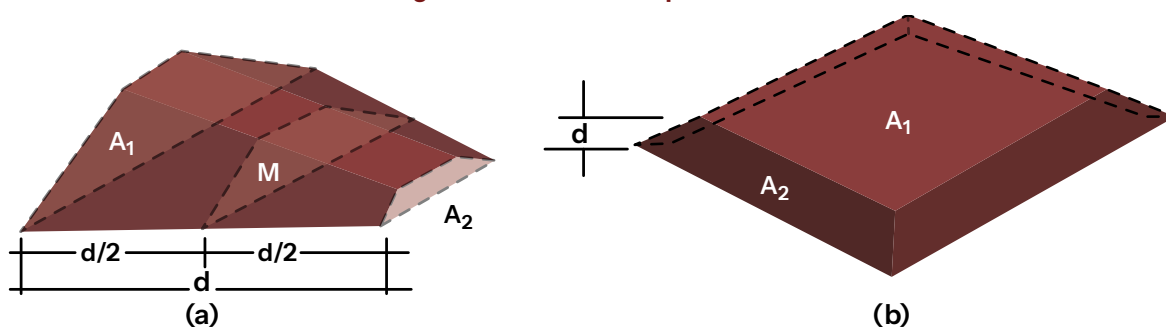
Es importante mencionar que se puede reducir considerablemente la cantidad de residuos que se depositaría en un sitio de disposición final, si se separan y clasifican previamente, sea en la fuente o en una planta de recuperación y clasificación para luego ser aprovechados mediante el compostaje y reciclaje. De este modo, se aumenta la vida útil del sitio y se disminuyen los costos de operación.

7.2. Dimensionamiento de la macrocelda

La capacidad volumétrica de la macrocelda es el volumen total disponible del terreno para recibir y almacenar los residuos y el material de cobertura que conforman el relleno sanitario. En otras palabras, es el volumen comprendido entre la superficie de desplante y la superficie final del relleno. Para esta tarea es necesario considerar algunos criterios de cálculo como se detalla a continuación:

El prismoide se define como un sólido que tiene dos caras planas y paralelas de forma regular o irregular, unidas por superficies planas o alabeadas, en las que se puedan trazar rectas desde una hasta la otra cara paralela.

Figura 19. Geometría de prismoides



Fuente: Elaboración propia en base a Jaramillo, 2002

Para determinar su volumen puede emplearse la regla de Simpson, que es la misma que se emplea para el cálculo de áreas. Para el cálculo es necesario dividir la figura de forma que resulte un número de secciones equidistantes; tres es el número menor que cumple esta condición.

$$\text{Volumen} = \frac{d}{6} (A1 + A2 + 4M)$$

Esta ecuación representa la regla del prismoide, que puede usarse para hallar el volumen de cualquier prismoide, siempre que se pueda conocer el área de la sección media.

Donde:

- V = Volumen del área
- A1 = Área de la cara plana
- A2 = Área de la cara paralela
- M = Sección media

El Área de “M” no es el promedio de las áreas A1 y A2.

Otra ecuación que se puede aplicar para el cálculo de volumen es la siguiente:

$$V = \frac{1}{3} h (a \cdot b + c \cdot d + \sqrt{(a \cdot b) \cdot (c \cdot d)})$$

Donde:

- a = longitud del nivel de coronamiento
- b = ancho del nivel de coronamiento
- c = ancho del nivel de base
- d = longitud del nivel de base
- h = Profundidad de la trinchera (hasta 5m de preferencia)

Relación H/V = puede ser 1/3 o 1/2, se recomienda 1/3.

Es necesario puntuar que para la determinación del área de un relleno sanitario los valores determinados son solo referenciales puesto que la forma tipo primoide para el método área y tronco-piramidal-invertida para el método trinchera o si se determina el método combinado, será complejo determinar el área requerida con mayor precisión por lo que se recomienda asociar y apoyar los diseños a formas geométricas como las mencionadas para obtener valores más reales.

En caso de que el diseño sea bastante irregular se debe utilizar softwares para simulación de los diseños previamente por ejemplo Civil3d, entre otros. Adicionalmente al prediseño o dimensionamiento del área requerida una vez realizado el diseño y la capacidad que tenga la celda o celdas de diseño (área disponible) debe realizarse una verificación en donde el área requerida debe ser igual o menor al área disponible

$$\text{Área requerida (prediseño)} \leq \text{Área Disponible (proyección en topografía)}$$

7.3. Dimensionamiento de la celda diaria

Se llama celda diaria (en rellenos mecanizados de acuerdo a la frecuencia de recolección) a la conformación geométrica que se le da a los residuos sólidos y al material de cobertura debidamente compactados mediante un equipo mecánico o mecanizado. Dicho elemento es la unidad básica de construcción de un relleno sanitario, siendo un espacio específicamente definido, dentro del cual se confinan y compactan los residuos de un día de operación. Al conjunto de varias celdas adyacentes de la misma altura, se les denomina franja y al conjunto de franjas, se denomina capas.

Cantidad de residuos sólidos a disponer.

La cantidad de residuos para diseñar la celda diaria/semanal se puede obtener a partir de la cantidad de residuos generados diariamente, de la siguiente manera:

$$DS_{rs} = \frac{RSD \cdot 7}{D_{hab}}$$

Donde:

DSrs = Cantidad media diaria de los residuos sólidos en el relleno sanitario (kg/día)

RSD = Cantidad de residuos sólidos producidos por día (kg/día)

Dhab = Días hábiles o laborales en una semana (normalmente Dhab varía entre 5 ó 6 días)

Volumen de la celda diaria.

$$Vc = \frac{DS_{rs} \cdot 7}{D_{rsm}} \cdot MC$$

Donde:

Vc = Volumen de la celda diaria (m³)

Drsm = Densidad de los residuos sólidos recién compactados en el relleno sanitario.

MC = Factor de material de cobertura (1.20)

Dimensiones de la Celda.

Área de la Celda:

$$Ac = \frac{Vc}{hc}$$

Donde:

Vc = Volumen de la celda diaria (m³)

A_c = Área de la celda ($m^2/día$)

h_c = Altura de la celda (m) – tomando el límite de 1,50 m (celda diaria).

Es recomendable mantener una altura entre 0,5 m y un máximo de 1,0 m para la celda diaria, brindando así una mayor estabilidad mecánica a la construcción del relleno sanitario y un frente de trabajo lo más estrecho posible, los cuales, junto con el avance (largo), se calcularán dependiendo del volumen diario de residuos.

Largo o avance de la celda (m):

$$l = \frac{A_c}{a}$$

Donde:

A_c = Área de la celda ($m^2/día$)

a = Ancho que se fija de acuerdo con el frente de trabajo necesario para la descarga de la basura, (mínimo 5,0 metros).

El frente de trabajo tendrá un ancho suficiente que permita poder maniobrar el ancho del vehículo que entregue los residuos en el relleno, este ancho se fija de acuerdo con el frente de trabajo necesario para la descarga de residuos entre (mínimo 5,0 metros).

7.4. Sistemas de captación, conducción y/o tratamiento de lixiviados

Los lixiviados de rellenos sanitarios se producen por la disolución de uno o más compuestos de los residuos sólidos, en contacto con un disolvente líquido (agua) o por la propia dinámica de descomposición de los residuos. Contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión y materia orgánica altamente contaminante. Su generación está directamente relacionada con las condiciones climatológicas (precipitación, temperatura, humedad, evapotranspiración, radiación solar, etc.), propiedades del suelo, humedad de los residuos y la metodología de trabajo del relleno sanitario.

Como regla general, para determinar la formación de cualquier lixiviado, se compara la humedad disponible con la capacidad de campo del relleno sanitario. Si la cantidad de agua presente (humedad disponible) excede la capacidad de campo del relleno sanitario, se formará lixiviado.

Lixiviado = Agua en el residuo + Infiltración agua de lluvia + Entradas agua subterránea

La composición media de estos líquidos varía considerablemente según áreas geográficas, edad del relleno sanitario y tipo de residuo depositado en el mismo, pero todos coinciden en una alta carga orgánica, DQO y DBO5; como principal factor contaminante. Además de los dos citados, los lixiviados, contienen toda característica contaminante principal, es decir, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos.

Para la estimación de la generación de lixiviados se cuenta con un método sencillo, ampliamente aceptado para establecer un rango suficientemente confiable respecto al volumen de lixiviados a manejar, es el método suizo, recomendado por el CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente).

7.4.1. Estimación de la generación de lixiviados

Existen diferentes métodos para el cálculo de lixiviados como el balance hidráulico, el método HELP y el método suizo. A continuación, se describe cada uno de ellos.

Balance de agua (hidráulico). La cantidad de lixiviado que podría generarse en un relleno sanitario se puede predecir mediante un balance de agua (hidráulico). El balance hidráulico incluye el recuento de todos los flujos de líquidos que ingresan y egresan del relleno sanitario, y del líquido almacenado dentro del sistema. En la mayoría de los rellenos sanitarios, los flujos más significativos que ingresan a ellos son la precipitación y el agua obtenida en los residuos sólidos cuando llegan al relleno sanitario; mientras que el flujo más importante que egresa del relleno sanitario es el lixiviado.

Como consecuencia de los procesos de descomposición que ocurren en un relleno sanitario, cierta cantidad de humedad se convierte en los elementos constitutivos del gas del relleno sanitario (es decir, en Metano CH₄ y Dióxido de Carbono CO₂). Además, el agua también sale del relleno sanitario en forma de vapor de agua saturado en el gas de relleno sanitario, el resto del agua se convierte en lixiviado.

El balance hidráulico consta principalmente de la precipitación que percola a través de la cobertura, sin embargo, puede haber otras fuentes de agua superficial, como la escorrentía del agua de lluvia y manantiales artesianos.

Los elementos que influyen el balance hidráulico son los siguientes:

- Precipitación pluvial en el área del relleno.
- Escorrentía superficial y/o infiltración subterránea.
- Evapotranspiración.
- Humedad natural de los residuos sólidos
- Capacidad de campo (capacidad del suelo y de los residuos sólidos para retener humedad).

El flujo en una capa de percolación vertical es descendente (debido a la gravedad) o también puede ser eliminado por evapotranspiración. La expresión generalizada del balance de agua como se indica a continuación expresa la igualdad entre los aportes y las pérdidas de humedad.

$$\Delta CH = P - CE - ET - PER$$

Donde:

ΔCH = Cambio en la cantidad de humedad almacenada en una unidad de volumen de la cobertura del relleno sanitario.

P = Cantidad neta de precipitación (precipitación que incide menos escorrentía) por unidad de área.

CE = Cantidad de escorrentía por unidad de área.

ET = Cantidad de humedad perdida mediante evapotranspiración por unidad de área.

PER = Cantidad de agua que percola a través de la cobertura por unidad de área de la cobertura.

La cantidad total de humedad que puede almacenarse en una unidad de volumen de suelo depende de dos variables: la capacidad de campo (CC) y el Porcentaje de Marchitamiento Permanente (PMP). La información referente a precipitación y evapotranspiración en lugares específicos generalmente puede obtenerse a través del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología).

Capacidad de campo de un relleno sanitario. La capacidad de campo (CC) se define como la máxima cantidad de líquido que permanece en el espacio de poro sujeto a la fuerza gravitatoria. Los materiales que forman parte de la cobertura, así como los residuos sólidos del relleno sanitario tienen su propia capacidad de campo, la cual puede almacenar la humedad y mantenerla hasta que se llegue al nivel de saturación. La cantidad potencial de lixiviado que puede generarse en un relleno sanitario específico es la cantidad de humedad excedente de la capacidad de campo del relleno sanitario. La capacidad de campo de un relleno sanitario varía en función del peso de la sobrecarga (esto es, la fracción de agua en los residuos sólidos basada en el peso seco de los residuos sólidos), y puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$CC = 0,60 - 0,55 \left(\frac{P}{10\,000 + P} \right)$$

Donde:

CC = Capacidad de campo

P = Peso de la sobrecarga calculada en medio de la franja (Kg).

Presencia de agua en los residuos sólidos. La humedad que ingresa al relleno sanitario con los residuos sólidos es agua inherente a ellos, así como la humedad que ha sido absorbida de otras fuentes (por ejemplo, la precipitación). De acuerdo con las condiciones climáticas, así como el tipo y a la calidad de los recipientes que se usan para almacenar los residuos sólidos para su recolección, la humedad inherente y la humedad de otras fuentes tienen una gama de valores. El contenido de humedad de los residuos sólidos en países en desarrollo generalmente varía de 30% a 60%, (peso húmedo) según la ubicación y la estación.

Agua en el material de cobertura. La cantidad de agua que ingresa con el material de cobertura depende del tipo y de la fuente del material, así como de la estación y de las condiciones climáticas de la ubicación específica. La cantidad máxima de agua que puede estar contenida en el material de cobertura se determina por la capacidad de campo del material.

Agua utilizada en la formación del gas del relleno sanitario. La descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos utiliza cierta cantidad de agua. Puede calcularse la cantidad de agua que usa el proceso mediante aproximaciones teóricas del proceso de descomposición.

Pérdida de agua en forma de vapor en el gas del relleno sanitario. Comúnmente, el gas del relleno sanitario está saturado con vapor de agua. Puede estimarse la cantidad de humedad que sale del relleno sanitario por medio de la ley de gases.

Humedad almacenada en el relleno sanitario. Dados todos los elementos en las secciones anteriores, los componentes del balance hidráulico para un relleno sanitario pueden expresarse del siguiente modo:

Dónde: $\Delta CH = A_{sw} + A_c + A_p - A_{fg} - A_v - A_{evap} - A_{lix}$

ΔCH = Cambio en la cantidad de humedad almacenada en el relleno sanitario (Kg/m³)

A_{sw} = Humedad en los residuos sólidos que ingresan al relleno sanitario (Kg/m³)

A_c = Agua en el material de cobertura que se coloca sobre los residuos sólidos (Kg/m³)

A_p = Agua de la precipitación y otras fuentes externas (menos escorrentía) (Kg/m³).

A_{fg} = Agua utilizada en la formación del gas del relleno

- sanitario (Kg/m³)
- Av = Agua perdida como vapor saturado con el gas del relleno sanitario (Kg/m³)
- Aevap = Humedad perdida debido a la evapotranspiración (Kg/m³)
- Alix = Agua que sale del relleno sanitario (volumen control) como lixiviado (Kg/m³).

Método Help Hydrologic Evaluation of Landfill Performance, (Evaluación Hidrológica del Rendimiento del Relleno, HELP). Es un programa que corresponde a un modelo hidrológico cuasi bidimensional que representa el movimiento del agua dentro, a través y fuera de un relleno sanitario. Permite una rápida estimación de la cantidad de líquido percolado, escorrentía superficial, evapotranspiración y drenaje que se produce durante la operación del relleno sanitario. De esta forma se puede evaluar el potencial de generación de líquidos percolados bajo diferentes alternativas de diseño, para seleccionar y dimensionar sistemas de recolección adecuados y sistemas de tratamiento de estos.

Para su utilización, se requieren tres tipos de datos de entrada: clima, suelo y del diseño mismo del relleno sanitario a evaluar. Los datos climáticos o meteorológicos requeridos se clasifican en cuatro grupos: evapotranspiración, precipitación, temperatura y radiación solar de la zona en la cual se ubica el relleno sanitario.

El programa permite tanto la entrada de datos históricos (los cuales se deben presentar como registros diarios); propiedades estadísticas de los datos históricos (que permiten al programa generar datos que describen un escenario climático de la zona); o elegir dentro de su base de datos la estación meteorológica más cercana a la ubicación del proyecto.

Método suizo. El método suizo permite estimar de manera rápida y sencilla el caudal de lixiviado o líquido percolado mediante la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{P \cdot A \cdot K}{t}$$

Donde:

- Q = Caudal medio de lixiviado (l/s)
- P = Precipitación media anual (mm/año)
- A = Área superficial del relleno (m²)
- t = Número de segundos en un año (31536000 s/año)
- K = coeficiente que depende del grado de compactación de residuos (Tabla 12)

El caudal de los lixiviados se puede estimar mediante el coeficiente de compactación (k) dado para rellenos débilmente compactados con peso específico mayor a 0,4 t/m³ y hasta 0,7 T/m³, con lo que el rango de generación de lixiviados será entre 25 y 50% de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno.

Para rellenos débilmente compactados con peso específico de 0,4 a 0,7 t/m³, se estima una producción de lixiviado entre 25 y 50% (K= 0,25 a 0,50) de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno.

Para rellenos fuertemente compactados con peso específico > 0.7 t/m³, se estima una generación de lixiviado entre 15 y 25% (K= 0.15 a 0.25) de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno.

Tabla 12. Valores recomendados del coeficiente “k”.

Compactación relleno	Densidad compactación (t/m ³)	k
Rellenos débilmente compactados	0,4 a 0,7	0,25 a 0,50
Rellenos fuertemente compactados	> 0.7	0.15 a 0.25

Fuente: Elaboración propia en base a Jaramillo, 2002

Considerando que la operación del relleno mecanizado tiene como principal característica su compactación (hasta 0.6 t/m³) con lo que el rango de generación de lixiviados será entre 25 y 50% de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno. Ya que la producción de lixiviados se presenta anualmente, será necesario realizar un caudal mensual en función de las precipitaciones de los meses máximos de lluvia ya que es importante para estimar la red de drenaje.

Es importante aclarar que la mayor generación de lixiviados por compactación, degradación de los residuos orgánicos al interior del relleno sanitario generalmente se da en los dos primeros años de vida del relleno sanitario, no obstante, considerando que estos lixiviados tienen que percolar por las capas de residuos y el drenaje interno del relleno sanitario serán visibles a partir del tercer año de vida útil.

7.4.2. Sistemas de drenaje de lixiviados

Los lixiviados son todos aquellos líquidos que han entrado en contacto con los residuos de los rellenos sanitarios u otros lugares donde haya desperdicios, y se producen por la disolución de uno o más de los compuestos de los residuos sólidos urbanos en contacto con el agua, o por la propia dinámica de descomposición de los residuos.

Dada la poca extensión superficial de los rellenos sanitarios mecanizados, se recomienda minimizar el ingreso de las aguas de lluvia no solo controlando las aguas de escorrentía por medio de canales interceptores a nivel perimetral. De esta manera, la cantidad de lixiviado tiende a ser nula, con lo que se evita uno de los mayores problemas de este tipo de obras, sobre todo en las zonas lluviosas.

El volumen de lixiviado se estima con la siguiente fórmula:

$$V = Q \cdot t$$

Donde:

V = Volumen de lixiviado que será almacenado (m³)

Q = Caudal medio de lixiviado o líquido percolado (m³/mes)

t = número máximo de meses con lluvias consecutivas (mes)

Longitud del sistema de zanjas para el lixiviado.

Con el caudal obtenido se pueden calcular las dimensiones del sistema de zanjas para el almacenamiento de lixiviado, tal como se indica en la siguiente ecuación. Las zanjas deberán tener por lo menos un ancho de 0,5 metros por 0,5 metros de profundidad, siempre que el nivel freático esté un metro más abajo y el suelo tenga las condiciones de impermeabilidad recomendadas anteriormente.

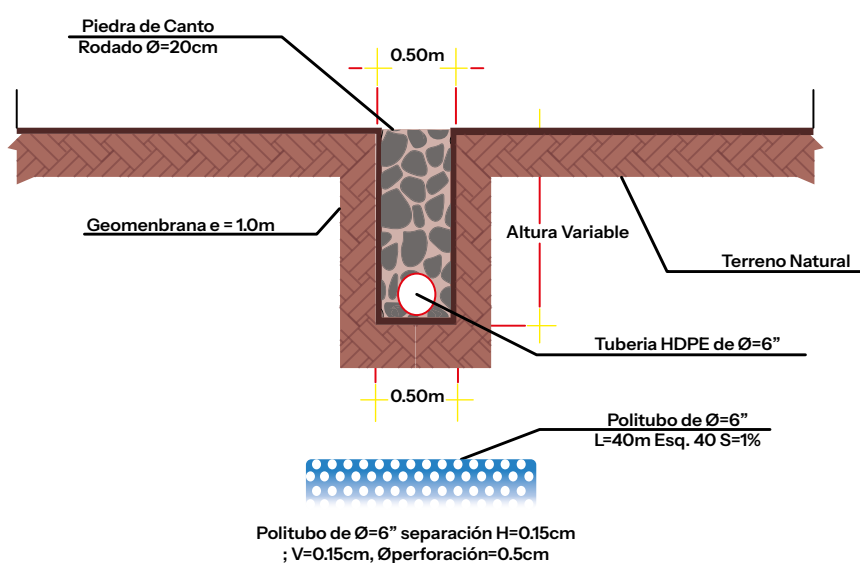
$$l = \frac{V}{a}$$

Donde:

- l = Longitud de las zanjas de almacenamiento (m)
- V = Volumen de lixiviado que será almacenado durante los periodos de lluvia (m³)
- a = Área superficial de la zanja (m²)

Complementariamente a las zanjas de lixiviados (variación de drenes franceses), se añade un sistema adicional que consiste en tubos perforados que se colocan en la parte inferior de la capa de piedra bolón o grava, para permitir que todas las aguas se percolen al interior del tubo. Es importante que exista una capa de filtro, normalmente geotextil para evitar la colmatación de los tubos.

Figura 20. Zanjas y drenes de lixiviados

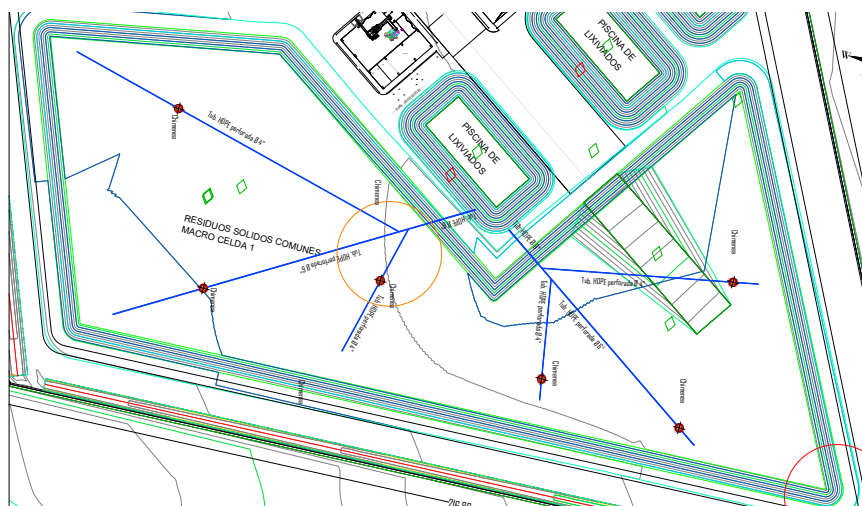


Fuente: Elaboración propia en base a Helvetas, 2020

La figura 21 muestra la disposición en forma de espina de pez, con tubería principal y secundaria, que deben considerar pendientes distintas para que la tubería secundaria pueda alimentar a la tubería principal, la tubería en el colector principal tiene una pendiente mínima de 1.0% y de 1,5% en los colectores secundarios.



Figura 21. Distribución de sistema de drenaje de lixiviados



Fuente: Estudio de diseño técnico de preinversión, Municipio La Guardia, Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2024

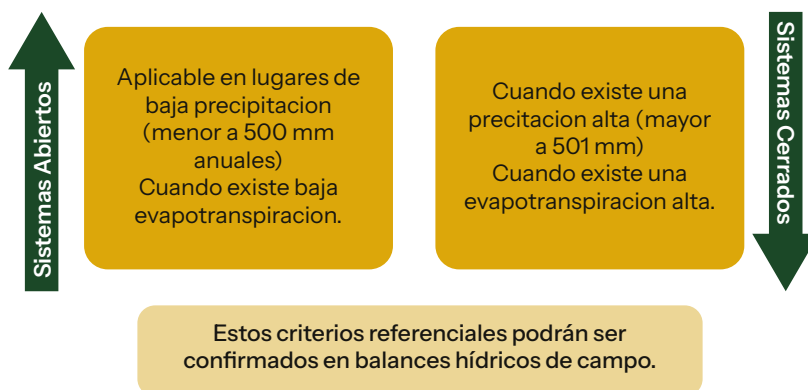
Los drenes serán conectados a un sistema de almacenamiento de lixiviados, para su respectivo almacenamiento y/o tratamiento: se puede implementar una piscina de evaporación, se puede considerar la recirculación teniendo el cuidado respectivo en los taludes, ya que la puede darse un incremento de la aparición de líquidos en los taludes de la infraestructura.

7.4.3. Almacenamiento de lixiviados

Uno de los aspectos más importantes al momento de operar adecuadamente un sitio de disposición final de residuos está relacionado con el control de los subproductos que se van a generar por la degradación propia de los residuos, tales como: lixiviados y biogás.

Una vez se haya proyectado el volumen de lixiviados a ser generado y considerando la intensidad de precipitación, se podrá optar por sistemas abiertos o cerrados de almacenamiento lixiviados, a continuación, se describen los requisitos referenciales de selección para los sistemas abiertos o cerrados de almacenamiento de lixiviados:

Figura 22. Criterios de precipitación y evapotranspiración para la selección de sistemas de almacenamiento de lixiviados.



Fuente: Elaboración propia, 2024

La principal finalidad de contar con una o varias unidades de almacenamiento de lixiviados es habilitar espacios de confinamiento de estos líquidos para su posterior tratamiento, se recomienda manejar al menos un 20% adicional de volumen disponible de almacenamiento de acuerdo al caudal determinado.

Figura 23. Sistema de almacenamiento de lixiviados



Fuente: Relleno Sanitario Mecanizado "El Ingenio" de El Ato

7.4.4. Tratamiento de lixiviados

La remoción de los distintos contaminantes presentes en los lixiviados, DQO, DBO₅, Compuestos Orgánicos Volátiles, Amonio, y metales pesados, hace necesario emplear combinaciones de los tratamientos habitualmente empleados en la depuración de lixiviados.

Los lixiviados debido a su concentración contienen los siguientes grupos de contaminación:

- Contaminación por patógenos
- Contaminación por materia orgánica
- Contaminación por nutrientes
- Contaminación por sustancias tóxicas

En algunos casos la remoción de uno de los grupos de contaminación se ve impedido por la presencia del otro, tal es el caso de la remoción de la materia orgánica y los metales pesados.

Existen diferentes métodos de control para el manejo y tratamiento de los lixiviados generados, como la evaporación, estabilización, recirculación, procesos biológicos, procesos fisicoquímicos y tecnologías de membranas (MBR).

Su aplicación dependerá de la cantidad y características del líquido que se genera y los costos de tratamiento que implica.

A modo referencial en la Tabla 13 se muestra el tipo de tratamiento aplicable al tipo de relleno sanitario:

Tabla 13. Tipología de tratamiento de lixiviados

Categorías de tratamiento	Primario		Secundario			Terciario	
	Recirculación	Evaporación natural	Sistemas naturales	Anaerobio	Aerobio	Físico Químico	Sistemas de membranas
Relleno sanitario mecanizado				X	X	X	X

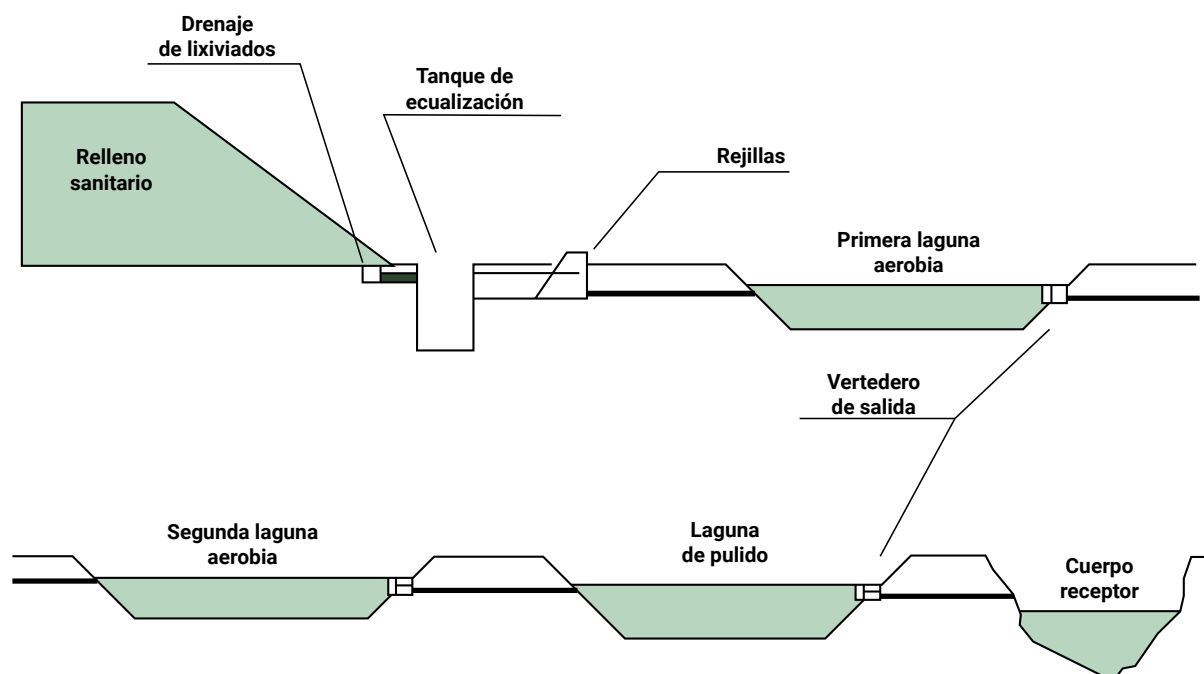
Fuente: Elaboración propia, 2024

Lagunas de Estabilización .

Una de las formas de tratamiento más usual, es el uso de lagunas en las que se descargan el efluente lixiviado después de pasar por una rejilla manual o criba mecánica. Este método se conoce también como tratamiento aerobio. En las lagunas de estabilización, la remoción de la materia orgánica (expresada en DBO_5) se realiza a través de procesos biológicos aerobios y anaerobios. Dependiendo del proceso predominante, las lagunas son aerobias (de maduración o pulimento), anaerobias o facultativas.

Por lo general, las lagunas aeróbicas de estabilización tienen las siguientes características básicas: forma – troncopiramidal; profundidad – 1,5 m y tiempo de retención – 25 días como mínimo. En una serie de lagunas, el efluente recibe un pulido final en una laguna pequeña, que también es aerobia y tiene las mismas características físicas de las dos anteriores, pero con capacidad de retener el efluente durante 7 días.

Figura 24. Lagunas de Estabilización



Fuente: IWA, 2023

Se deben tratar los márgenes de las lagunas para evitar que crezca vegetación en la interface aire–efluente. Además, se debe retirar el lodo periódicamente, para no afectar la eficiencia del tratamiento. El lodo retirado debe ser dispuesto en un lecho de secado, para luego ser incorporado al interior del relleno sanitario, mientras que la fracción líquida puede ser desechada directamente en el cuerpo receptor.

Tratamiento Anaerobio.

El proceso anaerobio es la tecnología más antigua utilizada para el tratamiento de aguas residuales que se inició a finales del siglo XIX. El proceso de tratamiento anaerobio implica la conversión microbiana de la materia orgánica y utiliza elementos inorgánicos como N, P, S, K, Ca y Mg para la acumulación de microorganismos. Los microorganismos anaerobios tienen la capacidad de transformar el lixiviado en hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2) mediante el proceso de acidogénesis y metano (CH_4) mediante el proceso de metanogénesis.

Varios factores afectan a las tecnologías anaerobias que tratan los lixiviados de rellenos sanitarios, como la temperatura, la tasa de carga orgánica, la tasa de carga de amoníaco, la tasa de carga de lodos y el tiempo de retención hidráulica. La mayoría de los reactores anaerobios están sometidos a un lavado de biomasa que perjudica la eficiencia de la tecnología. Por lo tanto, la descarga intencionada de lodos es necesaria para controlar la relación alimento/sustrato que afecta en gran medida al rendimiento de los procesos anaerobios.

Normalmente, se ha instalado un reactor anaerobio en el proceso de tratamiento de lixiviados para tratar compuestos orgánicos de alta carga; y se pueden utilizar distintos reactores, como filtros anaerobios, reactores anaerobios discontinuos secuenciados o mantas de lodos anaerobios de flujo ascendente (UASB).

Filtros anaerobios: El filtro anaerobio depende de un lecho de material de relleno para reducir el lavado de la biomasa del reactor a HRT cortos. Este sistema es una tecnología de alta tasa que reúne las ventajas de otros métodos anaerobios y minimiza las desventajas. El lixiviado puede pasar a través del filtro anaerobio por el modo de flujo ascendente o descendente. Aunque el modo de flujo ascendente parece ser más común y preferible.

La distribución uniforme del lixiviado a través de la cara transversal del medio de soporte es importante para reducir el riesgo de canalización y, por tanto, el deterioro del rendimiento del proceso.

Reactores anaerobios discontinuos secuenciados o mantas de lodos anaerobios de flujo ascendente (UASB): El reactor anaerobio discontinuo de secuenciación es muy similar en concepto al aerobio, salvo por la ausencia de aireación, y tiene la capacidad de conseguir la captura de sólidos y transformar la materia orgánica en biogás en un solo recipiente, eliminando la necesidad de un clarificador.

El módulo UASB se considera un gran avance en el desarrollo del proceso y la aplicación de la tecnología de tratamiento de alta velocidad. Además, el UASB ofrece un diseño único en el que las fases líquida, gaseosa y sólida pueden separarse dentro de un mismo recipiente. Debido a su fácil funcionamiento, mínima productividad de lodos y alta eficiencia energética, el reactor UASB se toma en consideración para el tratamiento de lixiviados. Además, durante el proceso de operación, se produce metano y/o hidrógeno que podría utilizarse como combustible. Sin embargo, podría ser necesario un pretratamiento del lixiviado de relleno sanitario para la eliminación de sólidos con el fin de mejorar el rendimiento del reactor. Es necesario combinar el postratamiento con el reactor UASB para producir un efluente de calidad conforme para su vertido.

Tratamiento Aerobio .

Los procesos biológicos tradicionales de tratamiento aerobio se utilizan como una técnica eficaz de tratamiento de lixiviados en la que se eliminan los contaminantes orgánicos biodegradables y el nitrógeno amoniacal se convierte en nitrito mediante nitrificación, lo que da lugar a una degradación eficaz de la materia orgánica y permite eliminar fácilmente los compuestos nitrogenados.

Entre los diferentes procesos de tratamiento aeróbico, los que se utilizan comúnmente son el proceso de lodos activados (ASP), los reactores discontinuos secuenciados (SBR), las lagunas aireadas (AL) y los de crecimiento de biomasa en suspensión, como los contactores biológicos rotatorios (RBC), los biorreactores de membrana (MBR), etc.

Procesos de lodos activados: Es una tecnología común utilizada para el tratamiento de

lodos y aguas residuales; y consiste principalmente en el uso de un consorcio microbiano mixto que degrada los contaminantes orgánicos contenidos en las aguas residuales para dar lugar a gases como CO_2 , agua y nueva biomasa residual. Los procesos de lodos activados también se utilizan para el tratamiento de aguas residuales domésticas o el tratamiento conjunto de lixiviados y aguas residuales.

Para el tratamiento de lixiviados, ha demostrado ser viable con un rendimiento de tratamiento suficiente en términos de eliminación de carbono orgánico y amoníaco, así como nutrientes inorgánicos y compuestos fenólicos.

Reactores discontinuos secuenciados: Es un método de tratamiento biológico en estado no estacionario, de capacidad variable y crecimiento en suspensión que utiliza el llenado y decantación-ASP con y sin clarificador. Normalmente se divide en cinco etapas: llenado, reacción, sedimentación, extracción y reposo.

Generalmente, funciona en un modo de aireación intermitente en el que todas las reacciones metabólicas y la segregación sólido-líquido tienen lugar en un tanque unitario mediante una secuencia de control temporizada; tradicionalmente es un proceso integrado de nitrificación-desnitrificación y combina etapas anaeróbicas y aeróbicas para lograr con éxito la nitrificación, desnitrificación y eliminación de fósforo simultáneamente.

Lagunas aireadas: Son un tipo de piscinas o balsas utilizadas habitualmente de forma eficiente con un coste reducido para eliminar la carga microbiana y orgánica mediante oxidación biológica por un suministro continuo de aire. Su escaso mantenimiento y bajo coste operativo animan a los operadores a utilizarlos para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en los países en desarrollo.

Contactores Biológicos Rotatorios: Se considera un tratamiento secundario y consiste en una serie de discos giratorios que contienen medios filtrantes fijos y su objetivo es eliminar la materia orgánica y el amoníaco de las aguas residuales y los lixiviados.

Los discos giratorios están parcialmente sumergidos en las aguas residuales y su rotación permite la degradación de la materia orgánica contenida en los lixiviados, el 40-50% de su superficie está sumergida mientras que la otra superficie está intermitentemente en contacto con el aire atmosférico para la absorción de oxígeno.

En estas condiciones, los microorganismos específicos crecen continuamente formando membranas adheridas a la superficie del disco. Las células muertas se desprenden de los discos y, junto con el exceso de lodo, se eliminan del sistema a lo largo del proceso de tratamiento (por ejemplo, mediante una clarificación posterior en un clarificador)

La eliminación de materia orgánica se determina analizando la DBO y la DQO, y las diferentes formas de nitrógeno se analizan determinando la conversión del amoníaco en nitratos. La eficiencia depende principalmente de la cantidad de superficie del medio, así como de las características del lixiviado.

Biorreactores de membranas: La tecnología de membranas implica la retención de biomasa en biorreactores para separar los biosólidos de los líquidos, lo que da lugar a un efluente final con un contenido de contaminantes muy reducido. La tecnología de membranas combina el uso de lodos activados y unidades de membranas para un tratamiento eficiente, que se aplica principalmente a lixiviados muy cargados que son difíciles de tratar con otras tecnologías.

Además, la tecnología de membranas ha demostrado ser eficiente para el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios antiguos con contaminantes recalcitrantes y ha ofrecido un proceso estable con baja producción de lodos. Sin embargo, el aspecto más desafiante de la tecnología de membranas es la aparición de incrustaciones debido al uso de lixiviados de alta carga orgánica, la formación excesiva de biosólidos o el crecimiento microbiano excesivo, entre otras razones. El material utilizado para la construcción de la membrana puede ser diferente (por ejemplo, polimérico, metálico, cerámico). Algunos materiales son más ventajosos debido a su posible reutilización mediante su regeneración, como las membranas cerámicas.

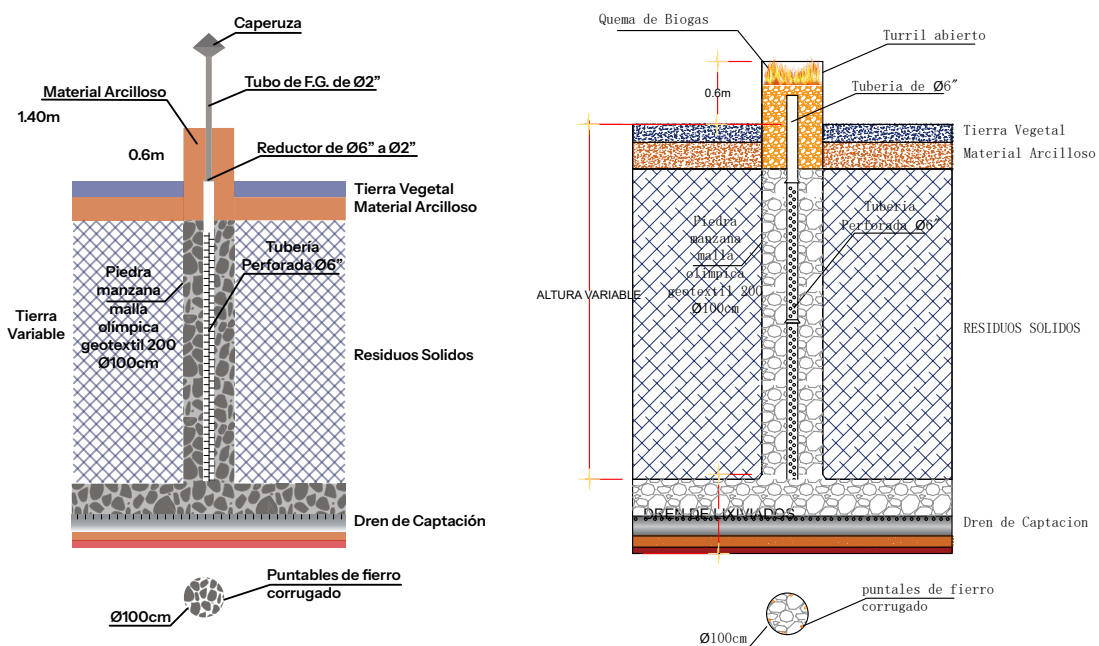
7.5. Manejo del biogás

Un relleno sanitario mecanizado, se comporta como un digestor anaerobio, debido a la descomposición o putrefacción natural de los residuos sólidos, no sólo se producen líquidos sino también gases y otros compuestos. El gas metano reviste el mayor interés porque, a pesar de ser inodoro e incoloro, es inflamable y explosivo si se concentra en el aire en una proporción de 5 a 15% en volumen; los gases tienden a acumularse en los espacios vacíos dentro del relleno y aprovechan cualquier fisura del terreno o permeabilidad de la cubierta para salir.

Para controlar la migración del biogás generado en un relleno sanitario se debe diseñar un sistema de evacuación vertical, el mismo que debe estar conectado al sistema de drenaje de lixiviados ubicado en la base de la infraestructura. Para la recolección y evacuación de gases se utilizarán chimeneas, las mismas que deben reunir las siguientes características:

- Sección circular de 0,60 m a 0,8 m de diámetro, de altura variable en función de la altura de la infraestructura y distribuidas en forma equidistante separadas de 20 a 50 m, se recomienda cada 30 m, considerando las dimensiones de la celda, puede quedar una chimenea al centro de la celda.
- Los materiales para utilizar serán soportes de material resistente a la corrosión, malla metálica tipo gallinero y piedras con un tamaño máximo de 0,15 m. Asimismo, se podrá utilizar tuberías perforadas de 0,15 m de diámetro como mínimo y de material resistente a la acción fisicoquímica de los residuos. La emisión final a la atmósfera debe concluir en un quemador para la combustión del biogás.

Figura 25. Construcción referencial de chimeneas.



Fuente: Izq. Helvetas, 2020 / der. Elaboración propia, 2024



Sistema de drenaje Basal, Complejo de Tratamiento de Residuos de Potosí

7.6. Vías de acceso internas y externas

El relleno sanitario mecanizado debe estar cerca de una vía pública principal y de uso permanente. El camino de acceso interno también debe reunir las condiciones mínimas que garanticen el ingreso fácil y seguro al vehículo o vehículos de recolección de residuos en todas las épocas del año.

En un relleno sanitario existen tres tipos de vías:

- **Las vías principales** son las que llegan al relleno sanitario desde el exterior, es decir, comunican la operación de la recolección y transporte con la operación misma de la

disposición final. Son permanentes y pueden servir para toda la vida útil del relleno sanitario y, en muchas ocasiones, para el uso futuro. Generalmente, el terreno de fundación está conformado por los suelos del sitio, se diseñan con la capa superior estable, impermeable, uniforme y de textura adecuada, la vía no debe tener ningún tramo sobre residuos. Las pendientes longitudinales no deben ser mayores de 8% y no deben tener curvas con radios menores de 50 metros. El ancho de calzada puede ser siete metros.

- **Las vías secundarias** son, generalmente, vías perimetrales del relleno sanitario y deben permitir el acceso a cada uno de los niveles que lo conforman. El terreno de fundación, generalmente en el tramo inicial, debe conformarse con los suelos del sitio y el tramo restante sobre residuos. Las pendientes longitudinales pueden llegar máximo hasta 6% y se diseñan para evitar el patinado de los vehículos. En lo posible la capa superior debe estar conformada con una subbase granular, con un mínimo de 25 cm de espesor y un ancho de calzada hasta 10 m. Al igual que la vía principal, no debe tener curvas con radios menores de 50 m y en situaciones topográficas difíciles, hasta 30 m.
- **Las vías temporales**, como su nombre lo indica, son vías de corta duración y solamente permiten el acceso al frente de la celda diaria de trabajo. Se caracterizan porque su diseño depende de los aspectos operativos, los cuales tienen mucha relación con la forma del terreno y el clima. Para la construcción pueden usarse la cobertura intermedia y los equipos empleados para la compactación de los residuos. Estas vías deben garantizar el acceso a los diferentes frentes de trabajo (o de operación) y se pueden construir sobre los mismos pisos de los niveles de residuos. El terreno de fundación en toda la vía está conformado por residuos. Las pendientes longitudinales son función de las pendientes de los niveles y no deben superar el 3%.

7.7. Drenaje pluvial

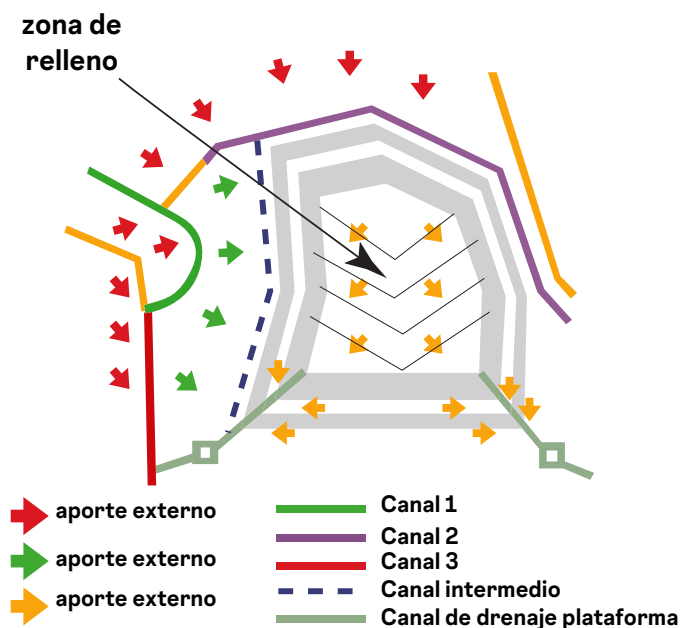
El manejo de las aguas pluviales tiene como objetivo evitar su infiltración al interior del volumen de residuos sólidos, para impedir principalmente el aumento de líquidos lixiviados, gases, erosión del sellado o cobertura del relleno sanitario, así como el deterioro de los caminos de acceso y a otras obras de infraestructura.

Para tal efecto, se deberán construir drenajes pluviales internos y externos en el perímetro del área, considerando lo siguiente:

- Los canales pluviales internos serán de área transversal pequeña a mediana.
- La zanja de coronamiento o perimetral será de área transversal mayor a mediana.

El grado de pendiente de los canales internos debe ser diseñado con la finalidad de asegurar el escurrimiento de las aguas superficiales desde el interior del relleno hacia los puntos de evacuación que se hayan proyectado o fuera de la superficie, por lo general deberán tener una pendiente mínima del 2%. Las aguas procedentes de la lluvia deben escurrir sobre la superficie de cubierta final sin que se produzca una erosión excesiva o una filtración.

Figura 26. Esquema de sistema de drenaje pluvial.



Fuente: Elaboración propia, 2024

Con la información topográfica e hidrológica disponible, se deberá calcular el tamaño de los canales de drenaje superficial. Los cálculos hidráulicos ordinarios dependen de la gradiente, de la zona superficial de las captaciones de agua superficial y la frecuencia de la precipitación pluvial. A continuación se presenta el procedimiento del diseño del sistema de drenaje pluvial o zanja de interceptación.

1. Estudiar un plano del sitio a escala 1:1000, seleccionando la curva de nivel que sea adecuada para colocar la zanja. La zanja siempre debe ser trasladada en la curva de nivel para garantizar una velocidad máxima que no provoque erosión excesiva.
2. Determinar la velocidad de diseño en la zanja. Dentro de las limitaciones impuestas por la topografía, la ruta exacta de una zanja queda definida por las pendientes que pueden tolerarse o admitirse. La pendiente excesiva puede producir una velocidad suficiente para causar erosión en la plantilla de la zanja. También es necesario asegurar una velocidad mínima que impida la sedimentación, debido a que el lodo en suspensión en el agua puede depositarse si la velocidad es muy baja. Por lo tanto, las velocidades de diseño deben ser ligeramente menores que las máximas permisibles, si la topografía lo permite.

Tabla 14. Velocidades por tipo de material

Material de la zanja	Velocidad (m/seg)	
	Agua clara	Agua con sedimento abrasivo
Arena fina	0,45	0,45
Migajón limoso	0,60	0,60
Grava fina	0,75	1,05
Arcilla rígida	1,20	0,90
Grava gruesa	1,20	1,80
Pizarra, tepetate	1,80	1,50
Acero	*	2,40
Madera	6,00	3,00
Concreto	12,00	3,60

Fuente: Jaramillo, 2002

3. Estimar el coeficiente de escurrimiento (k) de la cuenca, usando el siguiente cuadro:

Tabla 15. Valores empíricos para obtener el coeficiente de escurrimiento (k).

Valores empíricos para obtener el coeficiente de escurrimiento (k)	
A. Topografía	
Terreno plano con pendiente del orden de 0,2 – 0,6 m/km	0,3
Terreno con inclinación leve del orden de 3 – 4 m/Km	0,2
Terreno con inclinación fuerte del orden de 30 – 50 m/Km	0,1
B. Suelo	
Arcilla	0,1
Arcilla con limo	0,2
Arcilla arenoso	0,3
B. Cobertura	
Terrenos agrícolas y pastizales	0,1
Áreas boscosas	0,2

Fuente: Jaramillo, 2002

Se puede obtener el coeficiente K como sigue:

$$K = 1 - (A + B + C)$$

Donde:

- K = Coeficiente
- A = Topografía
- B = Suelo
- C = Cobertura

4. Adoptar la intensidad de la lluvia de diseño, analizando los datos meteorológicos del sitio. Generalmente se usa la siguiente ecuación de intensidad de la lluvia:

$$i = \frac{j \cdot tp^l}{tr_m}$$

Donde:

- i = Intensidad de la lluvia (mm/hora)
- tp = Recurrencia (años)
- tr = Duración de la lluvia (minutos)
- j, l, m = Características regionales

5. Calcular el tiempo de concentración (tc) en minutos. El tiempo de concentración (tc) para una cuenca pequeña sería igual a la combinación más larga del tiempo de escurrimiento sobre el terreno (t1) y del tiempo de escurrimiento en la zanja (t2).

$$t_c = t_1 + t_2$$

El tiempo, de escurrimiento sobre el terreno (t1) está dado por la ecuación siguiente:

$$t_1 = \frac{235 \cdot b \cdot L_1 \cdot \frac{1}{3}}{(ki)^{2/3}}$$

Donde:

- L1 = Longitud del flujo de escurrimiento sobre el terreno (m)

k = Coeficiente de escurrimiento
i = Intensidad

El coeficiente b está dado por la ecuación siguiente:

$$b = \frac{0,000028i + Cr}{(S_1)^{1/3}}$$

Dónde:

S₁ = pendiente de la superficie
Cr = coeficiente de retraso

Tabla 16. Coeficiente de retraso.

Valores del coeficiente de retraso	Cr
Superficies lisas asfálticas	0,007
Pavimento de concreto	0,012
Pavimento de gravado	0,017
Césped muy tupido	0,046
Pasto azul denso	0,060

Fuente: Elaboración propia en base a Jaramillo, 2002

El tiempo, en minutos, de escurrimiento en la zanja (t₂) se toma comúnmente como la longitud de la zanja más larga (L₂), dividida entre la velocidad de diseño de esta (V₂).

$$t_2 = \frac{L_2}{V_2}$$

6. Calcular el máximo del escurrimiento en la zanja (Q_p), en metros cúbicos por segundo, usando la siguiente ecuación llamada comúnmente como la fórmula racional:

$$Q_p = \frac{K \cdot i \cdot Ad}{3,6 \cdot 106}$$

Dónde:

K = Coeficiente de escurrimiento
i = Intensidad de la lluvia para una duración igual a tc
(mm/hora)
Ad = Área de la cuenca (m²)

7. Calcular el tamaño de la sección transversal de la zanja en metros cuadrados (A₂), usando la siguiente fórmula:

$$A_2 = \frac{Q_p}{V_2}$$

8. Decidir la sección transversal de la zanja. Las zanjas de tierra genEralmente son trapeciales, con taludes determinados por la estabilidad del material en sus bancos. El siguiente cuadro enumera las pendientes típicas de taludes para zanjas no revestidas, en diversos materiales.

Tabla 17. Pendientes típicas de taludes en zanjas no revestidas.

Material de la excavación	Taludes (horizontal: vertical)
Roca firme	1/4: 1
Roca fracturada	1/2: 1
Suelo firme	1: 1

Migajón gravoso	1 1/2: 1
Suelo arenoso	2 1/2: 1

Fuente: Elaboración propia en base a Jaramillo, 2002

En esta sección transversal, el área de la sección está dada por la ecuación siguiente:

$$A_2 = u^2$$

9. Calcular el radio hidráulico R en metros (área de la sección transversal dividida entre el perímetro mojado). Para el ejemplo arriba mencionado se calcula como sigue:

$$R = \frac{A_2}{u + 2v}$$

10. Finalmente se calcula la pendiente de la plantilla de la zanja (S₂), usando la siguiente ecuación comúnmente llamada de Manning:

$$V_2 = \frac{R^{2/3} \cdot A_2^{1/2}}{n}$$

Donde:

V₂ = Velocidad de diseño en la zanja (m/s)

n = Valores del coeficiente de rugosidad (ver la siguiente tabla)

Tabla 18. Coeficiente de rugosidad.

Material de la excavación
Plástico, vidrio, tubería estirada
Cemento puro, metal liso
Madera cepillada, tubería asbesto
Hierro forjado, acero soldado, lona
Concreto ordinario, hierro colocado asfáltico
Madera no cepillada, barro vitrificado
Tubería de hierro colocado
Acero remachado, tabique
Mampostería de pedacería
Tierra emparejada
Grava firme
Tubería de metal corrugado

Fuente: Elaboración propia en base a Jaramillo, 2002

7.7.1. Dimensionamiento de zanjas de interceptación

El dimensionamiento de las zanjas de interceptación se hace mediante la aplicación de fórmulas convencionales de flujo a superficie libre o descubierto. Para ello se deben considerar los aumentos de caudal aguas abajo, las pendientes de cada tramo, los remansos que se generan por cambios de pendiente y la localización de la estructura de caída.

La relación entre caudal y nivel en secciones dadas, está definida por la ecuación de Manning:

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

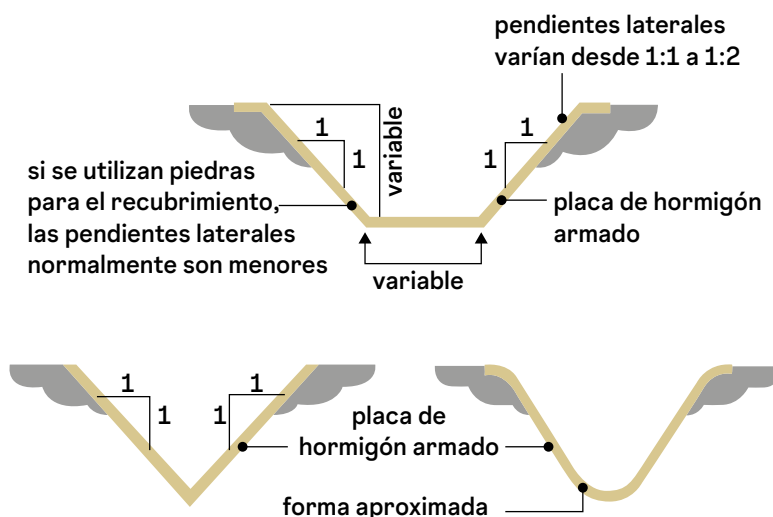
Donde:

- Q = Caudal en m^{3/s}
- A = Sección da la zanja en m²
- R = Radio hidráulico en m
- S = Pendiente del canal en m/m
- n = Coeficiente rugosidad

Tradicionalmente la geometría de las zanjas de interceptación de aguas lluvias construidas en rellenos sanitarios es de sección trapezoidal con pendientes laterales que varían entre el 1:1 y 1:2 (Vertical:Horizontal).

En la siguiente figura se muestran algunos diseños tipo de zanjas si bien, tratándose de rellenos sanitarios, es poco frecuente el uso de revestimientos, salvo que se trate de proteger rellenos de seguridad destinados a disponer residuos peligrosos o de rellenos sanitarios gran tamaño.

Figura 27. Esquema de drenaje pluvial (Zanjas)



Fuente: Elaboración propia en base a Jaramillo, 2002

7.7.2. Interceptación de aguas superficiales al interior del relleno

Adicionalmente a la interceptación de aguas lluvias perimetrales, es necesario diseñar un sistema que permita un manejo de las aguas lluvias que precipitan directamente sobre los sectores ya rellenos y sobre las áreas preparadas para rellenas.

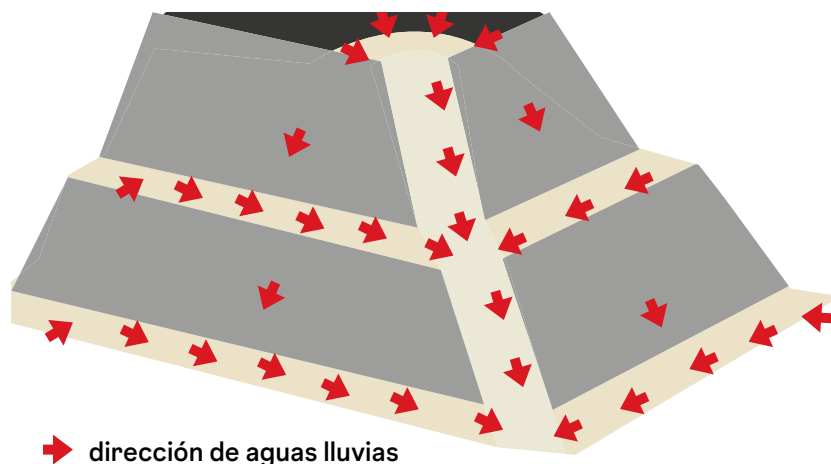
Con este fin es importante prever pendientes apropiadas para las superficies superiores de las celdas y emplazar canaletas de encausamiento que permitan un escurrimiento desde la superficie superior de las celdas hacia sectores externos, sin erosionar la cobertura.

El diseño de todo relleno sanitario debe considerar pendientes no menores al 2% ni mayores al 5% en las superficies superiores de las celdas sanitarias.

Una pendiente mayor al 2% permite asegurar el fácil escurrimiento de las aguas de precipitación hacia los costados de las celdas, minimizando de esta forma su infiltración al interior

del relleno y su posterior contaminación con lixiviados, en tanto que una pendiente menor al 5% minimiza la posibilidad de escurrimientos demasiado rápidos, capaces de erosionar y remover el material de cobertura.

Figura 28. Direccinamiento de las aguas lluvias en la superficie del relleno sanitario



Fuente: Elaboración propia, Morales 2024

El dimensionamiento de las zanjas de interceptación se hace mediante la aplicación de fórmulas convencionales de flujo a superficie libre o descubierto. Para ello se deben considerar los aumentos de caudal aguas abajo, las pendientes de cada tramo, los remansos que se generan por cambios de pendiente y la localización de la estructura de caída.

Las aguas de lluvia que atraviesan las capas de residuos aumentan su volumen en una proporción mucho mayor que la que produce la misma humedad de los residuos sólidos, razón principal por la que deben ser interceptadas y desviadas para evitar el incremento de lixiviado; de lo contrario, podría haber problemas en la operación del relleno y contaminación del agua subterránea.

Es importante estudiar la precipitación pluvial del lugar, con el fin de establecer las características de los drenajes perimetrales y las obras necesarias, considerando la máxima precipitación anual para el diseño. Así se minimizará la producción del líquido lixiviado y se evitará la contaminación de las aguas.

Para interceptar y desviar el escurrimiento de las aguas de lluvia que podrían ingresar a la infraestructura, se proyectarán canales, temporales y permanentes, de acuerdo con las condiciones de precipitación, área tributaria, tipo de suelo, vegetación, topografía, entre otros. Los canales permanentes servirán como drenes internos para impedir que las aguas de lluvia que caen dentro de la infraestructura ingresen a las celdas.

Los canales de drenaje de aguas de lluvia deben considerar los siguientes criterios técnicos:

- Escorrentías generadas por una precipitación de 24 horas de duración y con período de retorno de 25 años.
- Sección trapezoidal, con dimensiones mínimas de 0,30 m en la base y 0,5 m de profundidad.
- Pendiente máxima de 4% en suelos fácilmente erosionables o donde sea inevitable construir los canales con pendientes mayores al 4%, éstos deberán ser revestidos.
- La distancia mínima del canal permanente respecto al límite del área de disposición será de 3,0 m.
- Para facilitar el escurrimiento de las aguas de lluvia, las superficies expuestas de las celdas deben tener una pendiente mínima de 2% con dirección al canal.

7.8. Cerco perimetral

El relleno sanitario debe estar cercado, como mínimo con alambre de púas de cinco hilos de 1,50 m de alto, partir del nivel del suelo con postes de madera, hormigón o tubos galvanizados, debidamente empotrados y colocados a cada 2,5 m entre sí, con alambre de púas entreverados cada 0,15 m; o en su defecto malla de acero.

7.9. Cerco vivo o áreas de amortiguamiento

Es necesaria la conformación de un cerco vivo de árboles y arbustos como aislamiento visual, dando buena apariencia estética al contorno del terreno, y puede servir para retener papeles y plásticos levantados por el viento. Se recomienda plantar árboles de rápido crecimiento como el pino ciprés, eucalipto, bambú, etc.

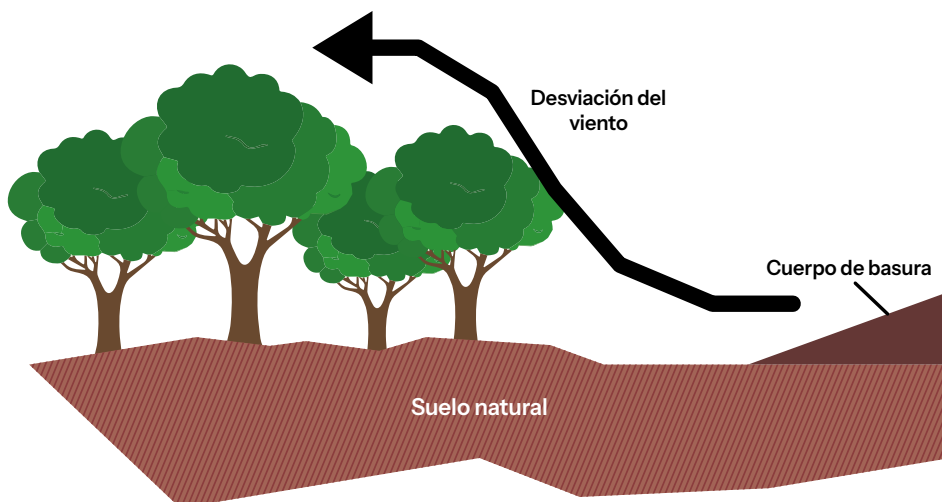
Figura 29. Cerco perimetral de malla olímpica.



Fuente: Cerco perimetral, Relleno Sanitario "El Ingenio", Municipio de El Alto

En muchos casos también resulta necesario dejar libre una franja de terreno de 5 a 20 metros entre el lindero y el borde del área de las macroceldas o celdas de disposición final, a fin de contar con una zona o franja de amortiguamiento que mitigue los posibles efectos negativos de las operaciones con residuos en los predios vecinos, así como ayudar a la desviación del viento, como se muestra en la figura.

Figura 30. Detalle cerco vivo



Fuente: Elaboración propia en base a Jaramillo, 2002

7.10. Caseta de control o vigilancia

La caseta de control ubicada a la entrada del relleno sanitario tendrá como objetivo realizar el control de la entrada de residuos que ingresan al mismo, así mismo como el registro de las cantidades de residuos.

7.11. Balanza

Posterior al control de ingreso se debe prever la instalación de pesaje que puede ser una balanza mecánica o electrónica conectada a un sistema computacional que permita un buen control de los residuos ingresados y el adecuado manejo de la información. Los rellenos de gran tamaño pueden requerir la instalación de dos o más balanzas, de manera de impedir la acumulación de una gran cantidad de vehículos en la entrada durante las horas de alta frecuencia de llegada de camiones recolectores.

Figura 31. Balanza electrónica.



Fuente: Relleno Sanitario Mecanizado de Kara Kara, Cochabamba

7.12. Otras áreas del relleno sanitario mecanizado

Disposición final en celda de emergencia.

El proyecto de relleno sanitario deberá contemplar el diseño y la construcción de una celda de emergencia para la disposición temporal de residuos sólidos no peligrosos de fuente domiciliar y asimilables, que podrá ser habilitada ante eventualidades por condiciones climáticas u otras que no permitan la disposición de residuos en el frente de trabajo del relleno sanitario. Esta celda tendrá una capacidad que permita la disposición de los residuos por un periodo de tres meses, debiendo contar con el sistema de impermeabilización de base y taludes a través de geosintéticos; concluida su vida útil, deberá ingresar a un proceso de cierre técnico.

Disposición final de residuos bioinfecciosos.

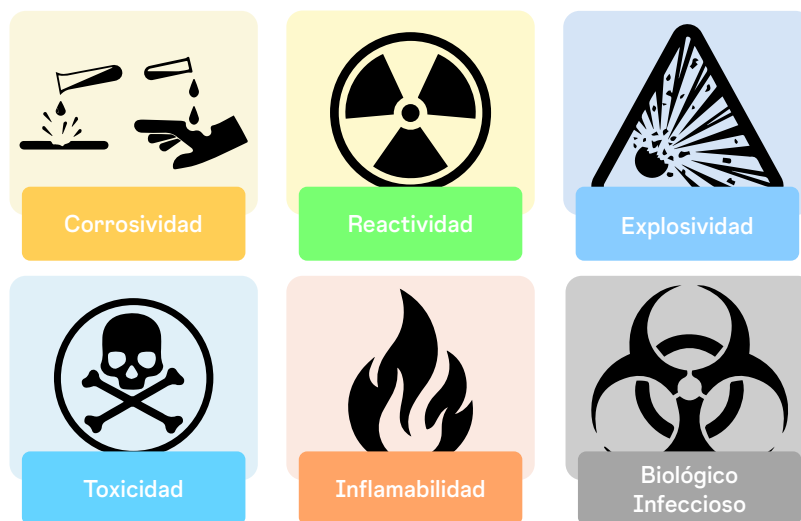
Los residuos bioinfecciosos deberán ser dispuestos en una celda de seguridad que contará con la impermeabilización conformada por las siguientes capas, de arriba hacia abajo: subsuelo natural nivelado y compactado (0,20 m); arcilla tres capas de 20 cm; lámina de polietileno de alta densidad (HDPE de espesor 1,5 mm; geotextil NT 2000 y una capa de suelo natural espesor 20 cm. Los lixiviados que se generen quedarán confinados en la misma celda.

Área de almacenamiento temporal de residuos peligrosos.

En lo que refiere a confinamiento de residuos peligrosos. La NB 759 establece las características que deben reunir los sitios destinados al confinamiento de residuos peligrosos, no se establece los criterios de diseño, el complejo incluirá un sitio de almacenamiento temporal de residuos peligrosos domésticos y no así una celda de disposición final, las condiciones para esta última requieren de una adecuada operación y mantenimiento

Se considera residuo peligroso: “Son aquellos que conllevan riesgo potencial al ser humano o al ambiente, aquellos que presenten una o más de las características: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, bioinfecciosidad (los residuos bioinfecciosos serán dispuestos en la celda de seguridad (de residuos bioinfecciosos)”. CRETIB

Figura 32. Simbología CRETIB



Fuente: MMAyA, 2022

La caseta de almacenamiento de residuos peligrosos, será:

Figura 33. Almacenamiento residuos domésticos peligrosos



Fuente: MMAyA, 2022

Se contempla una caseta de almacenamiento de residuos peligrosos, ambiente ventilado (con malla olímpica en las paredes), en la operación se depositarán recipientes etiquetados con los distintos tipos de residuos que puedan generar en la localidad.

Ley 755 Gestión operativa de los residuos peligrosos Art. 37 Acápito VII Los residuos de fár-

macos, pilas, baterías, focos, lámparas, luminarias en desuso, que se generan en fuentes de residuos municipales, de acuerdo a lo establecido en norma técnica emitida por el Ministerio cabeza de sector, deberán ser almacenados en recipientes diferenciados y posteriormente entregados al servicio de aseo urbano o depositados en los centros de acopio temporal autorizados por la autoridad competente.

7.13. Alternativa rellenos sanitarios secos o semi-secos

El componente más importante de esta alternativa es la recuperación de residuos orgánicos e inorgánicos de los residuos que son destinados al relleno sanitario, mediante la separación y clasificación semi mecanizada o mecanizada de los residuos mixtos incorporando una planta de clasificación de residuos y una planta de tratamiento de residuos orgánicos, complementarios a la disposición final del rechazo de este sistema de separación previo en el Relleno sanitario. En el proceso de separación de residuos finos y gruesos, se reducirá entre el 60 % y 80 % de los residuos orgánicos, por lo cual el relleno sanitario al recibir solamente el 20% al 40% de residuos Orgánicos puede considerarse como un relleno seco o semi seco. Al reducirse la generación de lixiviados, también se reducen los problemas ambientales y mejora el manejo de la disposición final.

Los residuos previos a disponerse son enfardados por medio de máquinas específicas (prensas), tal como lo muestra la figura. Es necesario destacar que este tipo de operación no evita la construcción del paquete impermeable y los sistemas de gestión de lixiviados y biogás, necesarios para todo relleno sanitario.

Figura 34. Relleno sanitario semi-seco



Fuente: EDTP Camiri, 2022

7.14. Alternativas de rellenos sanitarios semiaerobios “Fukuoka”

Los rellenos sanitarios Fukuoka son un tipo de relleno sanitario desarrollado en la ciudad de Fukuoka, Japón, en la década de 1960. Este método es una alternativa más eficiente y ambientalmente amigable en comparación con los rellenos sanitarios tradicionales. Entre sus características principales tenemos:

Sistema semiaeróbico.

A diferencia de los rellenos anaeróbicos tradicionales (que generan más lixiviados y metano), el método Fukuoka permite cierto flujo de aire, lo que acelera la descomposición de la materia orgánica y reduce la producción de gases nocivos.

Estructura por capas.

Se construye en **células** con capas de basura compactada y material de cobertura (tierra o materiales sintéticos) e incluye un sistema de drenaje para lixiviados y ventilación para gases.

Menor impacto ambiental.

Reduce la generación de **metano** (un gas de efecto invernadero) y disminuye la contaminación por **lixiviados** gracias a su sistema de tratamiento.

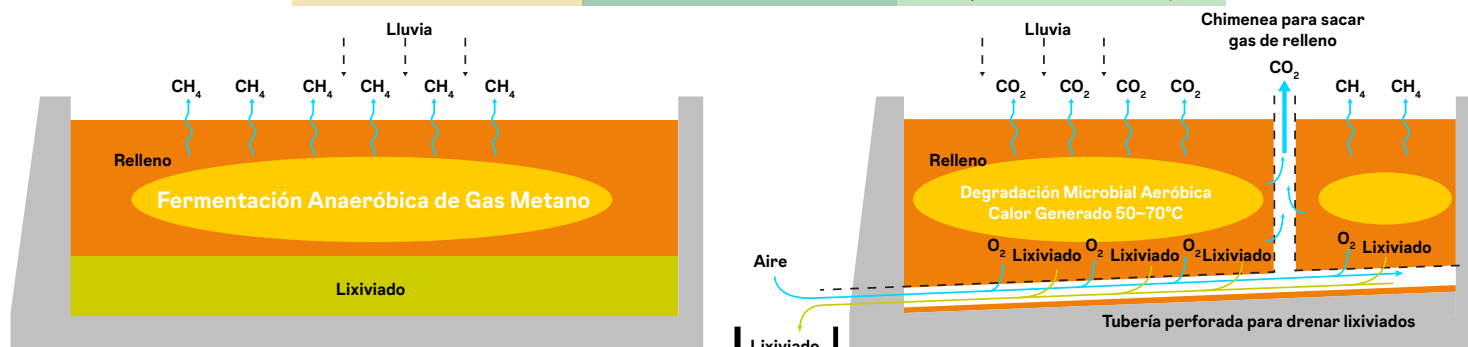
Más rápido proceso de degradación.

Los residuos se descomponen más rápido que en un relleno tradicional, lo que permite un cierre y recuperación del terreno en menos tiempo.

Para comprender desde un punto mas comparativo los rellenos sanitarios tradicionales son también conocidos como anaerobios y los Fukuoka como semi-aerobios, el siguiente cuadro describe las principales diferencias entre estos dos métodos:

Figura 35. Rellenos sanitarios tradicionales vs Fukuoka

Característica	Relleno Fukuoka	Relleno Tradicional (Anaeróbico)
Tipo de ambiente	Semi-aeróbico (flujo de aire controlado)	Anaeróbico (sin oxígeno)
Producción de metano	Menor (oxidación parcial)	Alta (genera más gases de efecto invernadero)
Lixiviados	Menor volumen, más tratable	Mayor volumen, más contaminante
Degradación	Más rápida (años)	Lenta (décadas)
Costo operativo	Moderado	Bajo (pero con mayores impactos ambientales)



- 1. Contribuye al calentamiento global a través de generación de CH₄
- 2. Requiere descomposición a largo plazo bajo condiciones anaeróbicas para reuso de terreno

- 1. Generación menor de CH₄, previene el calentamiento global
- 2. Estabilización rápida y mantenimiento fácil

Fuente: Matsufuji, 2007

Este método ha sido adoptado en varios países, como México, Colombia y Brasil, por ser una solución intermedia entre los rellenos tradicionales y tecnologías más costosas como los rellenos de bioreactores.



Macroelda 1, Relleno Sanitario Mecanizado de Kara Kara, Cochabamba

8. Construcción relleno sanitario mecanizado

La buena construcción de un relleno sanitario es de vital importancia en comparación con la de otras obras públicas, debido a la duración de su ejecución y al permanente mantenimiento que requiere. Para planificar la construcción y el avance del relleno sanitario es conveniente contar con una serie de planos: plano de diseño del proyecto, de planta general de localización de las obras, plano de las modificaciones del terreno (configuración inicial del sitio) y los detalles de las obras de infraestructura.

También se requieren los planos de la planta y los perfiles de las zanjas o terraplenes, que indican la forma de excavación y la configuración del relleno; estos permitirán orientar las configuraciones parcial y final de la obra, así como la forma de programar el frente de trabajo y su avance, calculando los volúmenes ocupados y las alturas de acuerdo con el diseño.

8.1. Preparación del terreno

La preparación del terreno es indispensable para permitir la construcción de la infraestructura básica del relleno, recibir y disponer los residuos sólidos en forma ordenada con el menor impacto posible, del mismo modo facilitar las obras complementarias del relleno sanitario.

Limpieza del área del relleno sanitario. En el terreno se debe preparar un área que servirá de base o suelo de soporte al relleno, siendo por lo general necesaria la limpieza de malezas y tala de árboles y arbustos, puesto que éstos constituirán un obstáculo para la operación. Esta limpieza debe hacerse por etapas, de acuerdo con el avance de la obra, evitando así la erosión del terreno.

Para fines de desmonte se consideran los siguientes tipos de vegetación:

- i. Selva o bosque, constituida por árboles, arbustos, hierbas, palmeras; típicos de la regiones cálidas y húmedas. Son ejemplos de vegetación selvática, las palmeras, ceibas, mangos, cedros, entre otros.
- ii. Vegetación de regiones áridas o semiáridas, constituida por especies predominantemente arbustivas y herbáceas, además de los árboles de poca altura y como ejemplo están: molle, tara, algarrobo, queñua, entre otros, etc.
- iii. Vegetación de regiones desérticas, zonas cultivadas o de pastizales, se caracteriza por estar constituida por cactáceas, vegetación de sembradío entre otros.

Nivelación. La nivelación es el proceso que permite tener el mismo nivel en toda el área del terreno, una vez que se completan los procesos de desmonte, deshierbe y excavación de tierra. La nivelación también se realiza en la construcción de caminos, sistemas de drenaje y otras instalaciones de apoyo al relleno sanitario.

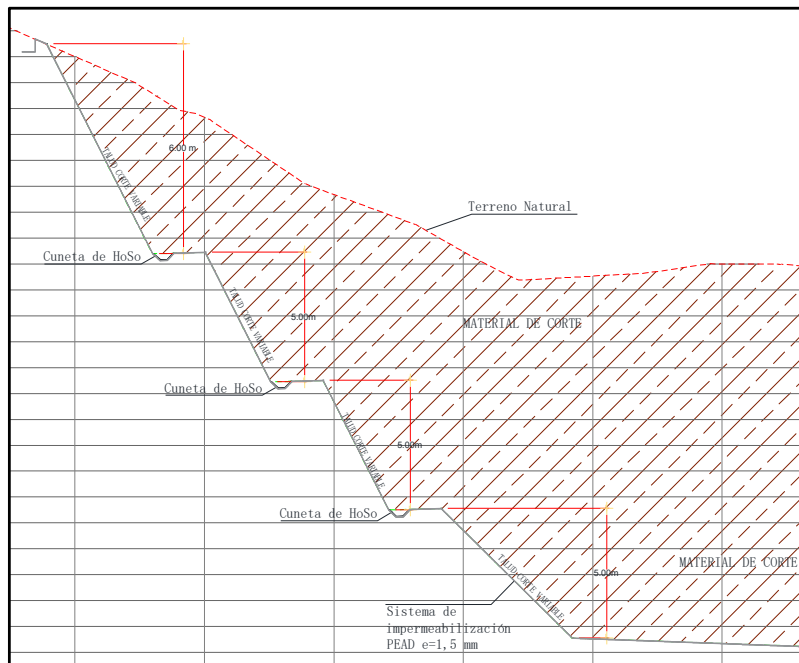
Los planos de nivelación deben desarrollarse de acuerdo con el diseño del drenaje del sitio, las medidas de control de la erosión y las rutas de acceso. Los planos, deben mostrar elevaciones del contorno de todas las zonas modificadas y establecer criterios para las pendientes mínimas y máximas en todas las áreas de corte y de relleno. Es importante que las pendientes e inclinaciones de la base del relleno sanitario se desarrollen sólo después de considerar cuidadosamente las condiciones subsuperficiales (por ejemplo, tipo y profundidad del suelo con respecto al nivel freático) y el drenaje del área.

Cortes y conformación de taludes. Los cortes son las excavaciones o remoción de los

materiales, realizadas en el terreno natural, en la ampliación o abatimiento de taludes, en derrumbes y en rebajes de terraplenes. Debido a las grandes variaciones en el tipo y disposición de los materiales, es indispensable analizar la estabilidad del terreno para definir el talud más apropiado.

Se puede establecer como norma que, para un corte de más de 5 m de altura, se debe realizar el estudio de estabilidad con base en principios de la geotecnia. Para alturas menores, casi siempre se puede definir el talud con base en la clasificación de las rocas y suelos y en el estado de disposición de los materiales de corte.

Figura 36. Imagen Esquemática de corte talud-banquina para emplazamiento en terrenos ondulados



Fuente: Elaboración propia, 2024

Para un corte de baja altura (menor a 5 m), se puede recomendar un único talud; para alturas mayores, es mejor tener dos taludes diferentes, mientras que en otros casos es necesaria la construcción de bermas o banquetas intermedias.

Los taludes del terreno se dejan de tal manera que no causen erosión y puedan darle una buena estabilidad al relleno. Estos pueden ser desde verticales hasta del tipo 3:1 (horizontal: vertical), dependiendo del tipo de suelo.

La superficie de las terrazas o terraplenes deberá tener una pendiente del 2% con respecto a los taludes interiores, a fin de conducir las aguas de lixiviado a las zanjas de drenaje y evitar encharcamientos cuando se usen como vías temporales de acceso; lo anterior contribuye también a brindar estabilidad a la obra. Las zanjas podrán tener forma trapezoidal, cuadrada o rectangular, dependiendo de las condiciones del suelo. La separación entre ellas será de 0,5 a 1 m, según se requiera para garantizar su estabilidad mientras permanecen vacías.

Préstamos. Son excavaciones que se ejecutan en los lugares fijados en el proyecto a fin de obtener el material de cubierta. Para iniciar el trabajo de préstamo, previamente se despalmará la superficie por excavar, desalojando la capa superficial de terreno natural que por sus características no sea adecuada para ser utilizada como material de cobertura. Los despalmes sólo se ejecutan en material "A". El despalme se inicia después de que se haya efectuado el seccionamiento de la superficie y el material producto del despalme se colocará en el lugar

que se indique. Se debe procurar que durante la excavación no se alteren ni modifiquen las referencias y bancos del nivel del seccionamiento. La ubicación y las dimensiones de los préstamos serán fijadas en cada caso en el proyecto. Los préstamos se deben excavar hasta la profundidad fijada en el proyecto; siempre la excavación será en material apropiado y en la forma más regular posible a fin de facilitar su medición.

8.2. Criterios generales para la construcción de celdas

Para la construcción de la primera celda se debe delimitar el área que ocupará, de acuerdo con las dimensiones estimadas basadas en la cantidad de residuos y grado de compactación fundamentalmente. La celda debe ser impermeabilizada en la base y los taludes, con el objeto de evitar el flujo de lixiviados.

La base de la celda, previa a la colocación del sistema de impermeabilización, deberá prepararse con una pendiente de los extremos hacia el centro de la celda, de por lo menos el 2%, que permita colocar los lixiviados.

Después de terminada la impermeabilización en el fondo debe construirse el sistema de recolección, de lixiviados, el cual está compuesto por un sistema de drenaje.

Debe garantizarse un sistema de evacuación de aguas lluvias que permita el normal funcionamiento del relleno durante los periodos de lluvias, a través de canales de drenaje perimetrales. El RSM debe tener un mínimo de instalaciones que permitan la disposición de los residuos sólidos de manera higiénica, cómoda y organizada.

Cada celda del relleno será contigua con la del día anterior y así sucesivamente, hasta formar una hilera de celdas que se denominarán franjas. Estas celdas se construirán de acuerdo con la topografía del sitio.

8.2.1. Barrera geológica

La barrera natural o geológica es una capa de suelo de baja permeabilidad que se encuentra arriba de la primera capa freática. Lo ideal para la construcción de un relleno sanitario es que el terreno disponga de una barrera natural o geológica conformada por arcilla, limo y morrenas. Si el suelo natural tiene una permeabilidad menor a $k = 10^{-7}$ sobre índice y un espesor de 3 m o más, constituye una buena barrera geológica para un relleno sanitario mecanizado.

El objetivo de preferir un terreno con barrera geológica es:

Figura 37. Importancias de las barreras geológicas.



Fuente: Elaboración propia, 2024

8.2.2. Capa base

Para una mejor protección de las aguas subterráneas, es muy importante que se construya una capa de arcilla impermeable en la base del relleno sanitario, a fin de impedir la filtración

de los lixiviados hacia las capas freáticas. Generalmente, se considera como impermeable un suelo con un factor igual o menor a 10^{-7} m/s.

Tabla 19. Parámetros para la capa mineral de base.

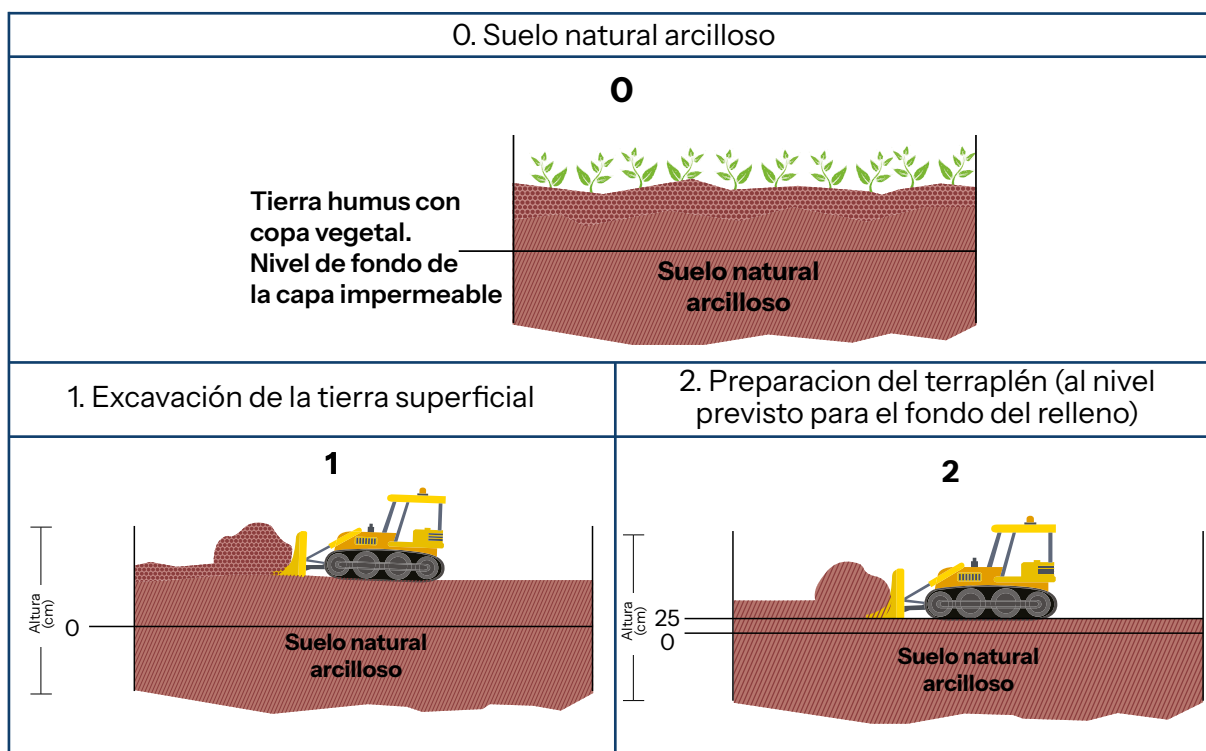
Criterio	Valor recomendado
Espesor de capa base	0,75 (m)
Factor de Permeabilidad	10^{-7} (cm/s)
Contenido de partículas pequeñas (< 0,002 mm) (%)	>20 %
Contenido de arcilla	> 10 (%)
Tamaño mínimo de partículas	20 (mm)
Contenido de agua	< 5 (%)
Contenido de materia orgánica	< 5 (%)

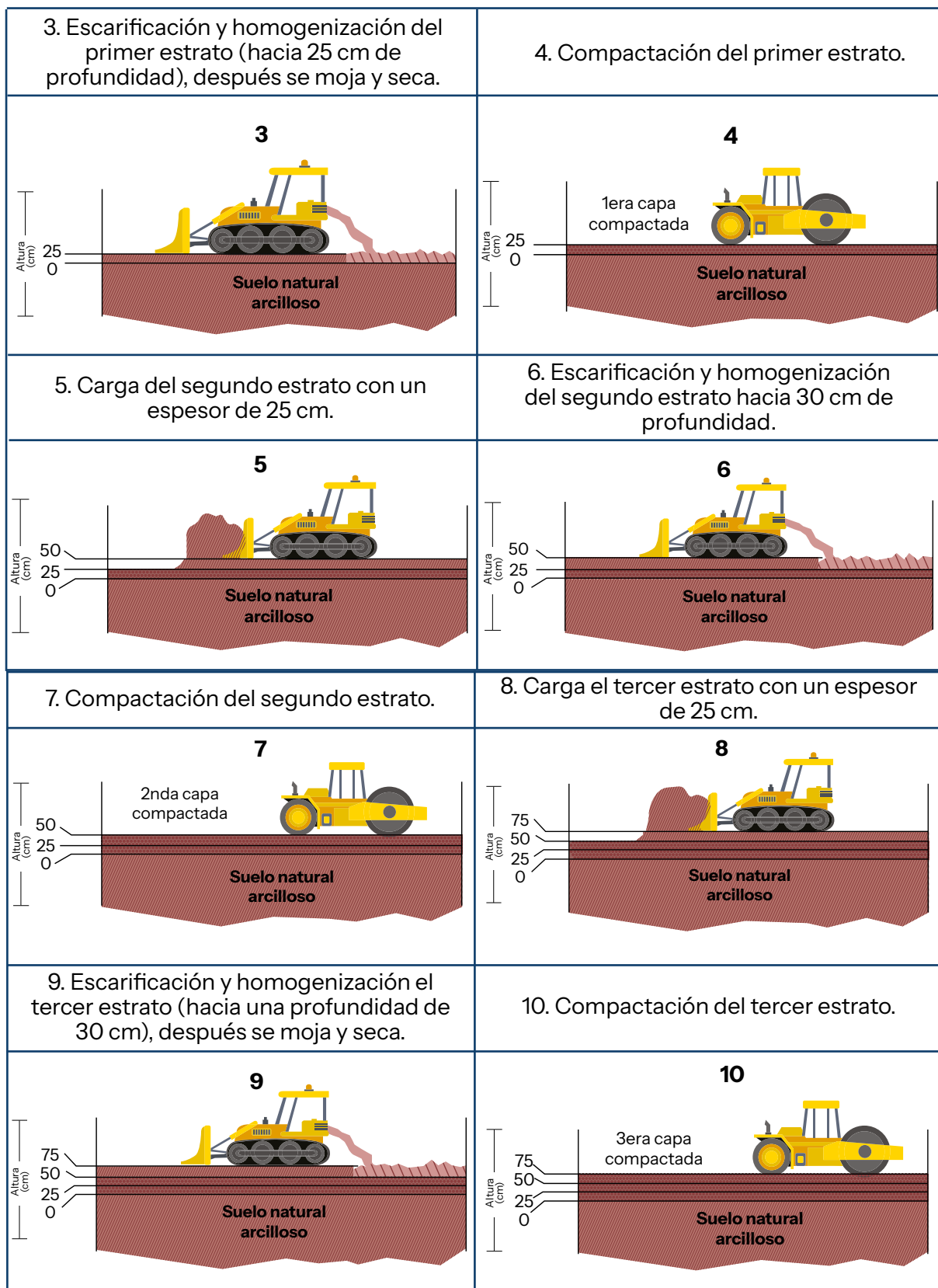
Fuente: Elaboración propia en base a Jaramillo, 2002

El suelo que tiene las características más próximas a los criterios descritos sería el más apropiado tanto para la capa base como para material de cobertura intermedia y final del relleno sanitario.

La capa base del relleno sanitario sobre una barrera natural o geológica requiere los trabajos y valores que se muestran en la siguiente figura:

Figura 38. Construcción de capa base CON barrera natural.

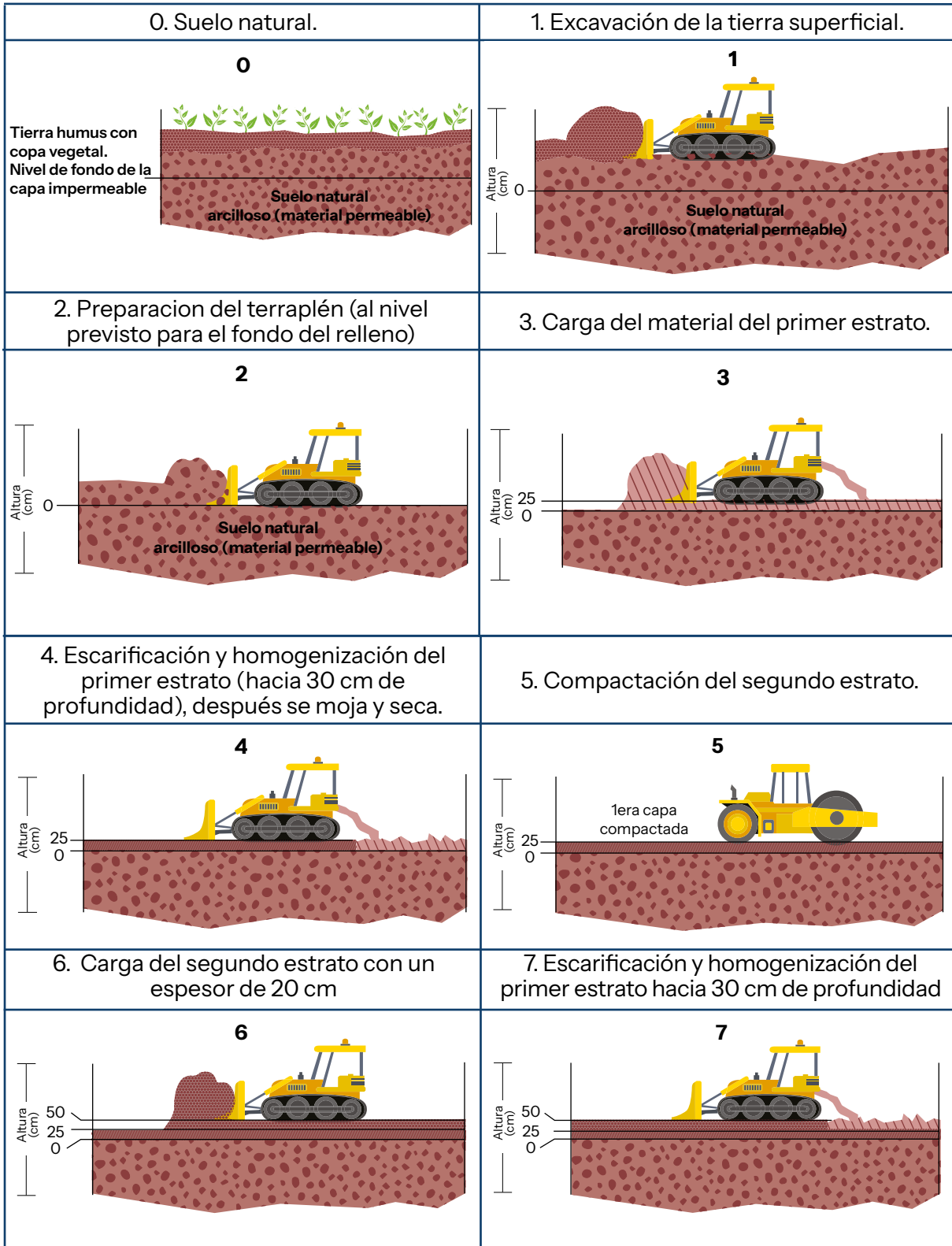


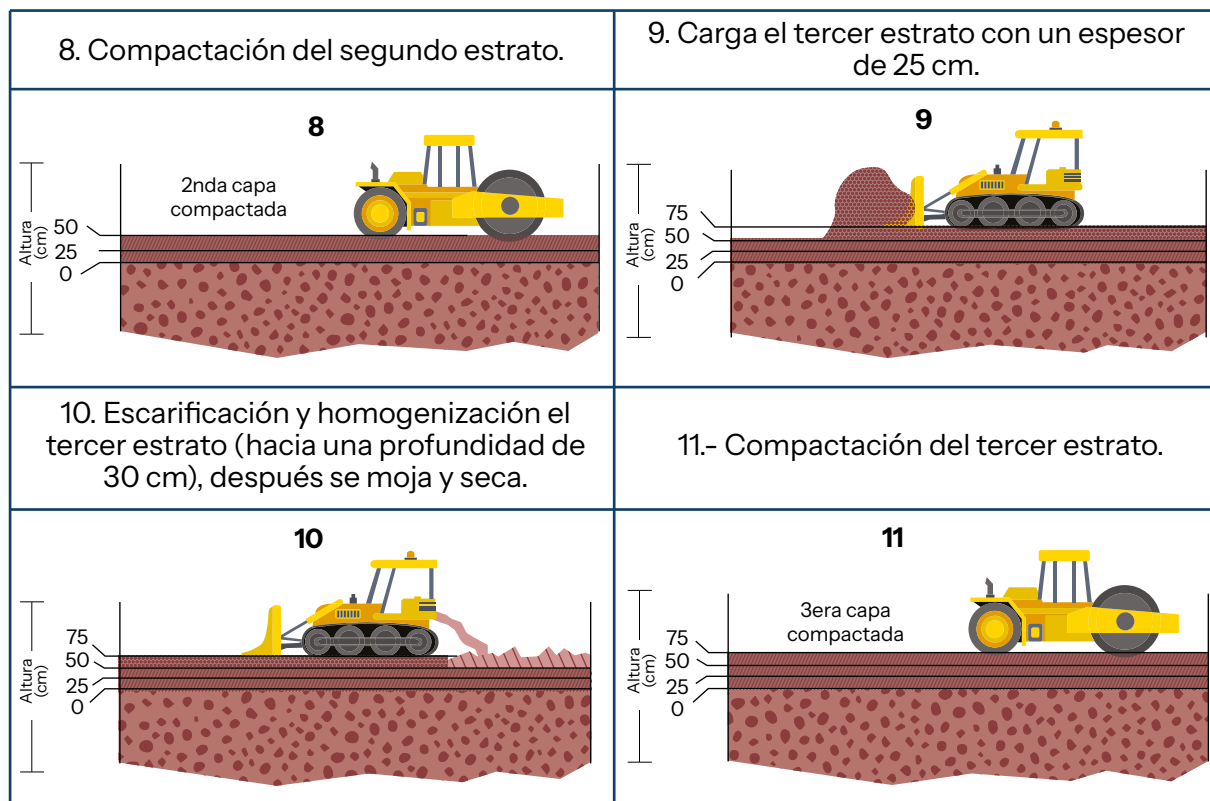


Fuente: Elaboración propia en base a Roben, 2002

Si un municipio no dispone de la maquinaria necesaria para hacer la preparación de la capa mineral como se ha descrito en las imágenes, se recomienda hacer al menos una buena compactación del suelo natural, si es posible una carga en tres estratos.

Figura 39. Construcción de capa base SIN barrera natural.





Fuente: Elaboración propia en base a Roben, 2002

Para la impermeabilización con el suelo natural se debe colocar una capa de arcilla de unos 0,60 cm de espesor (tres pasadas de 20 cm como se observa en la figura), la cual llevará una proporción de 40% de arcilla, con 25% de arena (0.1-1.0 mm) y 35% de grava (10-50 mm). Se debe efectuar la mezcla del material, hasta lograr la homogeneización de la mezcla; el material ya mezclado debe ser regado hasta que alcance una humedad óptima 10-15%, dejar reposar durante tres días para lograr una mayor homogeneización en el contenido de agua.

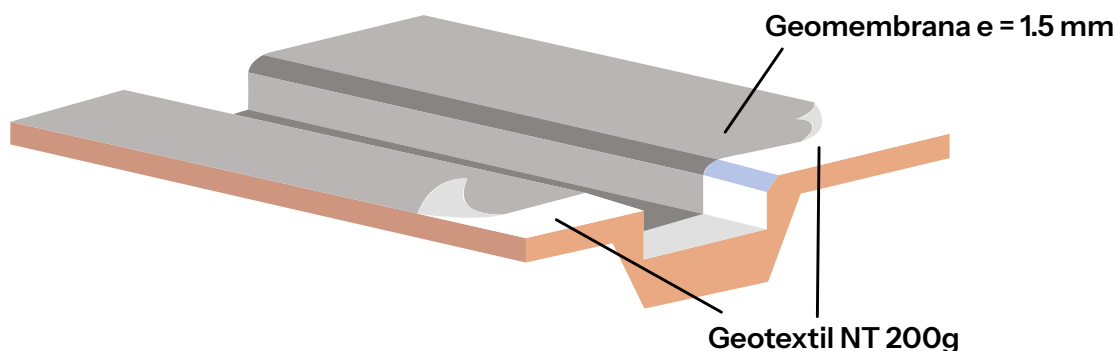
El material debe ser extendido en forma regular sobre todo el piso de la celda, conformando una primera capa de 20 cm de espesor, para luego compactarlo al 90% utilizando rodillo compactador sin vibración. Lo que se desea es lograr un amasado del material con objeto de darle una textura y acomodo a las partículas de la mezcla para maximizar su eficiencia impermeable. Aplicando este sistema de compactación del material se espera obtener permeabilidades del orden de 1×10^{-7} cm/s.

Una vez que se encuentre conformada la primera capa y se encuentre adecuadamente compactada, se procederá a repetir el procedimiento para formar una segunda capa de igual espesor, y una tercera, logrando con ello un espesor de unos 0,60 m.

8.2.3. Uso de geosintéticos

Para los rellenos sanitarios mecanizados, el sistema de impermeabilización será como muestra el siguiente esquema:

Figura 40. Sistema de impermeabilización sintética.



Fuente: Elaboración Propia en base a Helvetas, 2020

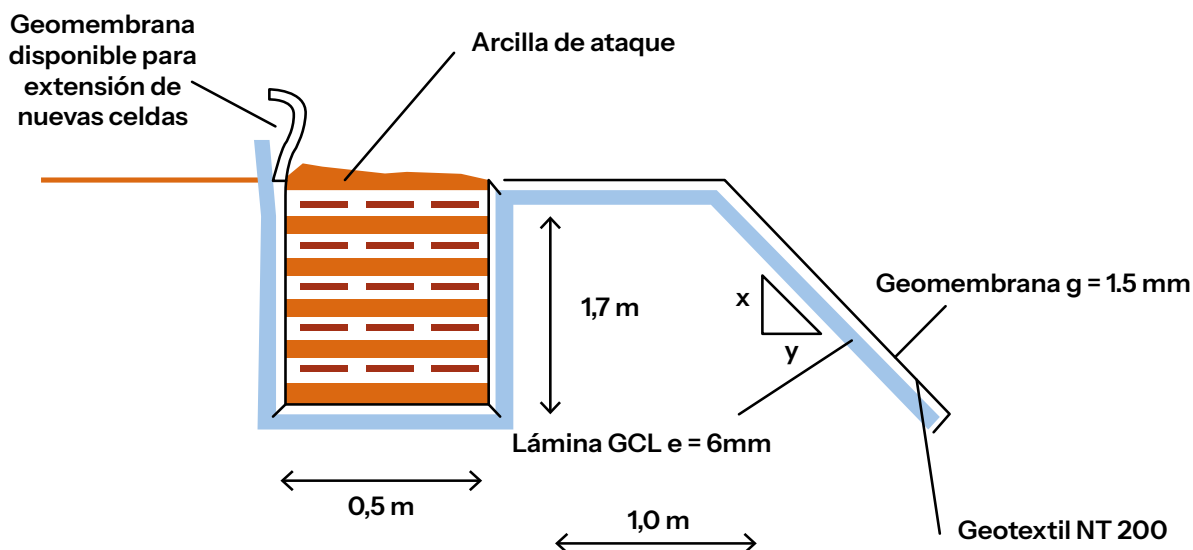
La impermeabilización sintética, efectuada con geomembrana deberá ser colocada al fondo de la base como se observa en la figura, para que la base esté en condición de impedir el desgarramiento de la lámina se debe tener un subsuelo natural nivelado y compactado al 95% del Proctor modificado y proveer así un soporte uniforme; además, estarán recubiertas con geotextil, para protegerlas contra los daños mecánicos.

Este sistema de drenaje inferior debe asegurar que se acumule menos de 0,50 m de lixiviado sobre el estrato compuesto de impermeabilización para minimizar la posible contaminación del agua subterránea.

El anclaje se debe hacer excavando un canal de las dimensiones según el diseño en el perímetro de la celda para evitar que la geomembrana se deslice fuera de su posición y no cumpla la función de impermeabilización.

El anclaje se realizará en una zanja en el perímetro de la celda a una distancia de 1 m del borde de esta, la zanja tiene una profundidad de 0,5 m. Los geosintéticos serán dispuestos en esta zanja y cubrirlos con suelo natural seleccionado. A través de este anclaje se evitará que la lámina se deslice fuera de su posición.

Figura 41. Anclaje geomembrana.



Fuente: Elaboración Propia en base a Helvetas, 2020

8.2.4. Letrero de obra

Antes de empezar cualquier labor en un relleno sanitario, se debe dar la información correspondiente a la comunidad a través de medios de comunicación, indicando cuándo se inician las obras, en qué consisten, cuál debe ser la participación de los usuarios y cuál será su empleo futuro. Asimismo, se debe colocar un cartel, que tenga como mínimo la siguiente información:

Nombre del municipio; Nombre de la empresa que presta el servicio y su identificación; Nombre del relleno sanitario y alguna identificación con un mensaje propio.

Es clave mantener en el relleno sanitario a una persona que pueda dar información sobre las obras que se realizan.

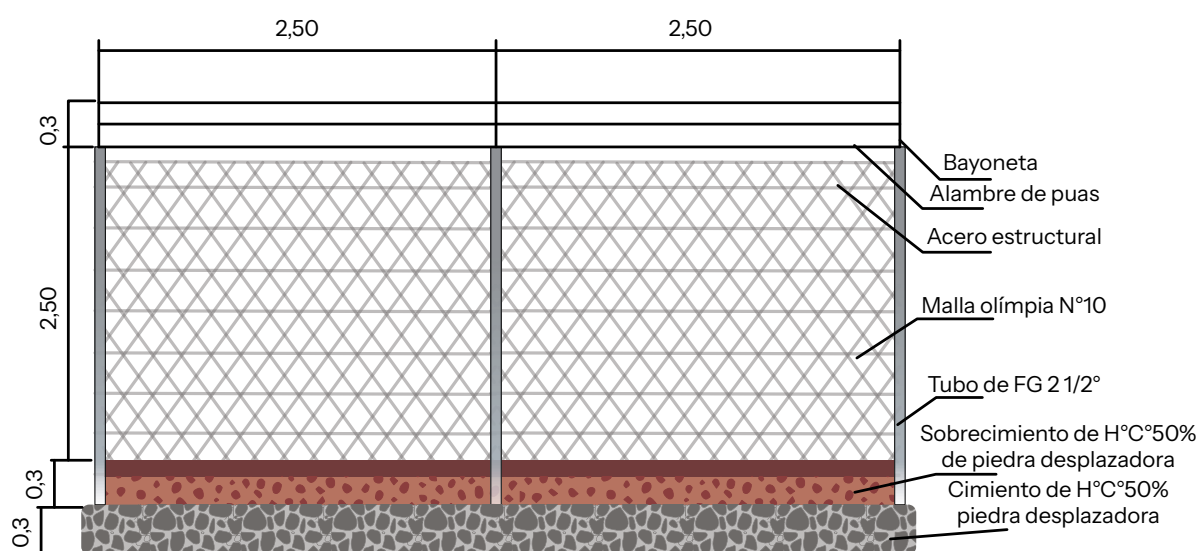
8.2.5. Construcción cerco perimetral

El cerco perimetral delimita el predio, asimismo sirve de cortina rompe viento, aislamiento visual del área de operaciones y delimitación del RSM. El cerco perimetral también permite atrapar papeles y objetos livianos que el viento puede dispersar durante la operación del RSM.

Se puede construir con materiales como malla olímpica y postes prefabricados o con materiales como cañas, troncos, plantones y árboles nativos. Se debe evitar los materiales costosos (ladrillo, alambre de púas, prefabricados, etc.).

El cerramiento perimetral del área de operación, contempla la instalación de una malla olímpica como mínimo de 2,50 m de alto, con postes prefabricados de hormigón empotrados en dados de hormigón, y colocados cada 3 m entre sí y tres hileras de alambre de púas en la parte superior. Para evitar el ingreso de animales menores al área de operación.

Figura 42. Cerco perimetral con malla olímpica.



Fuente: Elaboración Propia en base a Helvetas, 2020

La definición debe estar dada por las condiciones del lugar, por ejemplo, por la presencia constante de materiales, sería necesaria la utilización de malla olímpica e incluso se puede dar la alternativa de cierre parciales (fases futuras) con alambre de púas y en malla olímpica en las áreas de operación.

Los postes o parantes de madera deberán ser plantados en el suelo a las distancias señaladas en los planos y aproximadamente a 60 cm de profundidad, debiendo empotrarse firmemente mediante un compactado perfecto en todo su contorno (hincado). La parte del poste que deberá ir empotrada al suelo deberá ser impermeabilizada en toda su superficie, mediante una capa de alquitrán.

El alambre de púas será instalado en el número de hileras o filas establecido en los planos o formulario de presentación de propuestas, sujetas a los postes mediante alambre galvanizado o grapas confeccionadas especialmente para el efecto.

8.2.6. Canal perimetral

El canal perimetral es de suma importancia, sobre todo en zonas de lluvia para evitar que el agua superficial penetre en el RSM. El canal perimetral debe tener una sección uniforme y por lo general puede ser excavado sin recubrimiento de concreto u otro material aislante.

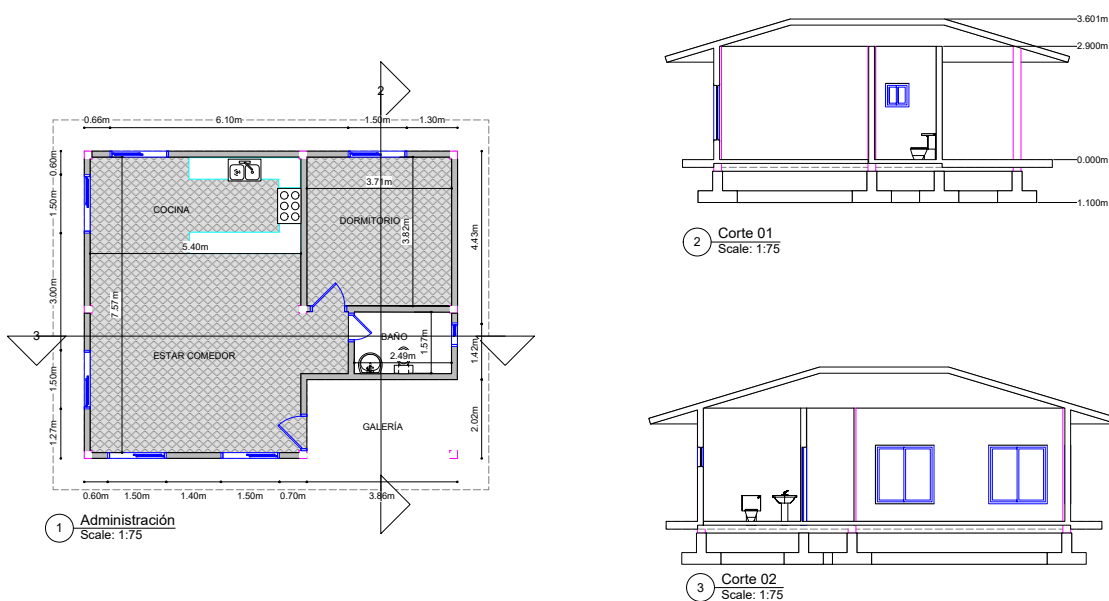
A medida que progrese la excavación se tendrá especial cuidado con el comportamiento de las paredes de la excavación, a fin de evitar deslizamientos. Si esto sucediese no se podrá fundar sin antes limpiar completamente el material que pudiera llegar al fondo de la excavación.

Los materiales que vayan a ser utilizados posteriormente para rellenar zanjas o excavaciones se apilarán convenientemente a los lados de esta, a una distancia prudente que no cause presiones sobre sus paredes; las excavaciones terminadas, deberán presentar superficies sin irregularidades.

8.2.7. Caseta de seguridad

La construcción de la caseta es importante para ser usada como: portería, lugar para guardar las herramientas, cambio de ropa (antes y después del trabajo) e instalaciones sanitarias. Esta caseta deberá instalarse a la entrada del relleno sanitario, pudiendo ser construida con materiales propios de cada región y de acuerdo a las necesidades del tipo de relleno sanitario a construir y personal que trabajar en el sitio.

Figura 43. Vista frontal y en planta – Caseta de control



Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2024

8.2.8. Instalaciones sanitarias y eléctricas

Un relleno sanitario debe contar con los servicios de saneamiento básico y las instalaciones eléctricas para iluminación y caseta de seguridad. El agua debe estar disponible para control de incendios y control de polvo.

8.2.9. Seguridad y estabilidad del relleno sanitario

Desde el punto de vista de la estabilidad del suelo, el relleno sanitario construido al lado de un talud se puede considerar como una colina artificial. El plano horizontal se diseña según la topografía específica del sitio. Lo más importante es que el diseño asegure la estabilidad tanto del fondo como de los taludes del relleno. Se debe considerar, si en el relleno sanitario se disponen todo tipo de residuo o si se valoran los residuos biodegradables y reciclables; en el caso de disponer también residuos biodegradables, la humedad y la pérdida de materia a causa de su descomposición baja la estabilidad de la celda y por ende de la macrocelda y del relleno sanitario.

Se deben tomar en consideración dos tipos de inclinación:

1. La inclinación del terreno, si se hace el relleno en un área inclinada (como en una quebrada seca)
2. La inclinación de la celda de residuos sólidos.

Existen dos criterios importantes para optimizar la inclinación del talud. Si el talud es muy inclinado, el volumen disponible crece proporcionalmente, pero baja la estabilidad de la celda (cuerpo) de residuos sólidos y, en consecuencia, hay más peligro de caídas del material.

Si se construye un relleno sanitario sobre un terreno inclinado, son válidos los mismos principios para la estabilidad de ese terreno. No se debe utilizar un terreno demasiado inclinado para no arriesgar la seguridad estática de la celda de residuos sólidos que podría caerse completa o parcialmente. La presencia de fuentes de agua, bajo la celda de residuos sólidos o un drenaje insuficiente aumentaría ese riesgo. Además, es casi imposible hacer una compactación apropiada sobre un terreno sumamente inclinado.

8.2.10. Muros de contención

Respecto a la implementación de muros de contención, se podrán aplicar diversos materiales que cumplan con esta finalidad, por ejemplo, el uso de gaviones es una alternativa muy importante para la contención. Así mismo, muchos rellenos sanitarios mecanizados utilizan llantas o neumáticos fuera de uso que son de gran volumen y persisten en el medio ambiente.

8.2.11. Construcción de drenajes pluviales

El manejo de las aguas pluviales tiene como objetivo evitar su infiltración al interior del volumen de residuos sólidos, para evitar principalmente el aumento de líquidos lixiviados y gases, la erosión del sellado o cobertura del relleno sanitario, así como el deterioro de los caminos de acceso y a otras obras de infraestructura. Especialmente las aguas de lluvia que atraviesan las capas de residuos aumentan el volumen de lixiviados en una proporción mucho mayor que la que produce la misma humedad de éstos.

Para tal efecto, se deberán construir drenajes pluviales internos y externos en el perímetro del área:

- Los canales pluviales internos serán de área transversal pequeña a mediana.
- La zanja de coronamiento o perimetral será de área transversal mayor a mediana.

El grado de pendiente de los canales internos debe ser diseñado con la finalidad de asegurar el escurrimiento de las aguas superficiales desde el interior del relleno hacia los puntos de evacuación que se hayan proyectado o fuera de la superficie, por lo general deberán tener una pendiente mínima del 2%. Las aguas procedentes de la lluvia deben escurrir sobre la superficie de cubierta final sin que se produzca una erosión excesiva o una filtración.

8.2.12. Construcción de franja de amortiguamiento

La conformación de un cerco vivo de árboles y arbustos como aislamiento visual, protege de los vecinos y transeúntes la vista hacia los trabajos que se realizan, da buena apariencia estética al contorno del terreno, y puede servir para retener papeles y plásticos levantados por el viento. Se recomienda plantar árboles de rápido crecimiento como el pino ciprés, eucalipto, bambú, etc.

En muchos casos también resulta necesario dejar libre una franja de terreno de 5 a 20 metros entre el lindero y la zona de terraplenes o zanjas con residuos, a fin de contar con una zona de amortiguamiento que mitigue los posibles efectos negativos de las operaciones con residuos en los predios vecinos.



Franja de amortiguamiento Relleno Sanitario de K'ara K'ara, Cochacamba, 2024

9. Operación de relleno sanitario mecanizado

El proyecto considerará todos los requerimientos técnicos mínimos, para el establecimiento y operación de un relleno sanitario, sin importar su tipo o tamaño:

- Que exista garantía de estabilidad del terreno y del relleno contra deslizamientos;
- Que existan vías internas de acceso, balastadas o pavimentadas, transitables en cualquier época del año, con rótulo de información;
- Que exista un cerco perimetral, que limite el terreno e impida el ingreso de personas y animales, ajenos al relleno, con portón y entrada restringidos;
- Que haya preparación del terreno, con una base impermeable, con pendiente hacia las líneas de drenaje;
- Que existan canales periféricos para las aguas pluviales;
- Que exista drenaje para los lixiviados y chimeneas, para los gases y los humos;
- Que haya instalaciones para captar y tratar o recircular los lixiviados;
- Que exista una caseta, bodega, servicios sanitarios y otra infraestructura básica;
- Que exista personal suficiente, con capacitación adecuada y supervisión calificada;
- Que exista cobertura diaria de los residuos con materia inerte;
- Que haya cobertura final del relleno, con una capa de material de cobertura de 60 cm de espesor, con una capa adicional de 20 cm de espesor, capaz de sostener vegetación, y con la suficiente inclinación para impedir el ingreso de aguas pluviales al relleno sanitario;
- Que exista un diseño de las diferentes fases de los períodos de explotación del sitio de relleno;
- Que exista un diseño de la configuración final del sitio, con su tratamiento paisajístico.

9.1. Personal

En el relleno sanitario mecanizado todas las operaciones están basadas en el trabajo desarrollado por obreros del municipio o comunidad. El número de trabajadores necesarios depende de la cantidad de residuos sólidos a enterrar, de las condiciones del clima y del método de construcción del relleno entre otros. Es necesario contar además con un responsable o supervisor de aseo que tenga los conocimientos necesarios para dirigir esta obra en constante operación.

El personal es el recurso más importante en la operación del RSMe. Los operarios deben realizar las siguientes tareas:

- Recepción de los residuos sólidos
- Construcción de la celda de residuos sólidos
- Enterramiento y compactación de la celda
- Limpieza y mantenimiento del RSM.

Los siguientes criterios determinan la cantidad y las características del personal necesario para la operación y mantenimiento de un relleno sanitario mecanizado:

- Área del relleno
- Cantidad diaria de residuos descargados
- Cantidad diaria de vehículos
- El tipo de los residuos (domiciliarios clasificados o no clasificados, industriales, hospitalarios, peligrosos o no peligrosos)
- Estándares y leyes vigentes de protección del medio ambiente y de calidad

- Disponibilidad y material de cobertura
- Días laborables en el relleno
- Duración de la jornada diaria
- Condiciones del clima
- Rendimiento de los trabajadores
- Maquinaria, equipos y herramientas con las que se cuenta.

Tabla 20. Personal propuesto para relleno sanitario mecanizado.

Calificación	Tareas del personal	Personal necesario
Jefe o Responsable de relleno	Responsable de la operación, control de niveles	1
Ayudante del jefe de relleno	Control de ingreso y registro de residuos	1
Responsable de la balanza	Responsable del pesaje	1
Operador de tractor compactador (topadora) y/o retroexcavadora	Responsable de la compactación y movimiento de material	1
Chofer de camión volqueta	Responsable del transporte de material	2
Obreros	. Banderilleros . Construcción de chimeneas . Limpieza de canales de drenaje y cunetas . Colocación, compactación y cubierta de residuos . Mantenimiento RS . Mantenimiento PTL	6
Guardia	. Control e inspecciones a todo el predio del RS Responsable del registro, balanza y portería . Prohibir el ingreso a personas no autorizadas . Prohibir el ingreso de animales	2

Fuente: Elaboración propia, 2024

En el caso de rellenos sanitarios mecanizados es muy importante tener el número de obreros suficiente para un buen funcionamiento. Se detalla la actividad y en la formula el personal requerido para dicha actividad, con el rendimiento de los obreros en un relleno sanitario mecanizado se calcula como se muestra a continuación:

Rendimiento de los obreros en el Relleno Sanitario Mecanizado

Colocación de los residuos.

$$\frac{\text{Residuos sólidos (t/día)}}{0,95 \left(\frac{t}{h} - \text{hombre} \right)} \cdot \frac{1}{\text{Horas trabajo por día}} \cdot \frac{7}{\text{Días laborales por semana}} = (\text{Hombres/día})$$

Compactación de los residuos.

$$\frac{\text{Area superficial (m}^2\text{)}}{20\text{m}^2 \text{ (h - hombre)}} \cdot \frac{1}{\text{Horas trabajo por día}} \cdot \frac{7}{\text{Días laborales por semana}} = (\text{Hombres/día})$$

Movimiento de tierra de cobertura.

$$\frac{\text{Tierra (m}^3\text{)}}{0,35 \text{ a } 0,70\text{m}^3 \text{ (h - hombre)}} \cdot \frac{1}{\text{Horas trabajo por día}} \cdot \frac{7}{\text{Días laborales por semana}} = (\text{Hombres/día})$$

Cobertura diaria de los residuos con compactación.

$$\frac{\text{Area superficial (m}^2\text{)}}{20\text{m}^2 \text{ (h - hombre)}} \cdot \frac{1}{\text{Horas trabajo por día}} \cdot \frac{7}{\text{Días laborales por semana}} = (\text{Hombres/día})$$

9.2. Equipamiento y vehículos requeridos

La operación de un relleno sanitario es una actividad muy compleja; aunque la operación fundamental consistirá en recibir y disponer adecuadamente los residuos, existen otras actividades adicionales complementarias, las cuales contribuirán con el adecuado funcionamiento del RSMé.

La operación del relleno sanitario requiere de equipo especializado cuya selección se realiza tomando en cuenta fundamentalmente:

- Cantidad de residuos
- Método de operación
- Condiciones de trabajo para el movimiento adecuado
- Compactación de los residuos sólidos
- Material de cobertura

Las funciones básicas del equipo para un relleno sanitario caen dentro de las siguientes categorías:

- Preparación del sitio, incluyendo desmonte y despálme
- Compactación y manejo de residuos. (si es necesario)
- Excavación, transporte y aplicación de cubierta diaria
- Esparcimiento y compactación de la cubierta final
- Trabajos generales de limpieza

Un RSMé, emplea de forma parcial y permanente de técnicas y equipo mecanizado para el compactado y cobertura (maquinaria pesada), como por ejemplo un bulldózer u oruga de cadenas de 45 hp. Eventualmente, de acuerdo a programación, es apoyado por maquinaria para traslado de material de cobertura.

Para la operación de un relleno sanitario mecanizado, se necesitan fundamentalmente el siguiente equipo:

- a) Topadora
- b) Compactador
- c) Pala cargadora
- d) Cargador de orugas
- e) Excavadora de orugas

- f) Retroexcavadora
- g) Volqueta

A continuación, se detalla en la siguiente tabla con el resumen de los equipos y el uso:

Tabla 21. Equipamiento mínimo requerido para un relleno sanitario mecanizado.

Descripción	Usos
Compactador para residuos	Distribución y compactación de residuos y movimiento de suelo.
Topadora (Tractor sobre orugas)	Cobertura de residuos y preparación de infraestructura.
Motoniveladora de 140 HP	Nivelación y perfilado.
Retroexcavadoras de 150 HP, con balde de 0,75 m ³	Excavaciones, drenajes, colocación de chimeneas para venteo de gases, manejo de barros y semisólidos.
Cargadora frontal sobre neumáticos de 170 HP	Movimiento de suelo, materiales y residuos.
1 Tanque cisterna (capacidad 7.000 m ³)	Riego, transporte de líquido lixiviado.
Camiones volquetas de 8 m ³	Movimiento de suelos, limpieza de obra, playa de verificación de residuos privados.
Bombas sumergibles y accesorios	Manejo de agua de lluvia, lixiviado, desagote de celdas y módulos.

Fuente: Elaboración propia, 2024

Sin embargo, normalmente se usan equipos que permiten hacer las dos funciones, esparcir y compactar, aunque no con un alto grado de compactación. Es el caso de la topadora (buldócer) o tractor común usado como alternativa a un equipo de compactación, por ser más económico, no solo por el precio de compra, sino por el consumo de combustible. Este realiza las mismas funciones que el compactador, solo que el nivel de compactación es mucho más bajo. En realidad, la función propia de la topadora es esparcir los residuos.

El equipamiento básico requerido para la operación de un relleno sanitario semi mecanizado está constituido por: compactador o bulldózer, retroexcavadora y camión volqueta.

a. Topadora (Buldózer) o Tractores de Orugas con Hoja Topadora

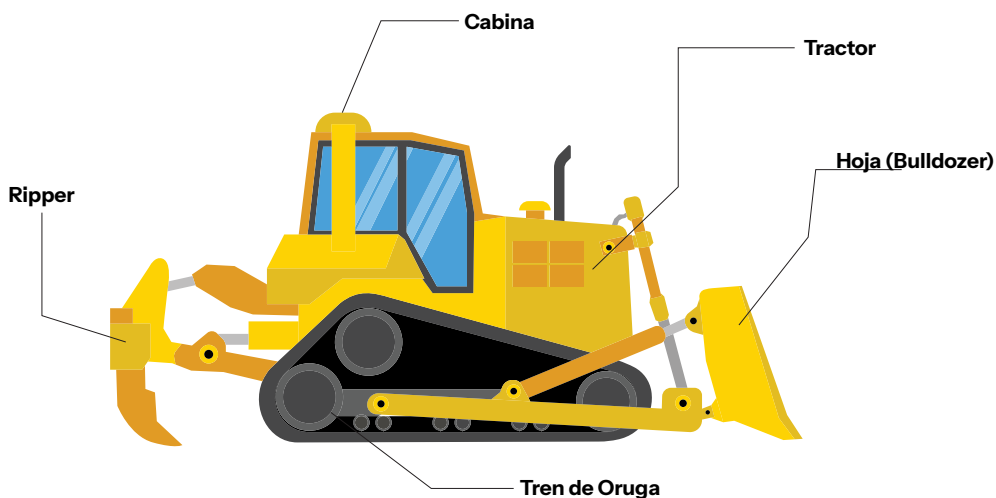
Función: Distribuir y compactar los residuos sólidos, así como realizar la preparación del sitio, suministrar la cubierta diaria y final y trabajos generales de movimiento de tierras.

Características: Las topadoras están equipadas con orugas metálicas de anchos variables especificados, tales como 457 mm, 508 mm, 559 mm y 610 mm. Las orugas deben ser lo suficientemente altas como para permitir una buena reducción de tamaño de los residuos y evitar posibles deslizamientos. La presión descargada sobre los residuos se obtiene distribuyendo el peso de la máquina sobre la superficie de contacto.

El grado de compactación de los residuos depende de la presión ejercida. Las máquinas con orugas no son muy eficientes en la compactación de los residuos sólidos, debido a su baja

presión sobre el suelo. Para obtener una máxima eficiencia de las máquinas con orugas, es muy importante que estén equipadas con hojas topadoras adecuadas.

Figura 44. Bulldózer o Tractor de Orugas con Hoja Topadora



Potencia (HP)	Peso (Kg)	Área de contacto con los residuos (m ²)	Presión (kg/cm ²)
140	11,750	2,16	0,54
200	16,100	2,76	0,53
300	24,770	3,19	0,78

Fuente: Segura, 2011

El rendimiento de un bulldozer o tractor viene dado por la fórmula:

$$R = \frac{Vc \cdot 60 \cdot Fe \cdot Ct}{Tc} \cdot n$$

Dónde:

- Vc = Es la capacidad de la cuchilla en metros cúbicos de material esponjado.
- Fe = Es el factor de eficacia de la máquina, que depende del conductor, estado de la máquina, estado del terreno, por lo que no se puede lograr que trabaje de forma continua. El factor de eficacia varía entre un 70% - 80%.
- Ct = Es el coeficiente de transformación. Los valores medios van a ser establecidos según el material que va a ser transportado por la máquina, para que se cubique según su perfil, sea este esponjado o compactado.
- Tc = Es el tiempo empleado en el ciclo, el cual va a estar en minutos. Es la suma del tiempo fijo y del tiempo variable. Tiempo fijo es el que se emplea en maniobras. El tiempo variable depende de la distancia y de la velocidad de marcha.
- N = Es el coeficiente de gestión, acoplamiento y adaptación. Varía entre 0.8 y 0.9, es un coeficiente de reducción.

Tabla 22. Coeficiente de Gestión.

Tipo de Terreno	Perfil	Material Esponjado	Material Compactado
Tierra	1,00	1,25	0,90
Arcilla	1,00	1,40	0,90
Arena	1,00	1,10	0,95

Fuente: Segura, 2011

b. Compactadores con ruedas metálicas

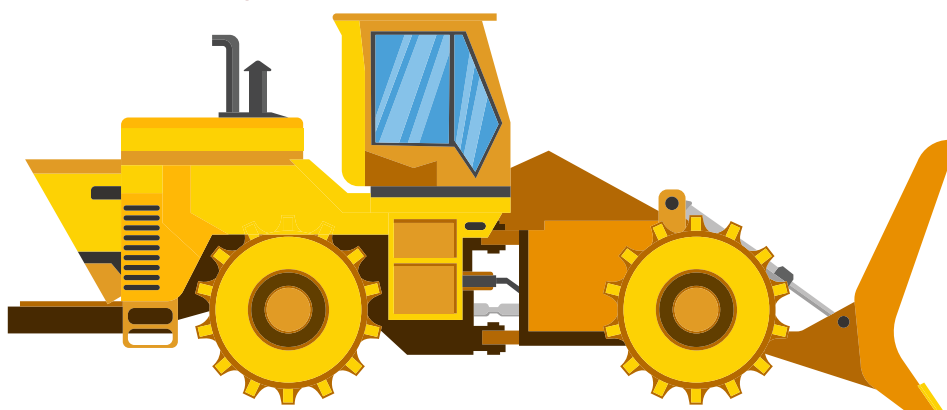
Función: Extendido y compactación de residuos sólidos.

Características: Las ruedas metálicas tienen generalmente dientes en forma de “V” invertida y alternados que le permiten concentrar el peso sobre una superficie de contacto más pequeña (comparada con una máquina de orugas) y ejerciendo una mayor presión sobre los residuos sólidos.

Los compactadores son tractores con orugas como los que se utilizan en la construcción civil, adaptados a las condiciones del relleno sanitario. Existen también compactadores con ruedas especiales que se construyen especialmente para la compactación de los residuos. Esos compactadores tienen la ventaja de trabajar muy eficientemente en la colocación y compactación de los residuos, tienen la desventaja que no se pueden utilizar flexiblemente para otros trabajos necesarios en el relleno, ya que las ruedas especiales no son adecuadas para trabajos en suelos normales.

Los compactadores son más versátiles y rápidos que las topadoras. Los compactadores con ruedas de acero están equipados con hojas controladas por un sistema hidráulico. La hoja tiene una rejilla metálica adicional para aumentar su capacidad.

Figura 45. Compactador con ruedas metálicas



Tipo	Potencia (HP)	Peso (Kg)	Compactación (kg/m³)
836	481	53,682	800 - 1200
836 G	315	34,839	600 - 950
816 F	220	22,732	534 - 712

Fuente: Caterpillar, 2001

El equipo compactador es el más importante de todos los equipos que se necesitan en un relleno sanitario. Es el equipo ideal para compactar, siempre que sea posible su compra, este permite:

1. Mover y esparcir los residuos descargados por los camiones recolectores, compactarlos y cubrirlos.
2. Si el material de cobertura se encuentra en el sitio del relleno mismo (caso ideal), el tractor compactador puede también excavar y traer el material de cobertura.
3. Hacer trabajos de preparación del suelo (remoción de capa vegetal, excavación, colocación de la capa mineral, etc.) para abrir un nuevo módulo del relleno, apertura de caminos internos, etc.

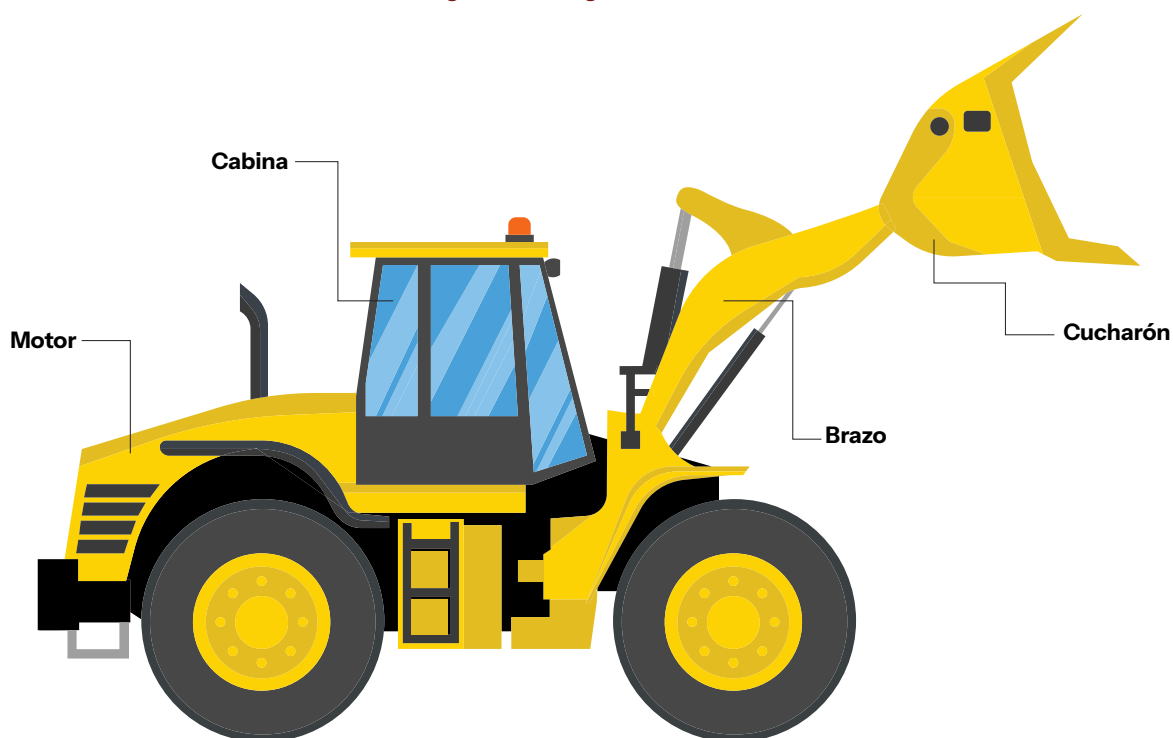
c. Cargador neumático

Función: Para excavar suelo suave (por ejemplo, suelos que presentan poca resistencia), cargar el material excavado a los camiones y pick-ups o para transportar ese material a distancias no mayores a 50 ó 60 m, para una eficiencia óptima.

Características: Los cargadores de neumáticos generalmente están equipados con máquinas diésel y dirección en las cuatro ruedas. El eje frontal es fijo y el trasero puede oscilar. Los modelos varían en potencia, en un intervalo entre los 65 HP y los 375 HP. La capacidad del cucharón varía de 0.8 m³ a 6 m³. Los modelos más comúnmente utilizados son de alrededor de 100 HP a 150 HP

Sobre suelo suave, una máquina de 130 HP con una capacidad de cucharón para 1.91 m³ será capaz de excavar y cargar un camión de volteo a una velocidad de alrededor de 160 m³ /hora de trabajo. En suelo duro, la producción disminuye y esta máquina probablemente necesitará ser reemplazada por una más adecuada para realizar la excavación.

Figura 46. Cargador neumático



Potencia (HP)	Peso (Kg)	Capacidad de cucharón (m ³)
100	9,280	1,34 - 1,72
130	11,550	1,72 - 2,68

Fuente: Caterpillar, 2001

Los cargadores de neumáticos también son aptos para realizar eficientemente trabajos relacionados con las operaciones del relleno sanitario.

d. Cargadores de Orugas

Función: Estas máquinas pueden desarrollar funciones similares a las de los cargadores de neumáticos. Los cargadores de orugas también son recomendables para excavar suelo macizo o duro. Su distancia óptima para transporte de materiales no debe exceder de los 30 m. En casos de emergencia, los cargadores de orugas pueden utilizarse para el manejo de residuos sólidos (extendido y compactación). También pueden ser utilizados para conformar y nivelar la cubierta de las celdas.

Características: El cucharón de este tipo de cargadores, se opera fácil y rápidamente mediante un mecanismo hidráulico. Se obtiene una mejor eficiencia y flexibilidad en este equipo, cuando cuenta con un cucharón multiusos. Este tipo de cucharón se adapta a diferentes operaciones conforme a la posición en la que se opera.

Figura 47. Cargador de ruedas



Potencia (HP)	Peso (Kg)	Área de contacto con los residuos (m ²)	Capacidad de cucharón (m ³)
95	12,340	1.54	1,34
130	13,700	1.79	1,34 - 1,74
190	21,300	2.48	1,90 - 2,48

Fuente: Caterpillar, 2001

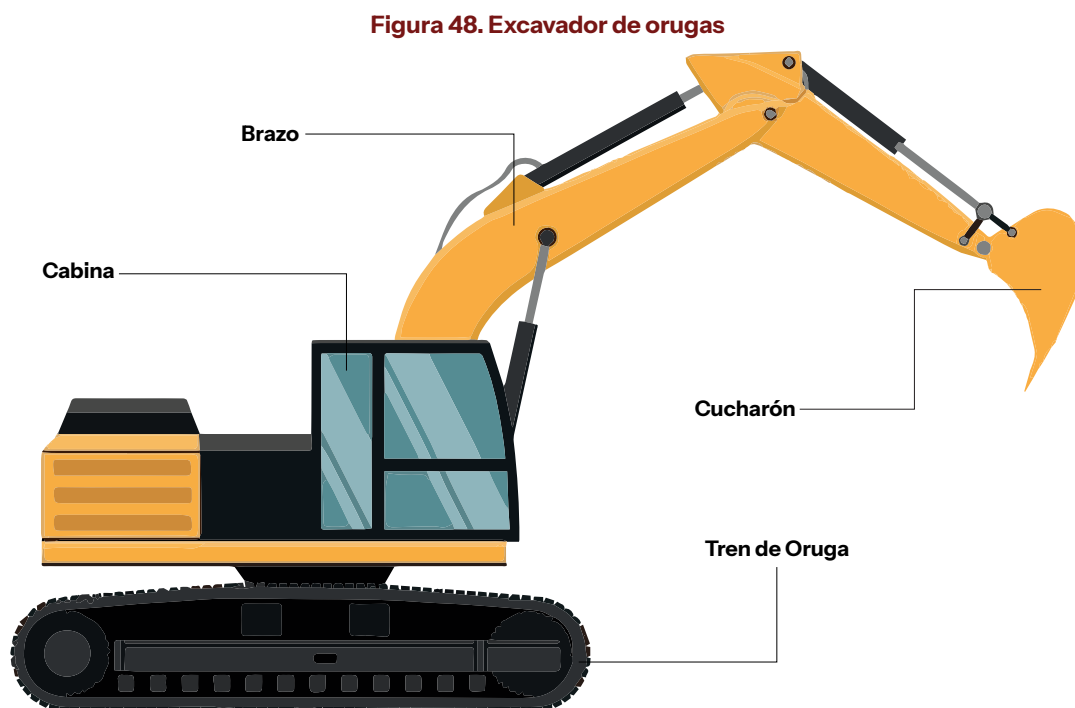
El cucharón tiene una sección estacionaria y otra móvil. El movimiento puede ser controlado por el operador con el mismo sistema de control. El cucharón puede actuar como; cargador, empujador, excavadora o dragadora. La versatilidad de este tipo de equipos se requiere en el relleno sanitario especialmente cuando la disponibilidad de equipo es limitada.

e. Excavadoras de orugas

Función: Para excavar el suelo y cargar vehículos de transporte, así como para aplicar la cobertura diaria o primaria de los residuos sólidos (en el método de trinchera). Este equipo también puede ser utilizado bajo ciertas premisas en el movimiento de tierras.

Características: La excavadora está equipada con una máquina diésel y un sistema hidráulico para el control de los brazos de carga y del cucharón. El tiempo del ciclo de excavación depende del tamaño del equipo y de las condiciones del sitio.

Así, cuando la excavación es más difícil o la trinchera más profunda, el procedimiento de excavación será lento. La literatura comercial disponible en el mercado de los diferentes fabricantes indica el cálculo o la estimación del tiempo para el ciclo, de acuerdo con el modelo de equipo y las condiciones particulares de cada sitio (tipo de suelo y profundidad de excavación). La profundidad de excavación (medida desde el nivel del suelo) depende del alcance de los brazos de carga.



Fuente: Caterpillar, 2001

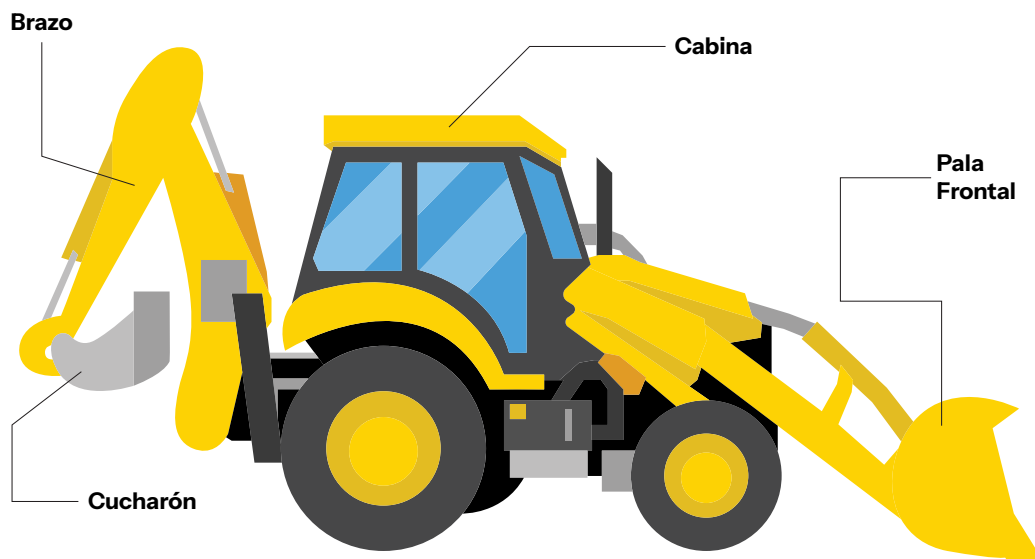
f. Retroexcavadora

Su función principal es excavar el material de cobertura. Se utiliza para la fabricación del muro de contención de una celda para depósito de residuos. La Retroexcavadora es en realidad tres piezas de equipo en una, y la diversidad de la herramienta permite en la obra diferentes tareas que deben completarse con relativa facilidad.

El tractor es la principal parte de la retroexcavadora y permite a los usuarios trasladarse con facilidad sobre diferentes tipos de terrenos. La retroexcavadora (cucharón) y el cargador se adjuntan al tractor y agregan elementos en términos de utilidad.

El cargador se puede utilizar para limpiar material de obra y para el movimiento de tierra de un lugar a otro.

Figura 49. Retroexcavadora



Potencia (HP)	Peso (Kg)	Longitud del brazo de carga (m)	Capacidad de cucharón (m ³)	Profundidad máxima de excavación (m)
135	22,680	2.44	0.75	6.4
195	34,020	2.90	1.18	7.3
325	56,200	3.20	1.94	8.5

Fuente: Segura, 2011

El rendimiento de las excavadoras y retro excavadoras viene dado al igual que el rendimiento de la pala del cargador frontal, por la fórmula:

$$R = \frac{Vc \cdot 3660 \cdot Fe \cdot Fe' \cdot Ct}{Tc}$$

Dónde:

Vc = Es la capacidad de la cuchilla en metros cúbicos de material esponjado.

Fe' = Tipo de terreno (valor de tabla 23)

Ct = Es el coeficiente de transformación.

Tabla 23. Tipo de Terreno.

Tipo de Terreno	Fe
Suelto	0,9 - 1,0
Medio	0,8 - 0,9
Duro	0,5 - 0,8

Fuente: Segura, 2011

Para Ct los valores medios se dan según el material que va a ser transportado por la máquina (tabla siguiente), para que se cubique según su perfil, sea este esponjado o compactado.

Tabla 24. Coeficiente de Transformación.

Tipo de Terreno	Perfil	Material Esponjado	Material Compactado
Tierra	1,00	1,25	0,90
Arcilla	1,00	1,40	0,90
Arena	1,00	1,10	0,95

Fuente: Segura, 2011

Tc, es el tiempo de duración del ciclo en segundos, comprende en la excavación y el giro hasta la descarga, la descarga y el giro hasta origen. El tiempo del ciclo, con rotación de 90° teóricamente dependiendo del tipo del terreno, es aproximadamente:

Tabla 25. Tiempo de Duración del Ciclo en Segundos por Tipo de Terreno.

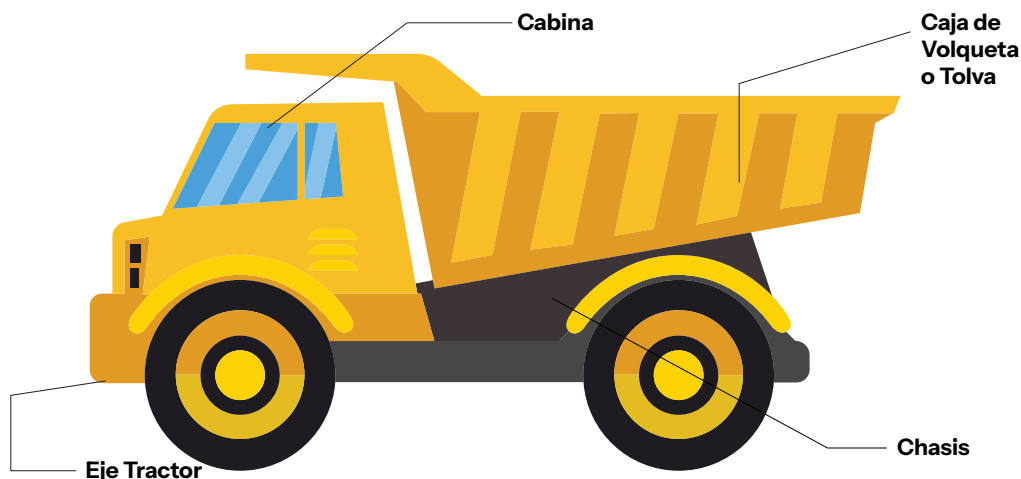
Tipo de Terreno	Tc
Suelto	15 - 20
Medio	20 - 25
Duro	25 - 30

Fuente: Segura, 2011

g. Camión volqueta

Su función es transportar el material de cobertura y llevar materiales de un lado a otro del relleno.

Figura 50. Camión Volqueta.



Fuente: Segura, 2011

El rendimiento del camión volqueta, está dado por la fórmula:

$$R = \frac{Vc \cdot 60 \cdot Fe}{Tc}$$

Dónde:

- Vc = Es la capacidad de la caja (tolva) en metros cúbicos.
- Fe = Es el factor de eficacia de la máquina, que depende de la experiencia del conductor, estado de la máquina, tipo de suelo, estado del terreno, por lo que no se puede

lograr que trabaje de forma continua. El factor de eficacia varía entre un 70% - 80% .

Tc = Es el tiempo empleado en el ciclo, el cual va a estar en minutos. Es la suma del tiempo fijo (carga, descarga y maniobra) y del tiempo variable (marcha).

Cálculo del número de volquetas que requiere un cargador frontal, está dado por la fórmula:

$$N = \frac{Y \cdot (T + D + L)}{60 \cdot C \cdot E}$$

Dónde:

- D = Tiempo de descarga en minutos.
- Y = Coeficiente del material de carga (Para Arcillas Y = 35).
- C = Capacidad de Carga del Volquete.
- N = Número de Volquetes.
- L = Tiempo de Carga en minutos .
- T = Tiempo de viaje en minutos.
- E = Eficiencia, aproximadamente.

9.2.1. Estimación de requerimientos de maquinaria para la construcción de las celdas en un relleno sanitario mecanizado

A continuación, se entrega un procedimiento para calcular el tamaño (potencia) y cantidad de maquinaria (tractores de orugas) requerida para compactar y cubrir la celda en un relleno y que permite considerar como variables de cálculo la cantidad de residuos y de tierra a manejar diariamente, (cifras obtenidas del diseño de la celda tipo), y considerar en forma separada la duración de la jornada de trabajo:

$$N = \frac{1}{J} \left(\frac{R}{R_r} + \frac{T}{R_t} \right)$$

Dónde:

- N = Cantidad de maquinaria necesaria para compactar y cubrir las celdas.
- J = Duración de la jornada diaria de trabajo (en horas).
- R = Volumen de residuos a compactar diariamente en el relleno (en m³).
- T = Volumen de tierra necesaria para cubrir los residuos compactados (en m³).
- R_r = Rendimiento de la maquinaria en el manejo de los residuos (en m³/h) .
- R_t = Rendimiento de la maquinaria en el manejo de tierra (en m³/h) para cobertura.

Potencia del tractor de orugas (Horse Power)	Rendimiento (m ³ /h) Residuos	Rendimiento (m ³ /h) Tierra
75 HP	37	22
140 HP	40	34
200 HP	52	43
300 HP	61	61

El procedimiento de cálculo anterior permite determinar la combinación más conveniente de tractores de orugas para operar eficientemente un relleno sanitario. En todo caso un aspecto básico a considerar al seleccionar la maquinaria necesaria para operar un relleno sanitario dice relación con la disponibilidad local del equipo, la existencia de repuestos, el acceso a servicios de mantenimiento, la factibilidad de remplazo oportuno en caso de falla grave de la maquinaria y la disponibilidad de maquinaria adicional en caso de ser necesario ampliar la faena.

El resultado del cálculo siempre deberá aproximarse por exceso, pues al término de la jornada diaria todos los residuos deben quedar cubiertos.

9.3. Herramientas

Para la operación del relleno sanitario mecanizado, el equipo necesario se reduce al empleo de herramientas o utensilios de albañilería, tales como: carretillas de llanta neumática, palas, picas, azadones, barras, pisones de madera, así como de horquillas o rastrillos y un rodillo compactador.

La cantidad de estas herramientas está en función del número de trabajadores, y éstos a su vez dependen de la cantidad de residuos sólidos a enterrar en el relleno.

Las herramientas más utilizadas son: palas, picos, azadones, rastrillos, horquillas, pisón de madera o de metal, rodillos compactadores y coches con llantas neumáticas.

Tabla 26. Uso de las herramientas en el relleno sanitario.

Nombre	Uso	Herramienta
Pala	<ul style="list-style-type: none"> - Cargar, descargar y colocar residuos sueltos - Cargar, descargar y colocar material de cobertura - Excavar - Mantenimiento y construcción de cunetas 	
Azadón	<ul style="list-style-type: none"> - Aflojar el terreno - Trabajos de arborización - Mantenimiento de cunetas y canales de drenaje 	
Barra	<ul style="list-style-type: none"> - Aflojar el terreno para excavaciones - Trabajos de arborización - Mantenimiento y construcción de cunetas y canales de drenaje 	
Pico	<ul style="list-style-type: none"> - Extraer el material de cobertura - Dar mantenimiento a los canales perimetrales e internos y para la construcción de filtros de lixiviados entre otros. - Trabajos de arborización - Mantenimiento y construcción de cunetas y canales de drenaje - Mullir el terreno para excavaciones 	

Machete	<ul style="list-style-type: none"> - Cortar palos para la construcción de chimeneas u otros trabajos de mantenimiento - Afiliar palos y estacas - Cortar árboles pequeños para la preparación del terreno 	
Martillo	<ul style="list-style-type: none"> - Construcción y mantenimiento de chimeneas - Mantenimiento de herramientas 	
Sierra	<ul style="list-style-type: none"> - Cortar palos y otra madera 	
Rastrillo	<ul style="list-style-type: none"> - Colocación homogénea del material de cobertura; homogeneización de los residuos colocados - Distribución uniforme de los residuos y conformación de la celda debidamente dimensionada - Limpieza en las áreas adyacentes del relleno sanitario 	
Carretilla	<ul style="list-style-type: none"> - Transporte interno de residuos y del material de cobertura 	

Fuente: Elaboración Propia en base a Jaramillo, 2002

9.4. Métodos de operación del relleno sanitario mecanizado

Definido el sitio para el emplazamiento del relleno sanitario y con los estudios preliminares del sitio seleccionado el paso subsiguiente es definir el método de operación a emplear, la selección del método a utilizar para la operación del relleno sanitario se deberá realizar con base en las condiciones topográficas, geotécnicas y geohidrológicas del terreno elegido, seleccionándolo de entre los siguientes: trinchera, área o combinado de los dos métodos. Para definir técnicamente el método a emplear se debe establecerse el nivel estratigráfico del suelo, el nivel de acuíferos freáticos permanentes y transitorios y la disponibilidad de material de cobertura.

Los resultados de estos estudios definirán el método a emplear Trinchera o Área, de esta forma presentamos criterios técnicos a utilizar:

a. Si el primer acuífero transitorio o permanente se encuentra a más de 6 metros de profundidad, respecto al nivel natural del terreno y se encuentra protegido de una capa de arcilla de por lo menos 2 metros de espesor con un coeficiente de impermeabilidad igual o menor a $K < 10^{-6}$ cm/seg, en este es recomendable el método de trinchera.

b. Si el primer acuífero transitorio o permanente se encuentra a menos de 1 metro de profundidad, respecto al nivel natural del terreno, el método de trinchera resulta impracticable, por lo que se deberá trabajar con el método de área y requerir un tratamiento mayor de capa base, recomendase 60 cm de arcilla compactada y el empleo de polietileno de 250 micrones.

c. Para casos intermedios pueden aplicarse cualquiera de los dos métodos, pero se deberá considerar cumplir las siguientes premisas:

a. Impermeabilidad de la capa base del relleno sanitario.

b. Una profundidad mínima del acuífero de 2 metros respecto a la capa base impermeable del relleno sanitario.

d. Si el estudio estratigráfico del suelo identifica roca o presencia de roca fragmentada no es recomendable el método de trinchera, por los elevados costos de excavación y la alta permeabilidad que puede tener el sitio para llegar a contaminar acuíferos subterráneos, en esta situación se utilizara el método de Área.

Un aspecto importante para considerar para la selección del método a emplear es definir la disponibilidad de material de cobertura en el sitio de emplazamiento del relleno sanitario, considerando el costo de acarreo de material de cobertura se puede tomar la mejor decisión para el método.

Tabla 27. Cuadro de selección de método de trabajo.

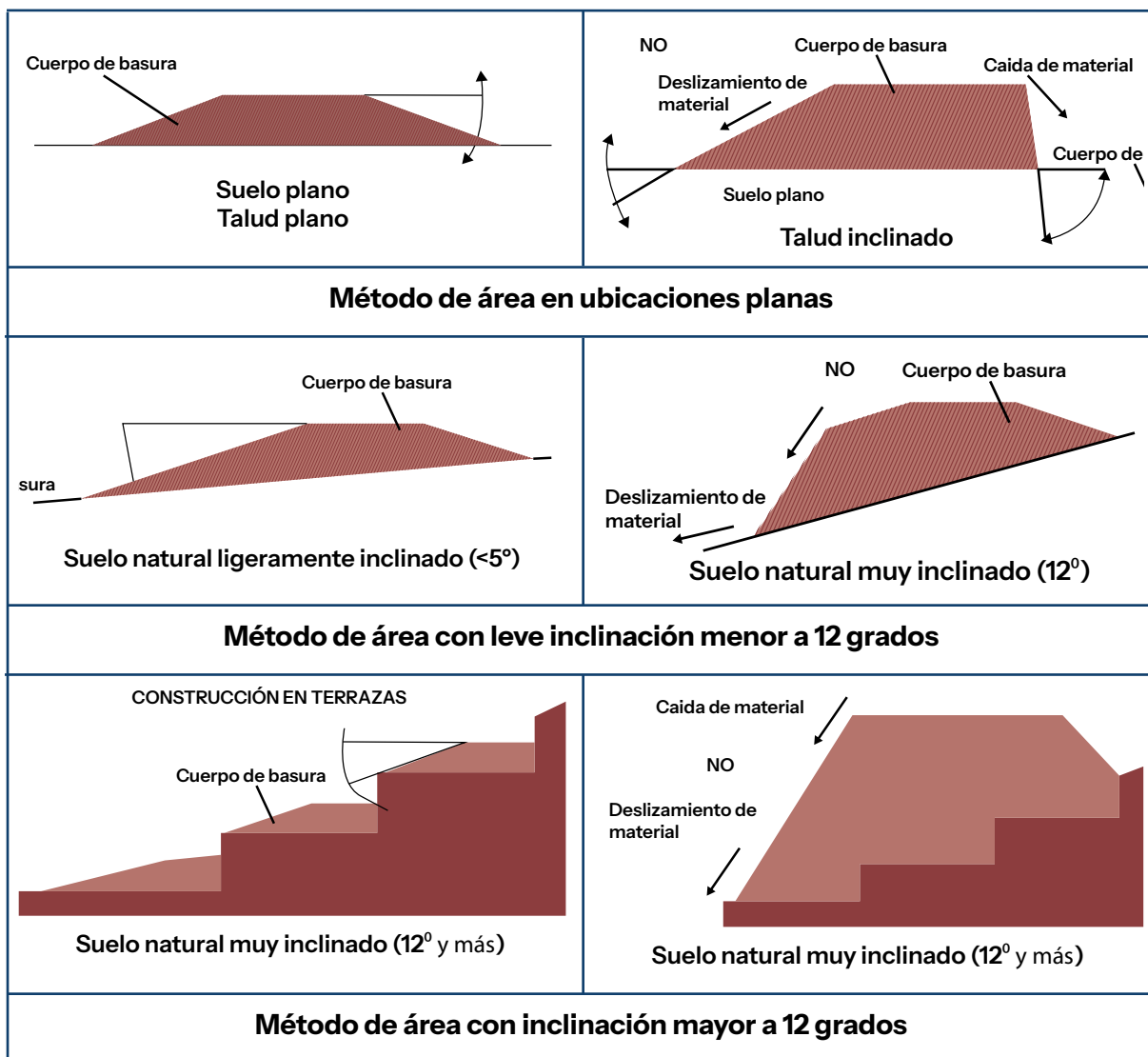
Prioridad	Características del sitio	Premisas de Selección	Métodos Recomendados
1	Condiciones Topográficas	Áreas planas o llanuras	Método de Área o Trinchera
		Área con pendientes hasta 12°	Método de Área o Trinchera
		Área con pendientes mayores a los 12°	Método de Trinchera
		Depresiones naturales o artificiales	Método de Área
2	Profundidad de papa freática	Profundidad > 6 metros	Método de Trinchera
		Profundidad < 6 metros	Método de Área
3	Permeabilidad de los suelos	$k < a 10^{-6}$ cm/seg	Método de Trinchera
		$k > a 10^{-6}$ cm/seg	Método de Área
4	Disponibilidad de Banco de préstamo para cobertura	Existe disponibilidad de material	Método de Área
		Existe material de cobertura en sitios cercanos	Método de Área
		No existe material de cobertura	Método de Trinchera

Fuente: RöbenDED, 2002

Se seleccionará el método más adecuado para la mayoría de las características que coincidan en el método recomendado. Los peligros de la construcción de un cuerpo de basura con talud demasiado inclinado y de la construcción del relleno sanitario sobre un terreno muy inclinado; Si se construye un relleno sanitario en un terreno inclinado, se recomienda no elegir terrenos con una inclinación mayor de 12°, lo que equivale a una pendiente > 1:4.5, el terreno debe ser conformado en terrazas, la figura 44 lo muestra.

Una vez seleccionado el método de trabajo se debe considerar las siguientes recomendaciones para mantener taludes en el relleno sanitario.

Figura 51. Casos de inestabilidad del suelo y del cuerpo de basura.



Fuente: RöbenDED, 2002

Es importante conocer los métodos de operación del relleno sanitario mecanizado, si bien estos fueron definidos en el diseño de acuerdo a la conformación del terreno, los principales métodos usados para disponer los residuos sólidos en un relleno sanitario pueden clasificarse como: a) Trinchera, b) Área, y c) Combinado.

Para los rellenos mecanizados son válidas las mismas limitaciones que para los rellenos compactados con maquinaria; es decir la excavación de zanjas en un terreno plano posee el mismo problema para evacuación de lixiviados como en el relleno en una fosa. No es muy factible construir las celdas de un relleno sobre un terreno plano, puesto que los obreros deberían levantar los residuos hacia el nivel actual de la celda, lo que significaría mucho más esfuerzo físico que el relleno de una celda excavada. Para los rellenos mecanizados es ideal la construcción de celdas en terrazas, al fin de evacuar los lixiviados con pendiente natural, eliminando de esta forma el bombeo.

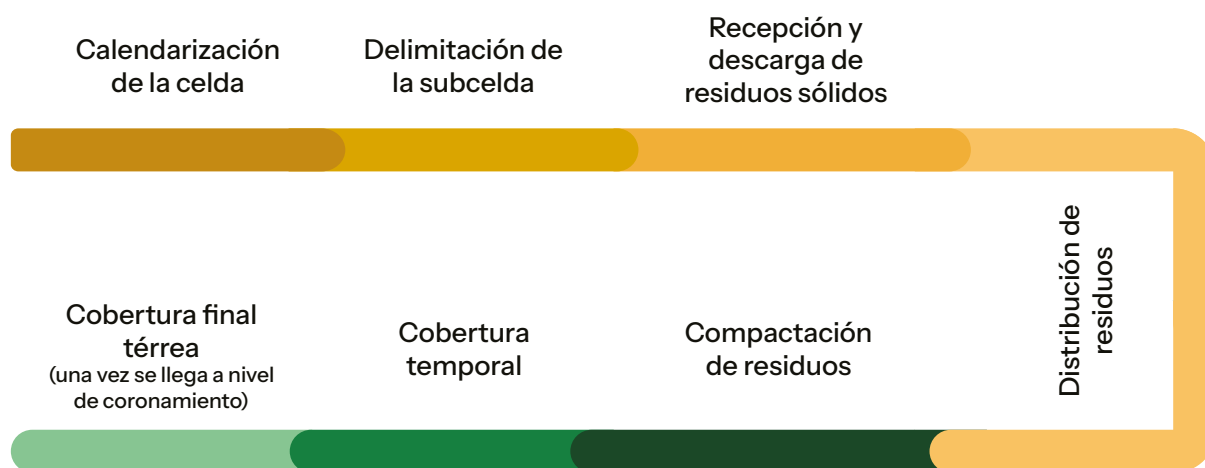
Dependiendo del tipo de método, siendo este dado por la forma del terreno; la operación del relleno sanitario mecanizado se esquematiza de la siguiente manera:

9.4.1. Construcción de la celda diaria de operación mecanizada

La celda de trabajo **diaria** deberá ser preparada de acuerdo con los planos de diseño y para el año de horizonte respectivo pues se irá incrementado en tamaño.

Sin embargo, el criterio más importante será la práctica del operador y sus ayudantes, quienes definirán un frente de trabajo de la anchura establecida y de longitud variable. El operador es responsable de que al final de la jornada definida para la operación, todos los residuos sólidos se encuentren cubiertos. Es importante que se respeten los taludes señalados en los planos de diseño de 3:1 con un largo de **acuerdo con cálculo se recomienda mayor a 5 metros**, pues esta acción garantizará la estabilidad del relleno sanitario.

Figura 52. Los 8 pasos en la operación de celdas de un relleno sanitario mecanizado.



Fuente: Helvetas, 2020

9.4.2. Calendarización de la celda

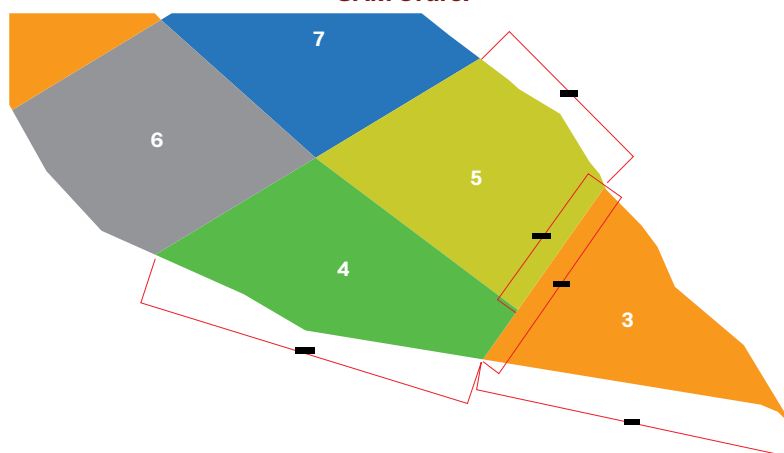
La calendarización es el cronograma de llenado del área dentro del sitio destinada a disponer residuos, es decir que establece el lugar físico por donde se comienza a depositar los residuos y como se continúa.

En general, el área destinada a recibir residuos se divide en subceldas o celdas pequeñas. De acuerdo a la vida útil y al tamaño del relleno, las subceldas pueden ser desde decenas a centenas de acuerdo a las dimensiones y espacio disponible de la macrocelda.

El desarrollo del relleno en etapas permite diferir el desembolso de la inversión en varios años, tiene como contrapartida que en un mismo momento puedan coexistir en el sitio fases en construcción, otras en operación y otras en etapa de abandono.

La siguiente figura muestra un ejemplo del desarrollo de un relleno sanitario en varias fases.

Figura 53. Ejemplo de Desarrollo de un Relleno Sanitario en Varias Fases, Estudio de Preinversión del GAM Oruro.



Fuente: Helvetas, 2024

Cada fase del relleno se divide en subfases o celdas de operación, cada celda de operación se diseña tomando como criterio un periodo de uno a varios meses. Esta división permite gestionar en forma diferenciada el agua pluvial que escurre por las celdas con residuos de la que escurre por zonas “limpias”.

Crecimiento de celdas diarias

Horizontal: Para la operación y crecimiento de celdas usualmente se lo realiza de manera horizontal es decir se van llenando las celdas diarias de acuerdo al área cubierta se continua con la que está más próxima, en un proceso sucesivo hasta llegar a llenar toda la base de la macrocelda, aunque este método es muy bueno también presenta algunos inconvenientes debido a ocupar más rápido las áreas destinadas al proyecto si las mismas no cuentan con un buen sistema de drenaje podría ocasionar la acumulación o estancamiento de agua de lluvia y lixiviados.

Mixto: Para la operación y crecimiento de celdas también es posible aplicar la metodología de crecimiento mixto horizontal y vertical siempre y cuando las condiciones en cuanto a equipo y dimensiones de las celdas diarias con sus componentes así lo permitan, esta metodología plantea la conformación de celdas diarias de manera horizontal similar al anterior método, pero agrupando una cantidad previamente calculada de las mismas, sin embargo también plantea un desafío en el diseño previo de saber identificar la cantidad de celdas a agruparse, una vez se llega a conformar esa cantidad de celdas diarias se procede a conformar el segundo nivel y así sucesivamente hasta llegar el nivel de coronamiento como recomendación debe dejarse un mínimo de área para maniobras del equipo de compactación, en la parte del nivel superior mínimamente 100 m² o según el área mínima requerida del equipo de compactación, el éxito de esta metodología consiste en encontrar con la cantidad de celdas diarias agrupadas, el talud de conformación de la agrupación de celdas y el área proyectada final en el nivel superior de coronamiento el área suficiente para poder maniobrar y realizar el cierre intermedio o definitivo (según sea el caso), esta metodología permite operar en una menor área de trabajo temporal posible ya que se ira llenando en forma vertical, el peso de los residuos más la operación con el equipo de compactación permiten una mejor compactación ya que en un menor tiempo y mayor altura permitirán que la presión ejercida entre ambos ayude en la altura final debido a la reducción de volumen.

9.4.3. Delimitación de la celda

Al inicio de uso de cada subcelda se debe realizar un replanteo y delimitación en campo, de

acuerdo con la calendarización, de esta forma se identifica el área de trabajo por el periodo de tiempo previsto; se recomienda una vida útil de al menos dos meses por subcelda.

9.4.4. Recepción y descarga de residuos sólidos

La recepción consiste en registrar el número de vehículos y el volumen de residuos transportados al momento de ingresar al relleno sanitario. Una vez concluido el registro se realiza la descarga dentro de la subcelda delimitada. Esta actividad debe ser controlada en todo momento por el operador del relleno sanitario para garantizar que los residuos solamente se dispongan en la subcelda.

Figura 54. Descarga de Residuos Sólidos.



Fuente: Complejo de Tratamiento de Residuos, San Miguel de los Junos, Santa Cruz

9.4.5. Distribución de residuos

La distribución de residuos sólidos se refiere a la dispersión del material de modo que tenga una altura uniforme o pareja en la subcelda, respetando el ancho y largo de la misma para tener una mejor compactación. Asimismo, se debe considerar la forma y el talud con la inclinación adecuada de 1:2 (mínimo) al momento de subir niveles, esta metodología permite aprovechar al máximo el volumen de cada subcelda y reducir el área de residuos disgregados dentro de la celda de residuos.

Figura 55. Distribución y conformación de residuos en celda.



Fuente: Gobierno Autónomo Municipal de La Paz, 2025

Es importante recalcar que la operación del relleno sanitario más eficiente por este método se logra cuando la longitud del frente de trabajo sea la mínima posible para garantizar la operación normal, ya que implica mayores rendimientos para el manejo de los residuos sólidos y del material de cobertura.

9.4.6. Compactación de residuos

Una vez verificado el emparejamiento de los residuos se realiza la reducción del volumen mediante una compactadora mecánica.

Figura 56. Compactación de Residuos.



Fuente: Relleno Sanitario Mecanizado de Saka Churu de La Paz

Esta es una tarea esencial al momento de operar un sitio de disposición final de residuos, ya que una correcta compactación permite eliminar vacíos y ampliar la vida útil de las celdas de descarga de residuos. La altura de compactación está definida en función a las características de compactación del equipo empleado.

De acuerdo con la operación en cada sitio se realizan tres a cuatro pasadas, en función a la presencia de hundimiento de la masa de residuos pueden aplicarse más pasadas para mayor densificación. Un aspecto clave a considerar es el cuidado del crecimiento y la forma que adopta la masa de residuos. Se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

Figura 57 Recomendaciones en un crecimiento vertical de celdas.

<p>Peinado de Taludes: Consiste en el colocado de la capa de sellado y perfilado en los taludes.</p>	<p>Altura: Forma y altura del cuerpo de las banquetas conformadas, para evitar asentamientos o corregirlos oportunamente.</p>	<p>Inclinación: Se optimiza la inclinación del talud permanentemente para evitar la desestabilización del talud, manejando como máximo 10%.</p>
---	--	--

Fuente: Elaboración Propia, 2024

Se pueden construir capas horizontales o capas inclinadas que se apoyen en un talud natural o en las capas construidas anteriormente. Si se hace la colocación de la basura con capas inclinadas, estas no deben ser más inclinadas que 3:1.

El material de cobertura se puede conseguir del sitio mismo del relleno. Si se hace el relleno en forma de trinchera, el material excavado sirve como cobertura diaria y también se puede utilizar como cobertura final. En caso de que se construya el relleno sanitario en el área, hay diferentes posibilidades de suministrar el material de cobertura:

- Si se aprovechan los residuos biodegradables produciendo humus, la fracción gruesa del compost se puede utilizar para cubrir los residuos.
- Si el relleno se construye en un terreno inclinado, se puede nivelar el talud y utilizar la tierra sobrante
- Se puede acoger en el relleno sanitario la tierra sobrante de excavaciones dentro de la ciudad, anunciando que se recibe la tierra en el relleno.

9.4.7. Cobertura diaria

Uno de los aspectos que influyen directamente en la vida útil de los rellenos sanitarios es la cantidad de material de cobertura colocado en su operación, así mismo, la cobertura diaria minimiza los impactos por olores y atracción de vectores.

La cobertura diaria se la debe realizar con material terreo, esta actividad comenzará con la extracción del material de cobertura necesario para el recubrimiento diario de la celda; esta extracción se hará contiguo a la plataforma en el sitio del relleno y/o en el talud de esta, esto con el objeto de aumentar la vida útil del relleno. Una vez extraído el material de cobertura se procede a preparar el área de la celda marcándola o definiéndola en forma clara.

Vale la pena anotar que el material de cobertura para la operación del relleno sanitario podrá provenir del material almacenado de la excavación (en el caso de trinchera). La cobertura intermedia o diaria será de 0,20 m.

Figura 58. Cobertura Diaria de Celda.



Fuente: Relleno Sanitario Mecanizado "El Ingenio", El Alto

9.4.8. Cobertura final terrea

Se recomienda un espesor de capa de 20 centímetros conformada de residuos y espesor compactada de 10 cm, la cual deberá ser colocada cada semana y se deberá controlar que no se erosione. La superficie que envuelve la celda terminada y que estará expuesta al ambiente por un período de más de una semana, hasta que se coloque una nueva celda sobre ésta, sufrirá los efectos de las condiciones climatológicas y posiblemente el frecuente paso de vehículos. Normalmente estas superficies son cubiertas adicionalmente, con una capa de 0,20 m de espesor de tierra compactada.

A esta capa se le conoce como cubierta final terrea intermedia y tiene la función de proteger a la cubierta diaria y prevenir la intrusión de agua al relleno por un período más largo.

Figura 59. Cobertura Final Terrea



Fuente: Relleno Sanitario Mecanizado de Kara Kara, Cochabamba

9.4.9. Cobertura final con carpeta vegetal

Esta deberá tener un espesor de 40 cm, compactada en capas de 20 cm, del mismo tipo de tierra utilizada para las demás coberturas y 20 cm, adicionales de humus (tierra negra), con el fin de que se facilite el crecimiento de vegetación. Está cubierta es necesaria para permitir el tráfico ligero y minimizar los efectos que ocasionan los asentamientos diferenciales, tal como el afloramiento de residuos por el efecto de fracturas y agrietamientos. Esta cubierta, también ayudará a evitar que la lluvia fluya hacia el interior de los residuos confinados:

Figura 60. Cobertura Final con Carpeta Vegetal



Fuente: Macrocelda 1, Relleno Sanitario Mecanizado de Villa Ingenio, El Alto

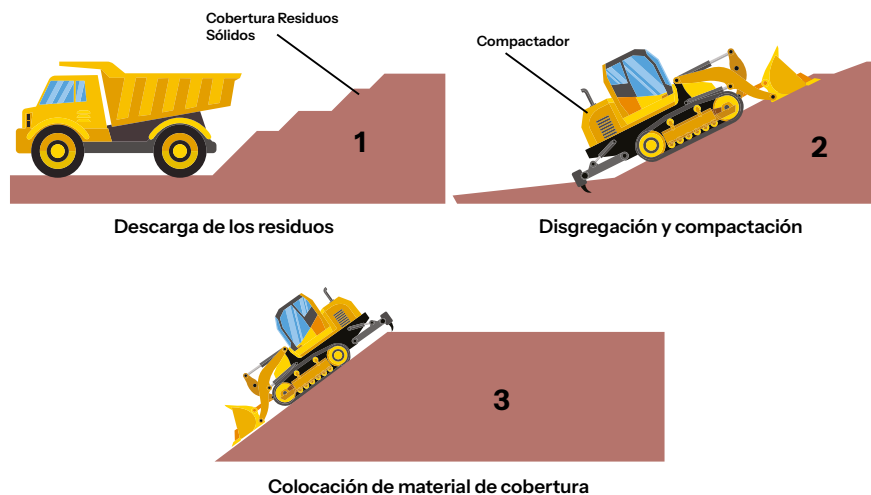
Figura 61. Beneficios de la cubierta intermedia de residuos.



Fuente: Elaboración Propia en base a Jaramillo, 2002

Nota. - En el caso de trabajar en método combinado al momento de rellenar la trinchera o fosa se realiza un cierre parcial se sigue el mismo procedimiento descrito en el subtítulo “Cobertura final”, sin embargo, se prescinde o no se considera la capa de material vegetal misma que será considerada en el cierre del método área que estará por encima del nivel de coronamiento de la celda

Figura 62. Manejo y cobertura de las celdas



Fuente: Ambiente, 2002

9.5. Manejo de lixiviados

Durante la etapa de operación del relleno sanitario mecanizado se deben realizar controles de fisuras en los canales o drenes de captación y conducción de los lixiviados, de forma de verificar su limpieza y libre circulación de los lixiviados para su almacenamiento en piscinas o geotanques y posterior tratamiento.

Asimismo, se debe verificar que se construyan adecuadamente los drenes internos para lixiviados en las nuevas celdas y que no se dañen o se coloquen obstrucciones en la celda en operación.

En el caso de las piscinas de acumulación de lixiviados, se debe verificar: la estabilidad de los taludes, el nivel de llenado y realizar el mantenimiento superficial de las capas de geomembrana que cubren la base de las balsas de almacenamiento de lixiviados. En caso de amenazas de importancia que comprometan la estabilidad de las piscinas, deberán realizarse obras mayores (muros de gaviones, soportes de llantas u otros) de modo que se garantice la estabilidad de éstas.

La recirculación de lixiviados es el método que se va a emplear para el manejo de estos líquidos, el cual, consiste en atenuar o diluir los compuestos orgánicos e inorgánicos, mediante procesos biológicos y reacciones químicas, tales como, la conversión de ácidos grasos simples a metano. Cabe destacar que la recirculación de lixiviado incrementa la producción de biogás.

Finalmente, la tecnología de tratamiento de lixiviados que se haya previsto debe ser verificada en su eficiencia de remoción a través de monitoreos y seguimiento periódico al funcionamiento de estos sistemas.

9.6. Manejo de biogás

Durante la etapa de operación se debe controlar la construcción de los drenes para gas (chimeneas) de forma que se realice una compactación adecuada al contorno, así mismo cuidar que no se golpeen los drenes y estos se mantengan verticales desde la base hasta la cobertura final. El monitoreo debe realizar la revisión visual y limpieza manual rutinaria del sistema de captación y quemadores de biogás (individuales o colectivo) instalados para verificar su buen funcionamiento. También se deberá inspeccionar debidamente el sitio para la detección de fugas en las capas superficiales para su inmediato sellado.

9.7. Manejo de sistemas de drenaje pluvial

Se debe tener en cuenta que después de los efectos de temporada como: vientos y transporte de vegetación o vientos fuertes que transporten polvo y diversos materiales, estos se pueden acumular en los canales y podrían causar un bloqueo o cubrir por completo los canales y complicarse la situación con la ocurrencia de una lluvia severa. Los canales de drenaje deberán ser limpiados como mínimo, cada seis meses y de manera más continua en zonas en donde la temporada de lluvias es más regular.

9.8. Operación en época de lluvias

Se debe tener cuidado en época de lluvias dado que las aguas pueden inundar las zanjas. Por lo tanto, se deben construir canales perimetrales para captarlos y desviarlos e incluso proveerlos de drenajes internos. En casos extremos, puede requerirse el bombeo del agua acumulada. Las paredes longitudinales de las zanjas tendrán que ser cortadas de acuerdo con el ángulo de reposo del suelo excavado.

La excavación de zanjas exige condiciones favorables tanto en lo que respecta a la profundidad del nivel freático como al tipo de suelo. Los terrenos con nivel freático alto o muy próximo a la superficie del suelo no son apropiados por el riesgo de contaminar el acuífero. Los terrenos rocosos tampoco lo son debido a las dificultades de excavación. Los períodos con fuertes lluvias pueden impedir que los vehículos de recolección de residuos circulen para descargar los residuos en el frente de trabajo.

Figura 63. Acciones en épocas de lluvias .

Descripción	Acciones
Camino de acceso enlodados	Añadir cenizas, piedra molida o residuos de demolición de construcciones.
	Mantener un área de trabajo especial con caminos permanentes.
Área de descarga enlodada	Esparcir tierra seca.
	Mantener el equipo de compactación fuera del área, descargar y mover los residuos sólidos de manera perpendicular al área.
	Nivelar el área de descarga levemente para permitir la escorrentía.
Suelo húmedo/no operable	Mantener pilas compactadas e inclinadas y cubiertas con alquitrán.
La permeabilidad / densidad del suelo varía con el diseño	No compactar suelos cuando hay exceso de humedad.
	Proteger el suelo (por ejemplo, con coberturas).
Obstrucción del sistema de colección de lixiviado por la escorrentía	Añadir barreras.
	Limpieza periódica de la red de tubería.

Fuente: Helvetas, 2022

En lugares que tienen lluvias intensas, si no se toman medidas preventivas, puede que los caminos y las áreas de descarga se enloden, lo cual retrasaría las operaciones. Las lluvias intensas también pueden aumentar el nivel freático y afectar los sistemas para desviar las aguas subterráneas, los cuales son diseñados para proteger al relleno sanitario de los ingresos de las aguas subterráneas.

Los dos problemas recurrentes en época de lluvias, son: no poder transitar por los caminos de acceso y no poder acceder al frente de trabajo.

Figura 64. Acciones preventivas y de contingencia, en épocas de lluvias.

Problema	Acción de Prevención	Acción de Contingencia
Afectación al camino de acceso	Preparar un camino alternativo u otro frente de descarga con un camino alternativo.	Depositar en la celda de emergencia, para luego realizar una transferencia a la celda de comunes.
	Preparar el área de descarga con piedra, escombros.	Agregar escombros, rocas triturada o cenizas (los días secos posteriores a la lluvia)
Sin acceso el frente de trabajo	Tener preparado un frente alternativo.	Mantener la pendiente del área de descarga para permitir el escurrimiento
	Almacenar bien el material de cobertura y aplicarlo cuando sea necesario.	Mantener el equipo de compactación fuera del área, descargando y moviendo residuos en la parte superior o inferior de la superficie de trabajo

Fuente: Helvetas, 2022

En caso que el sitio de disposición final sea relativamente llano, el sistema de colección de lixiviados ayudará a reducir algunos de los problemas asociados con las lluvias excesivas. Sin

embargo, si éste no tiene la capacidad de acomodarse a las condiciones extremas, la presión líquida se acumulará dentro del relleno sanitario y dará lugar a la migración de lixiviado. La reducción de la densidad del suelo, que puede causar inestabilidad en el revestimiento, también puede ser el resultado de la lluvia intensa. En los períodos de lluvias se presentan los mayores problemas de operación en un relleno sanitario dado, como sigue:

- Difícil ingreso de los vehículos recolectores por encima de las celdas ya conformadas y posibles atascamientos debidos a la baja densidad alcanzada con la compactación manual.
- Dificultad para extraer y transportar el material de cobertura y arduo trabajo de conformación de celdas. Estos factores conducen a un menor rendimiento por parte de los operarios.
- En ocasiones, debido a las fuertes lluvias, sólo es posible descargar la basura y el material de cobertura sobre la terraza, quedando retrasada la conformación y compactación de las celdas. Por consiguiente, si no se toman las medidas apropiadas a tiempo, se va deteriorando la apariencia del relleno por la basura dispersa y la presencia de gallinazos.
- Mayor producción de lixiviado debido a la lluvia que cae directamente sobre las áreas rellenadas.

Por lo anterior, es necesario tomar las siguientes previsiones:

- Reservar algunas áreas en los lugares menos afectados por las lluvias, con accesos conservados para operar en las peores condiciones.
- Construir una vía empleando para ellos troncos de madera de 3 m de largo, conformando una «empalizada o entarimado». Estos troncos deben ir unidos por medio de alambros de 1/8" de diámetro. Una vez armado el módulo, se cubre con cascajo para evitar que los vehículos patinen sobre ellos. Este camino artificial se construye de acuerdo con las necesidades y avance del relleno en módulos de 3 m de ancho los módulos pueden ser reusados en el futuro. Se recomienda que los módulos sean armados en el sitio; el terreno debe estar bien compactado, para disminuir asentamientos, procurando además darle buen drenaje provisional en tierra.
- Aprovechar los escombros, producto de la demolición de viejas construcciones para conformar y mantener algunas vías internas.
- Durante uno o varios días en la semana reforzar la mano de obra, con una cuadrilla de dos a tres trabajadores más, para mantener el relleno en buenas condiciones mientras subsistan los factores adversos.
- Programar el movimiento de tierra para los períodos secos, ya sea para la extracción del material de cobertura como para la apertura de las zanjas, dejando para la época de lluvias sólo el enterramiento de la basura.

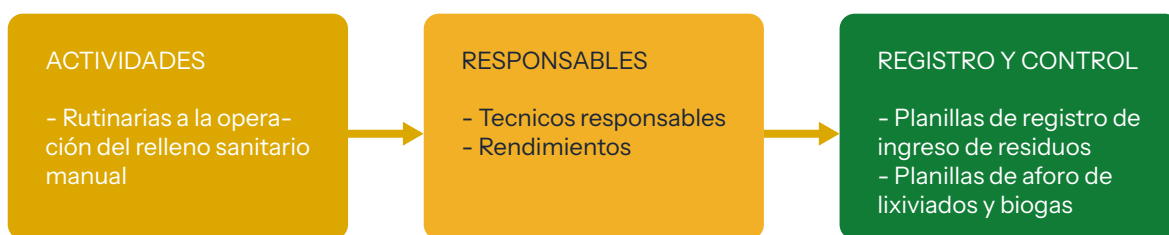
9.9. Celda de seguridad de residuos bioinfecciosos

La disposición final de residuos bioinfecciosos provenientes de establecimientos de salud se realizará en una celda de seguridad, la cual deberá estar diseñada y construida bajo normativa vigente y una capacidad volumétrica suficiente para garantizar su operación durante la vida útil del relleno sanitario. Así mismo la operación deberá ser realizada bajo un control riguroso considerando las recomendaciones de normativa vigente.

9.10. Plan de operación

Con base a los criterios de operación descritos con anterioridad, se puede hacer más eficiente el manejo diario del relleno sanitario y se establece con claridad los papeles y responsabilidades de los involucrados a través de un plan de operación que mínimamente incluya:

Figura 65. Componentes del plan de operación.



Fuente: Elaboración Propia en base a Jaramillo, 2002



10. Mantenimiento del relleno sanitario

La infraestructura del relleno sanitario mecanizado debe contar con el mantenimiento respectivo para que las condiciones de operabilidad sean adecuadas a lo largo del cierre y mantenimiento post cierre.

Las actividades de mantenimiento, en función del tamaño y magnitud de éste, se ejecutarán durante un periodo de 10 a 15 años, y tendrán un carácter preventivo y ocasionalmente correctivo.

a. Limpieza General.

Es importante mantener limpias las áreas adyacentes al frente de trabajo diario, debido al material disperso. Cuando se dejan acumular papeles arrastrados por el viento, el relleno adquiere mal aspecto. Al término de la jornada uno de los trabajadores debe recoger todos estos materiales dispersos y depositarlos en el sitio donde se construye la celda diaria.

b. Vías de acceso y camino interno

La vía de acceso y el camino interno al frente de trabajo, a las redes de drenaje pluvial y a la superficie terminada del relleno deben mantenerse en adecuadas condiciones de operación.

c. Drenaje perimetral y/o pluvial

Se debe conservar en buen estado el drenaje pluvial periférico (canal en tierra y cunetas de la vía de acceso) y la superficie del relleno.

Con el tiempo, estos canales se van obstruyendo por la erosión de los taludes de tierra, por el material que se arrastra en las épocas de lluvia o es dispersado por el viento (papeles, plástico, etc.).

d. Drenaje del lixiviado

Debido a la gran cantidad de material fino arrastrado por las aguas que percolan en el interior del relleno, los drenajes y zanjas de almacenamiento internas y externas, se van colmatando poco a poco, y se pueden obstruir con el tiempo. Como es obvio, la remoción de este material, por ahora, es impracticable, dentro del relleno, pero las zanjas externas sí pueden ser objeto de limpieza si se extrae todo el material fino sedimentado en ellas, para renovar su capacidad de almacenamiento y evaporación.

Este material se deposita nuevamente en el relleno, puede servir para cubrir la celda diaria.

e. Drenaje de gases

Debido a los asentamientos del relleno y al tránsito vehicular por encima de las celdas y terraplenes ya terminados, las chimeneas de gases se van deformando e inclinando; de ahí que sea necesario mantenerlas verticales a medida que se eleva el nivel del relleno con el fin de evitar su obstrucción y total deterioro.

f. Instalaciones

La infraestructura y demás instalaciones, tales como la cerca perimetral del relleno, el cartel de presentación, la caseta de control, al igual que las instalaciones sanitarias, deben ser objeto de mantenimiento a fin de no menoscabar la imagen de la obra.

g. Cobertura final

La colocación de las capas de la cobertura final y la siembra de pasto en los terraplenes terminados que ya no recibirán más residuos requieren gran atención porque contribuyen al

buen funcionamiento del relleno y mejoran su aspecto. Es conveniente, entonces, acelerar el proceso de siembra colocando tepes con césped al menos en 10% del área, a fin de que la obra se armonice rápidamente con el paisaje natural del entorno.

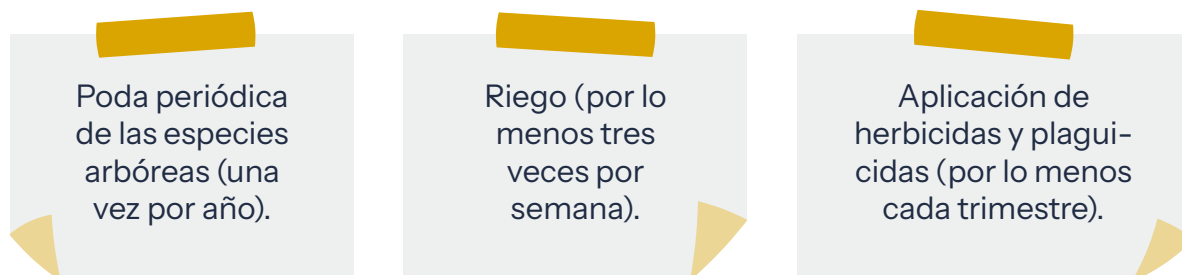
Como ya se sabe, con el transcurso del tiempo, los residuos de los rellenos sanitarios se descomponen (parte se transforma en gas y parte en líquido), por lo que la tierra de cubrimiento y la humedad penetran en los espacios vacíos del relleno, asentándolo. Después de dos años, el asentamiento se reduce mucho y prácticamente desaparece a los cinco años.

Como este no es uniforme, se producen depresiones en la superficie de la obra, donde se acumula el agua de las lluvias; en consecuencia, se debe mantener nivelada toda la superficie del terreno y contar con buen drenaje que tenga una pendiente de 2 a 3%.

h. Áreas verdes

Las áreas verdes son muy importantes dentro del sistema de relleno sanitario ya que son brindan una buena imagen del acceso y de las oficinas, y constituyen un elemento esencial en la estética del lugar y del paisaje, tal como lo es la barrera de amortiguamiento que se encuentra en la periferia del lugar. Su mantenimiento consistirá en los siguientes aspectos:

Figura 66. Mantenimiento de áreas verdes.



Fuente: Elaboración Propia en base a Helvetas, 2020

Además de las áreas señaladas, se dará mantenimiento a la cubierta vegetal que se desarrolle en la superficie de las áreas clausuradas del relleno.

i. Mantenimiento de infraestructura (caseta de seguridad)

Es importante mantener ordenada la caseta, manteniendo espacios de libre circular que permitan el ingreso y salida de los operadores. Así mismo, de manera periódica se debe limpiar cunetas pluviales y los accesos para evitar el ingreso de agua de lluvia.

Los servicios sanitarios se deberán limpiar con frecuencia conforme a los requisitos que establezcan las disposiciones aplicables.

Si en el caso que el acceso al alcantarillado sea difícil las aguas residuales domésticas pueden descargarse en un sistema séptico o utilizar un sistema aislado de disposición de excretas. Estos líquidos deberán ser succionados al menos una vez cada seis meses y dispuestos en un sistema de tratamiento de aguas residuales o en su defecto en el sistema de almacenamiento y/o tratamiento de lixiviados.

10.1. Mantenimiento de maquinaria

La vida útil de los equipos utilizados en rellenos sanitarios está estrechamente asociada, con el programa de mantenimiento de equipos que se realice.

El mantenimiento y la reparación de equipos requiere ser programada de manera de satisfacer las necesidades del relleno y cumplir con el objetivo de disponer residuos en forma continua. Siempre que sea posible es conveniente realizar las inspecciones y reparaciones en el relleno y evitar el traslado de máquinas fuera del mismo.

Se recomiendan buenas prácticas para el mantenimiento de equipos, como ser:

- La limpieza frecuente de todo el material rodante asignado a la manipulación de residuos sólidos es esencial para mantener el equipo en buen estado. La limpieza ayudará a aumentar la vida útil de ese equipo y disminuirá el potencial desgaste por fricción resultante de la acumulación de polvo y partículas en los diferentes componentes mecánicos del equipo (rodamiento).
- La inspección y limpieza regulares y frecuentes (incluyendo el lavado, si es necesario) de los radiadores de las máquinas es otra tarea que debe ser programada y aplicada para toda la flota que
- Está en contacto directo con los residuos sólidos. Esta operación debe realizarse al menos diariamente.
- Las operaciones de mantenimiento descritas en los manuales de operación y mantenimiento de los equipos, suministrados por los fabricantes deben programarse previamente en el plan de operaciones y realizarse de acuerdo con las especificaciones del fabricante.
- En rellenos grandes, los operarios del relleno deben estar capacitados para realizar reparaciones mecánicas ligeras (aquellas que no requieren más de dos días para completarse). Para realizar este tipo de reparaciones, es muy importante que todas las herramientas necesarias y un stock de repuestos adecuado estén disponibles en el sitio, o bien contar con un proveedor confiable que pueda suministrar los repuestos en forma inmediata.
- Registrar los mantenimientos realizados a cada equipo (registros necesarios, para el seguimiento ambiental)

Los equipos necesitan suministro de combustible, sino se cuenta con un suministro diario de alguna estación de servicio en el sitio, se debe prever un vehículo con tanque cisterna o algún otro mecanismo para el suministro de combustible.

Controles

Los controles a realizar son los de rutina diarios, semanales y los mantenimientos programados establecidos por el fabricante. Además, se debe realizar control del stock de repuestos y la identificación de necesidades de compras.

Registros

Los registros del mantenimiento de los equipos usualmente se refieren al establecimiento de un archivo separado de cada máquina. Deben registrarse cada uno de los controles mencionados, así como el consumo de combustible y las horas de uso, dichos registros serán insumos para el seguimiento ambiental.





11. Prevención de incendios en rellenos sanitarios mecanizados

Se debe tener presente que, en cualquier sitio de disposición final de residuos sólidos, existen grandes cantidades de materiales de diversas características. En consecuencia, pueden generar problemas significativos en términos de salud, ambientales, económicos e inquietud social; afectando particularmente a los asentamientos que se ubican en su vecindad próxima, así como a las propias instalaciones e infraestructura del sitio y a las personas que realizan alguna actividad en su interior (segregadores, empleados, visitantes, etc.).

Un incendio puede ser controlado rápidamente, eliminando el agente que lo provocó y evitando que se propague la combustión por la presencia del oxígeno del aire; ya que de otro modo la llama evolucionará y en pocos minutos se convertirá en un evento que requerirá de mayores recursos para su control.

La International Solid Waste Association (ISWA), clasifica a los incendios en los sitios de disposición final de la siguiente manera:

Figura 67. Niveles de incendios en disposición final.

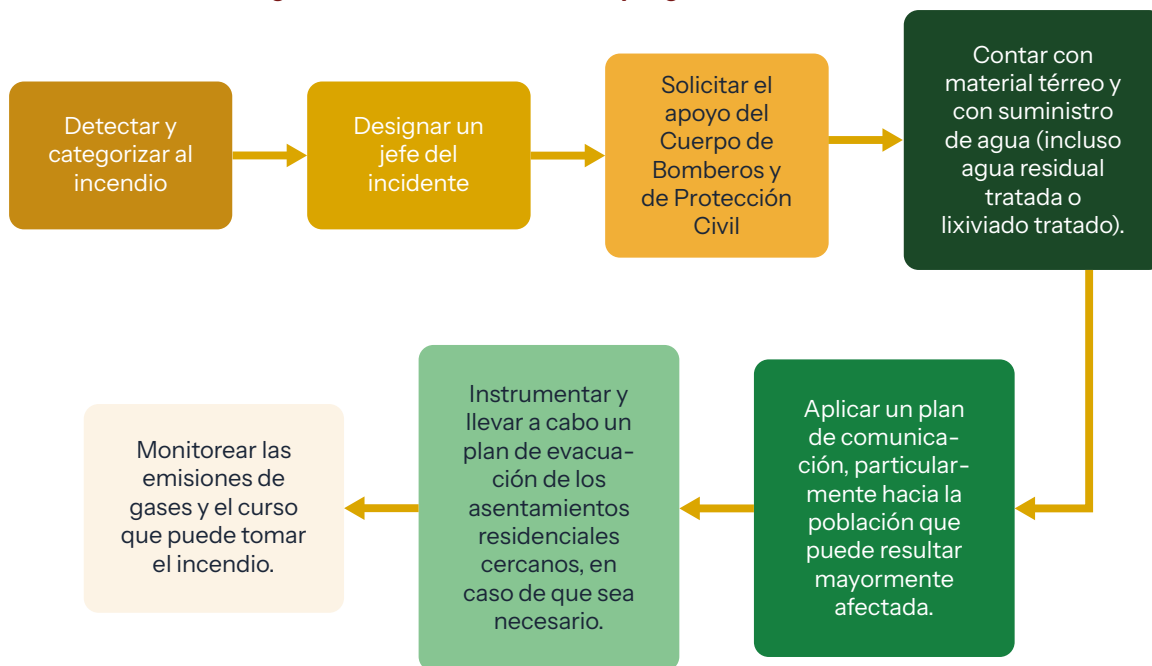
	Nivel 1: Incendios pequeños de residuos que pueden dominarse con recursos propios del sitio dentro de las 24 horas iniciales y extinguirse por completo en 48 hrs.
	Nivel 2: Aquellos que en términos generales involucran cantidades menores a 200 m ³ de material, pudiendo tener una duración de hasta una semana.
	Nivel 3: Incendios que pueden llegar a tener una duración de hasta dos semanas, interviniendo cantidades de materiales que varían entre 200 y 500 m ³ .
	Nivel 4: Incendios grandes o que se asientan profundamente en los botaderos, cuyo control requiere de más de dos semanas, pudiendo combustionar cantidades de materiales que habitualmente rebasan los 5000 m ³ .

Fuente: ISWA, 2020

Los incendios de nivel 2 y 3 pueden transformarse en incendios de nivel 3 o 4, si no se implementa un plan de respuesta inmediato y eficaz, por lo que es fundamental reconocer y categorizar al incendio que se trate. Para la prevención de la intensificación del incendio, es fundamental la ubicación e identificación de los residuos en combustión, la aplicación inmediata de una cubierta de material para evitar la entrada de oxígeno o la remoción del material en combustión.

En el caso de los incendios de nivel 4, es muy importante identificar el punto exacto del incendio y evaluar el alcance que pueda tener. La detección debe estar vinculada con la movilización de recursos para la extinción del incendio. En cualquier caso, las primeras medidas que deben tomarse durante un incendio de nivel 2 o superior, son:

Figura 68. Proceso de detección y seguimiento a incendios.



Fuente: Elaboración Propia en base a ISWA, 2020

La aparición de incendios, se deben a situaciones multifactoriales; sin embargo, basta una fuente de ignición con el calor suficiente para encender el material inflamable y mantener la combustión, como pueden ser cenizas calientes, chispas, combustión espontánea, reacción química e incluso la provocación dolosa. Esta situación se potencializa en las temporadas de sequía, debido a condiciones climáticas caracterizadas por temperaturas muy elevadas, mínima humedad y vientos de regular presencia.

Incendio subterráneo.

Los rellenos sanitarios son ambientes anaeróbios, sumado a la infiltración de oxígeno/aire debe minimizarse en lo más posible.

Como identificarlo:

- Presentan depresión y hundimiento repentino.
- Se pueden observar grietas.
- Se aprecia la presencia de hoyos por el cual ventila el biogás.
- Se observan fisuras en el terreno que dan la impresión de un arroyo

Cómo prevenir los incendios.

- Eliminar la infiltración de oxígeno/aire.
- Monitorear las condiciones del sitio regularmente.
- Hacer mantenimiento de todas las cubiertas de las zonas ya clausuradas.
- Si se cuenta con un sistema de captura de biogás, mantenerlo balanceado (ajustar la succión de cada pozo) para evitar la infiltración de oxígeno al subsuelo).
- Monitorear regularmente la temperatura y el oxígeno en pozos de extracción.

Procedimiento para realizar la extinción del incendio.

Previo a iniciar los trabajos, será necesario habilitar un frente temporal para el confinamiento de los residuos, en lo que se logra controlar y extinguir el incendio, lo más alejado de la zona

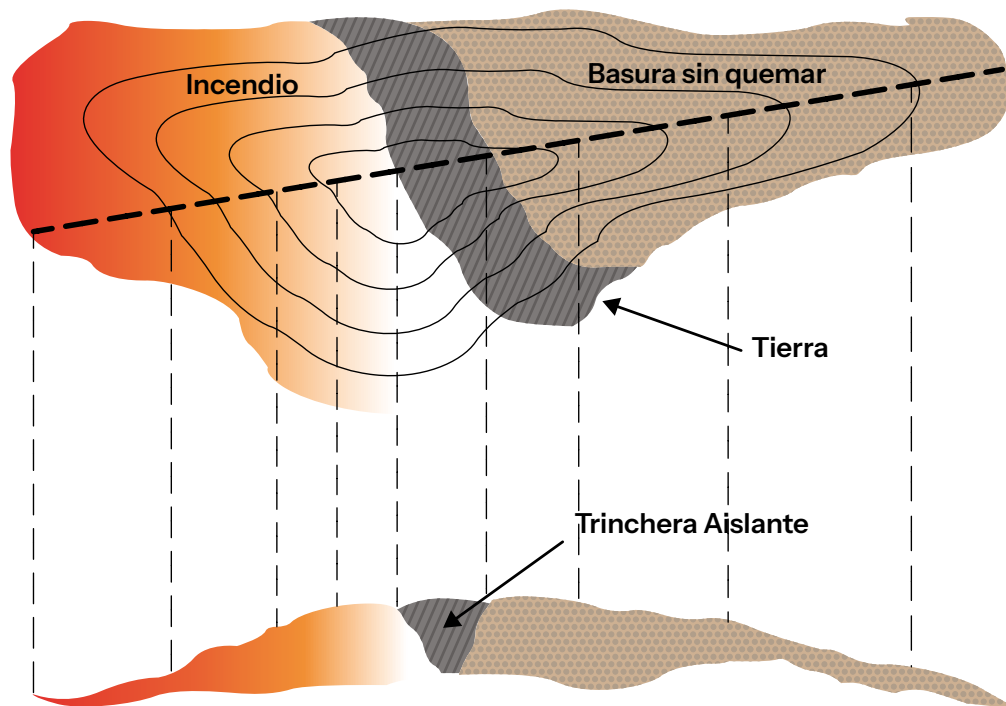
en conflicto. Además, en caso de que en el sitio existan instalaciones para la combustión y el aprovechamiento de biogás, se deberán apagar los equipos de extracción del biogás y cerrar las válvulas de alimentación a estos.

Paralelamente se realizará un recorrido en torno a la zona afectada para precisar la magnitud del incendio, los sitios donde se hallan las principales fuentes de combustión. Se verificará la dirección del viento, las zonas más afectadas, las más vulnerables y las de mayor peligro (aquellas con mayores niveles de radiación).

Con el uso del GPS se deberá georreferenciar la información registrada, además de los elementos más significativos como pueden ser los accesos, las pendientes del terreno y las distancias a las instalaciones del vertedero (oficinas, acometida de energía eléctrica, almacenamiento de combustibles, etc.); amén de localizar en el plano de apoyo con que se cuente, aquellos atributos que lo caractericen.

Con el fin de controlar la propagación del incendio hacia zonas no afectadas, deberá aislarse mediante la habilitación de una trinchera, la cual se rellenará más allá del nivel de terreno natural, colocando abundante material de cobertura con un tractor de orugas, entre el material incendiado y el que está libre de combustión, como se ilustra en la siguiente figura:

Figura 69. Control de propagación del incendio.



Fuente: ISWA, 2020

Una vez identificadas las zonas de mayor riesgo (con mayores niveles de radiación), se procederá a realizar el “acamellonamiento” del material de cobertura, en la vecindad de tales zonas, tan cerca como la permita el propio incendio; colocándolo en la medida de lo posible a Sotavento, es decir, del lado anterior a la fuente de radiación, en el sentido de la dirección del viento.

El siguiente paso, será buscar el aislamiento de las zonas de mayor riesgo, colocando material de cobertura hacia los lados de ellas, tratando de formar una especie de “herradura” con dicho material.

Una vez aislados los puntos de mayor radiación, se procederá al apagado del incendio en los puntos de donde se genera, de acuerdo con los siguientes métodos:

Figura 70. Métodos de control y eliminación de incendios.

Aplicación de agua.

Este método es aceptable solo para extinguir incendios superficiales, ya que, si se trata de un fuego subterráneo, al fluir el agua al interior de los residuos, lo hace buscando zonas de menor resistencia entre estos, como a través de bolsones mal compactados, por lo que no es seguro que llegue a la zona de interés, donde se presenta la combustión de los residuos. Además, se requieren grandes volúmenes de agua, ya que se necesitan 5000 litros de agua para absorber la energía liberada por la combustión total de una tonelada de basura. El uso de espuma y surfactantes puede reducir este volumen considerablemente. Se debe tener en cuenta que el uso de grandes cantidades de agua para extinguir un incendio puede producir grandes cantidades de lixiviado contaminante.

Excavación y reacondicionamiento.

Para el caso de los incendios profundos, donde la aplicación de agua no es conveniente para extinguir el incendio, el método más apropiado suele ser la remoción y el reacondicionamiento de los residuos. El primer paso para controlar un incendio de esa manera es remover el residuo en combustión, exponiéndolo para su apagado con agua, para continuar con la aplicación de una capa de residuos de al menos 1 metro de espesor, la cual se construirá compactándolos en capas de 30 cm. Si el incendio no es tan profundo, se puede evitar la remoción de los residuos y solo colocar la capa de basura compactada, previo riego con agua de la zona en conflicto. Estas medidas disminuyen la cantidad de aire que puede alimentar el incendio, reducen su velocidad y la cantidad de humo resultante de la combustión, logrando un ámbito de trabajo menos riesgoso.

Supresión del ingreso de oxígeno.

Si se limita la cantidad de oxígeno que ingresa a la zona del fuego, es posible extinguir un incendio, pero en general es un proceso lento. Para ello se requiere aplicar una capa de material terreo de al menos 20 cm de espesor ya compactado con el tractor de carriles. Los trabajos de apagado del incendio, se orientarán.

Fuente: Elaboración Propia en base a ISWA, 2020

12. Monitoreo y control de operaciones del relleno sanitario mecanizado

El monitoreo a desarrollar, se lista a continuación:

1. Monitoreo a la vida útil
2. Monitoreo de compactación
3. Monitoreo a la cobertura diaria
4. Monitoreo a la calidad de lixiviados
5. Monitoreo de biogás
6. Monitoreo de aguas superficiales y subterráneas.
7. Monitoreo ambiental

12.1. Monitoreo a la vida útil

A partir de este dato se proyectará la cantidad de residuos sólidos a disponer en el relleno sanitario mecanizado pudiendo ser diaria, mensual, anual y durante el tiempo de vida útil de la infraestructura.

Tabla 28. Proyección ingreso de residuos.

Año	Población (hab.)	Generación de residuos (t/día)	Generación de residuos (t/mes)	Generación de residuos (t/año)

Fuente: Elaboración propia, 2024

Se deberá monitorear la cantidad de residuos y la capacidad remanente de la celda de disposición en términos volumétricos, a fin de determinar la vida útil real del relleno sanitario en m³.

Tabla 29. Proyección ingreso de residuos.

Año	Ingreso Residuos					
	Diario t/día	Anual t/año	Acumulado t	Diario m ³ /día	Anual m ³ /año	Acumulado m ³

Fuente: Elaboración propia, 2024

12.2. Monitoreo de compactación

Los niveles de compactación serán medidos, acorde a lo establecido en el diseño.

12.3. Monitoreo a la cobertura diaria

Los niveles de compactación serán medidos, acorde a lo establecido en el diseño.

Tabla 30. Proyección material de cobertura (MC), residuos + MC.

Año	Material Cobertura			Residuos + Cobertura	
	Diario t/día	Anual t/año	Acumulado t	Anual m ³ /año	Acumulado m ³

Fuente: Elaboración propia, 2024

Durante la descarga de los residuos, esto es especialmente importante en rellenos donde se reciben diferentes clases de residuos, con la finalidad de no mezclar residuos peligroso y bioinfecciosos con los residuos domiciliarios, ya que esto puede causar inhibición en el proceso de degradación de los residuos y por consiguiente alteraciones en la planificación del relleno sanitario, en pequeños rellenos sanitarios donde se descargan solamente residuos domiciliarios, esta precaución no es necesaria.

El crecimiento y la forma del cuerpo de basura se debe observar cuidadosamente. Los controles más importantes son:

- El ángulo del talud del cuerpo de basura (especialmente importante para rellenos con compactación mecanizada, que se construyen en forma de colina artificial).
- La compactación adecuada de los residuos.
- La existencia de fugas de gas o de aguas lixiviadas (las fugas de gas se pueden detectar con equipos de medición; si el municipio en cuestión no dispone de este, se pueden detectar con el olfato y observando el crecimiento de las plantas. El metano impide este crecimiento).
- La altura actual del cuerpo de basura: Para rellenos grandes construidos como colina artificial, se recomienda realizar un levantamiento topográfico de las celdas ya terminadas y las celdas en operación cada año o cada dos años, con el fin de detectar asentamientos del suelo y comparar el verdadero crecimiento del cuerpo de basura con las proyecciones anteriormente hechas.

12.4. Monitoreo a la generación y calidad de lixiviados

Se deberá definir dentro del relleno sanitario la toma de muestras para caracterización y medición del caudal de lixiviado; se llevarán registros de los caudales medidos en los pozos de inspección y se tomarán muestras para caracterizar como mínimo DBO, DQO y sólidos totales.

Se debe realizar controles de fisuras en los canales o drenes de captación y conducción de los lixiviados, de forma de verificar su limpieza y libre circulación de los lixiviados para su tratamiento. Así mismo se deberá verificar que se construyan adecuadamente los drenes internos para lixiviados en las nuevas celdas y que no se dañen o se coloquen obstrucciones en celda en operación.

Se debe realizar controles periódicos del sistema de tratamiento de lixiviados:

- Realizar un control de la infraestructura de forma de verificar que no existan fugas o agrietamientos que puedan ocasionar derrames en lo futuro.
- Verificar niveles de sedimentos en las piscinas de tratamiento.
- Verificar nivel de altura de los lixiviados antes de la época de lluvia de forma de estar preparados contra contingencias.

13. Monitoreo del relleno sanitario mecanizado

El monitoreo es el seguimiento permanente y evaluación de la calidad de elementos naturales (aire, agua, suelo, etc.), a través de muestreos y análisis que permitan determinar el estado del medio ambiente.

13.1. Monitoreo

- Protección de aguas subterráneas (impermeabilización y drenaje). Protección de aguas superficiales (intercepción perimetral de aguas lluvias, control de escorrentía interna, control y depuración de lixiviados).
- Protección visual (Cerca viva de aislamiento perimetral y cobertura de residuos con capas vegetales)
- Protección contra dispersión de olores y partículas.
- Protección contra circulación libre de personas y animales (cerramiento y control de entrada)
- Vías para circulación interna
- Señalización e información mediante letreros
- Control de acceso a residuos
- Zona de mantenimiento (Taller, repuestos, equipos de reserva)
- Seguridad e higiene (Baños, botiquín, instalaciones contra incendios)
- Protección contra insectos, roedores y aves
- Aislamiento de residuos mediante la cobertura diaria
- El polvo presente en el aire en un sitio de disposición final es generado por el viento, los vehículos de recolección y por el equipo pesado que transita sobre las vías secundarias no asfaltadas. Este material particulado también se genera durante la descarga, colocación y compactación de los residuos sólidos o durante la excavación y transporte de material granular y de cobertura secos. Para reducir la cantidad de material particulado, las vías deben humectarse, así como el material de soporte.

Ruido ambiental.

Se presentan varias fuentes de ruido en los rellenos sanitarios que provienen de los vehículos de recolección y el equipo de operación. El ruido es similar al generado por cualquier actividad de construcción pesada y se limita al sitio y vías usadas para transportar los residuos sólidos al sitio de disposición final. Uno de los generadores de ruido más importante corresponde a los motores.

Para reducir el número total de individuos expuestos al ruido, deben realizarse todos los esfuerzos para que el acceso al sitio de disposición final se ubique en el área menos poblada.

Paisajismo.

Con el fin de reducir el impacto ambiental y hacer que el relleno sanitario sea aceptado por el público, el diseño del sitio debe ser compatible con su entorno.

Durante la preparación de sitios de disposición final es importante dejar una barrera ambiental.

Calidad de aguas subterráneas.

El control de la calidad de las aguas subterráneas sirve para demostrar que el relleno sanitario

no está causando deterioro importante en el agua subterránea, situación que se verifica con los pozos de monitoreo.

Calidad de aguas superficiales.

Se deben realizar inspecciones rutinarias de las aguas superficiales aguas abajo para observar signos de contaminación, además de acumulación de sedimentos.

Se recomienda monitorear como mínimo, los siguientes parámetros:

Tabla 31. Parámetros y frecuencias referenciales para el monitoreo de aguas.

Parámetro	Frecuencia
pH	Semestral
Conductividad	Semestral
Oxígeno Disuelto	Semestral
Metales Pesados	Semestral
DQO y DBO5	Semestral
Amoniaco	Semestral
Nitratos	Semestral
Nitritos	Semestral

Fuente: Elaboracion Propia en base a NB - 760, 1996

Se recomienda una vez al año incluir los parámetros relativos a compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles de forma de identificar la posible contaminación de este grupo de contaminantes.

Para el monitoreo de las aguas superficiales se identificarán los cursos de agua superficial y se marcaran varios puntos de muestreo, que se analizaran también de forma semestral-anual con los mismos parámetros.

Las muestras de agua superficial deben tomarse tanto aguas arriba como aguas abajo del lugar que evidencie el deterioro y cuya causa se atribuye al relleno sanitario.

Manejo y monitoreo de lixiviados.

Los lixiviados pueden llegar a las fuentes de agua esencialmente a través de dos vías:

- Percolación lateral o vertical del lixiviado a través de las de las capas de suelo o en acuíferos.
- Escurrimiento superficial hasta las fuentes de agua.

Es importante realizar el control de la escorrentía superficial, la preparación del fondo que evite la contaminación de las aguas subterráneas y la eficiente recolección de los lixiviados.

Es importante efectuar aforo de lixiviados diariamente y mantener un registro:

- Revisar los sistemas de drenaje de lixiviados, inspeccionar diariamente los estanques de lixiviados.
- Realizar inspecciones rutinarias a la evacuación de lixiviados.

Estos pueden ser desde verticales hasta 3:1 (H: V), dependiendo del tipo de suelo. Las terrazas deben tener una pendiente del 2% hacia los taludes interiores para conducir las aguas de lixiviado a los drenajes

Manejo y monitoreo de gases.

El drenaje de gases debe estar constituido por un sistema de ventilación en piedra o tubería perforada en PVC, que funciona como chimenea, que atraviesan en sentido vertical todo el relleno desde el fondo hasta la superficie. Estas chimeneas deben construirse verticalmente a medida que avanza el relleno, logrando buena compactación perimetral; Se recomienda instalarlas cada 30 m, con un diámetro de 0.60m cada una. El mantenimiento de las chimeneas puede efectuarse mensualmente.

Monitoreo del Aire.

Se considera realizar mediciones mensuales los dos primeros años después del cierre técnico del sitio, posteriormente el control anual será suficiente. Para el programa de monitoreo de partículas aerotransportable se debe tomar en cuenta las especificaciones detalladas a continuación:

Tabla 32. Parámetros de monitoreo del aire

Parámetro	Equipo	Técnica	Frecuencia
Partículas totales en suspensión	Equipo para alto volumen	Muestro de alto volumen	Mensuales
Partículas biológicas viables	Equipo de laboratorio para medición de colonias de bacterias en el aire	Incubación, conteo de colonias	Mensuales
Ruido	Sonómetro	Según el manual	Mensuales

Fuente: Ilnorca, 1996

Monitoreo del suelo.

El monitoreo está encaminado a la detección de metales pesados y compuestos orgánicos volátiles. Solo se realizaran cuando se tenga sospecha de contaminación y como forma de comprobación.

Tabla 33. Parámetros de monitoreo del suelo

Parámetro	Frecuencia
Metales pesados (Sb, As, Ba, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Ni, Se, Ag, Tl, V, Zn).	En caso de sospechar su presencia
Compuestos orgánicos volátiles o semivolátiles.	En caso de sospechar su presencia

Fuente: Ilnorca, 1996

13.2. Control

Vectores.

- Los artrópodos y roedores pueden estar presentes en los rellenos sanitarios. Estos y otros vectores pueden controlarse si se aplica frecuentemente una capa de tierra compactada sobre los residuos sólidos; se ha demostrado que una cobertura diaria de 0.15 m

de tierra compactada es la óptima. Aun así, la operación del relleno sanitario debe incluir inspecciones regulares y un programa de control de vectores. Para el control de moscas es necesario prevenir la acumulación de agua estancada mediante la nivelación del terreno y cobertura de los residuos sólidos. Las llantas representan un riesgo de incendios y constituyen sitios de reproducción de mosquitos cuando se acumula agua en ellos. Por ello, no se debe permitir el almacenamiento de neumáticos en los rellenos sanitarios, pudiendo ser utilizadas como escolleras superficiales o muros de contención.

Olor.

- Existen varias fuentes potenciales que ocasionan olores meffíticos en rellenos sanitarios y pueden generarse cuando:
- Los residuos sólidos se descargan y dispersan en el relleno sanitario.
- Cuando Los residuos sólidos del relleno son perturbados, por ejemplo, por perforaciones o excavaciones.
- El lixiviado aparece en la superficie del relleno sanitario.
- La cal o ciertos agentes químicos pueden emplearse con diverso grado de eficacia para controlar olores ofensivos.

Aviar

Las aves son atraídas por los rellenos sanitarios debido a la potencial fuente de alimentos. Las aves pueden plantear un grave riesgo y crear molestia al personal y vecinos de la instalación. Los criterios para la ubicación de los sitios de disposición final de residuos sólidos determinan que una instalación no debe estar ubicada dentro de un radio de 1000 m de un núcleo poblacional; sin embargo, la cobertura rápida y completa de todos los residuos sólidos es la práctica de control más eficaz.



14. Cierre de relleno sanitario mecanizado

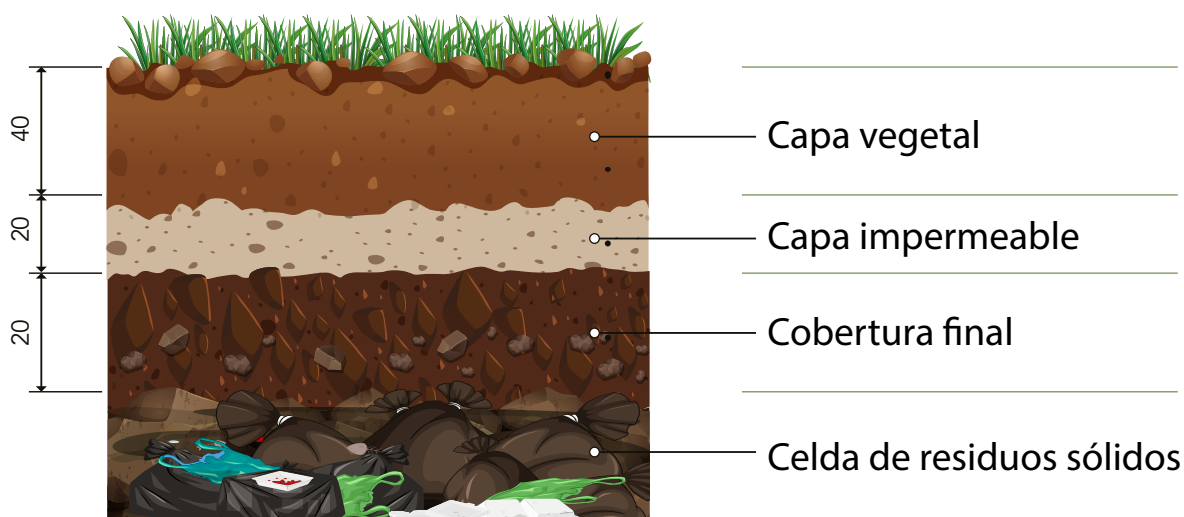
Cuando se cierra el relleno sanitario o un módulo del relleno, hay que construir una capa final para poder restaurar el terreno, se debe construir una cubierta final más elaborada que las cubiertas diarias o intermedias.

El propósito de la cubierta final de un sitio de disposición final es aislar a los residuos más superficiales del ambiente, para minimizar la migración de líquidos en las celdas y controlar el venteo del biogás generado. Un sistema de cobertura final debe ser construido tomando en cuenta las condiciones descritas en la NB-760, para que cumpla con las funciones anteriores, llegando a un mínimo mantenimiento del drenaje adecuado, reduciendo la erosión y asentamientos, con una permeabilidad muy baja.

En la medida de lo posible, el material de cobertura será extraído del mismo predio o de sectores aledaños al sitio de disposición final.

Para la capa final, se recomienda construir:

Figura 71. Capa final de la celda.

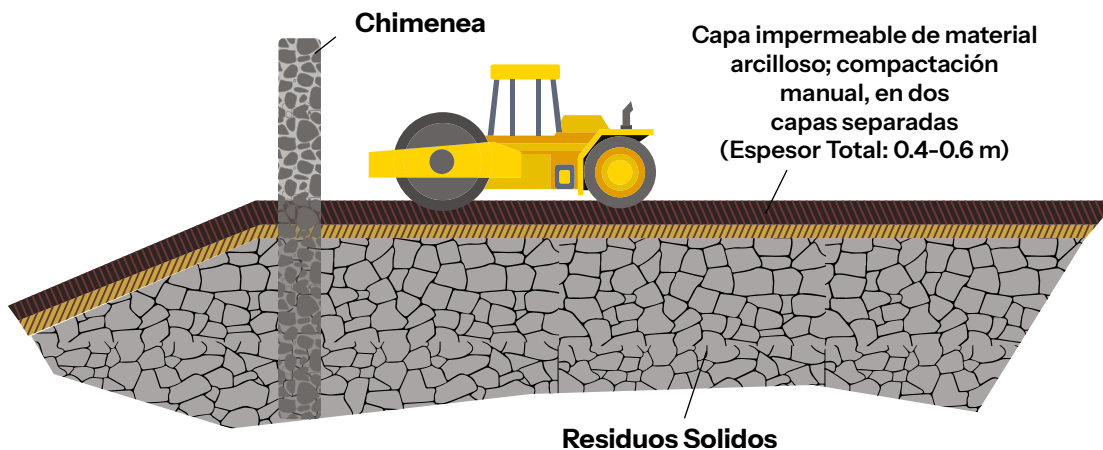


Fuente: Elaboración Propia en base a Jaramillo, 2002

Cuando se cierra una celda, se debe construir una cubierta final más elaborada que las cubiertas diarias. Se recomienda construir una capa final de 0.40 - 0.60 m en dos etapas, cada una de 0.20 - 0.30 m de espesor, con un intervalo de aproximadamente un mes para tratar de cubrir los asentamientos que se produzcan en la primera capa.

El material más apropiado para la construcción de la cubierta final es una tierra arcillosa o limosa, sin embargo, si no se encuentra este tipo de tierra en el sitio mismo o en un lugar cercano y fácilmente accesible, se recomienda utilizar el material de cobertura que se encuentre en el sitio en vez de hacer gastos demasiado onerosos para encontrar el material ideal. Colocar una capa impermeable de material arcilloso o equivalente; compactar con rodillo manual o pisón, preferiblemente en dos capas separadas, llegando a un espesor total de 0,4 - 0,6 m.

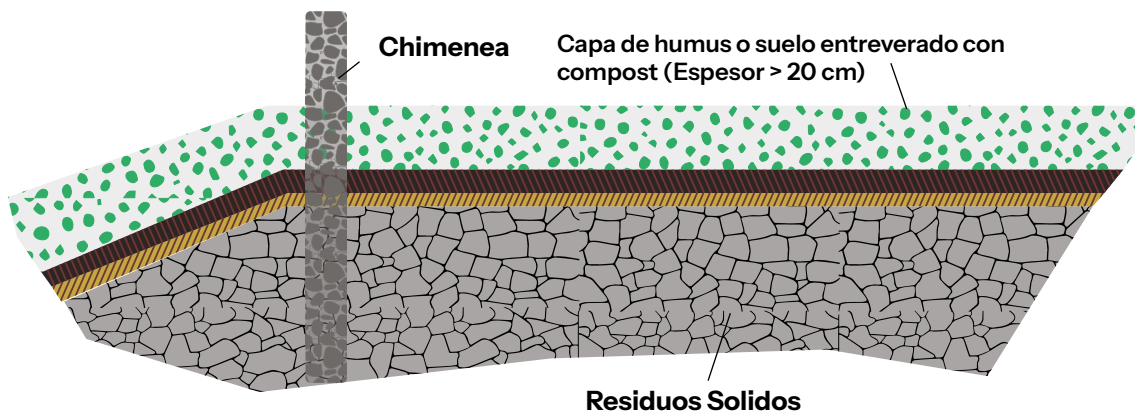
Figura 72. Construcción de capa impermeable.



Fuente: Elaboración Propia

Para la arborización de la celda o del módulo terminado hay que colocar una capa de tierra humus sobre la celda terminada y cubierta con la cobertura final. Si está disponible, se recomienda hacer esta capa con un espesor de al menos 0.4 m.

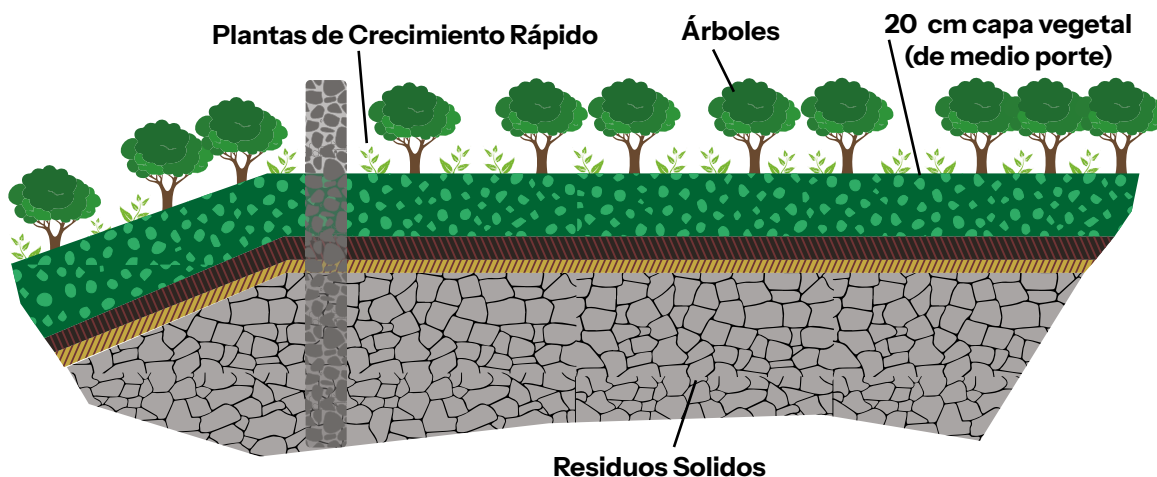
Figura 73. Aplicación de capa de humus.



Fuente: Elaboración Propia

Para la arborización considerar plantas de rápido crecimiento y árboles de bajo o medio porte.

Figura 74. Arborización.



Fuente: Elaboración Propia

14.1. Reconformación del relleno / talud

La biodegradabilidad de los residuos produce altos contenidos de materia orgánica y altas humedades, lo cual ocasiona una degradación rápida que afecta los mismos y la estabilidad del talud donde fueron compactados, estos residuos generan vacíos, gases y lixiviados que pueden aumentar la presión de poros, asimismo pueden darse en el tiempo deficientes sistemas de drenaje que conlleva a la saturación; por lo tanto, pueden generar una disminución en los esfuerzos efectivos, por todo ello se recomienda verificar la estabilidad del relleno sanitario y reconformar los taludes del relleno.

Así mismo, se debe realizar la verificación de pendientes de los taludes, ya que, a medida que el ángulo interno aumenta, los factores de seguridad disminuyen tanto para condiciones estáticas y pseudoestáticas.

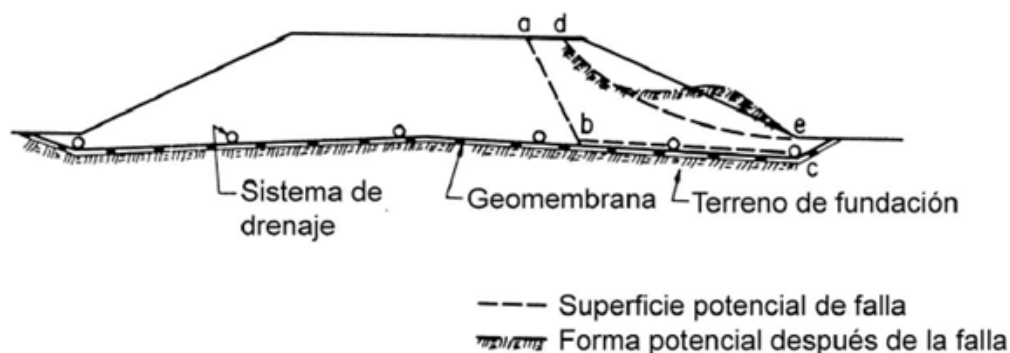
Las figuras 75 y 76 ilustran dos tipos de situaciones de estabilidad en sitios de disposición final. En la figura 75 el relleno sanitario descansa sobre una base firme como roca o un área compactada. El sitio de disposición final tiene un estrato, con un sistema de recolección de lixiviados y sin nivel de lixiviados dentro del relleno. La masa de residuos podrá deslizar a lo largo de la interface (superficie potencial de falla), o si el talud es más inclinado. Los rellenos sanitarios actualmente se diseñan con una inclinación de los taludes 3H:1V en condición seca, aunque en residuos los taludes pueden ser más verticales.

Si el sistema de recolección de lixiviados falla, el nivel piezométrico de lixiviados aumentara, disminuyendo el factor de seguridad. En este caso, la superficie de falla potencial incluye la fundación del relleno sanitario. Si los esfuerzos de corte son porcentualmente mayores que la resistencia del suelo de fundación, movimientos en el pie y en la cresta de talud, impactarán las paredes de los taludes, sistema de recolección de lixiviado o superficies de drenaje de aguas de lluvia.

El recubrimiento del sitio de disposición final también puede fallar, por el deslizamiento a lo largo de una superficie plana paralela al recubrimiento. Un recubrimiento inicialmente seguro y seco, puede fallar tiempo después por saturación.

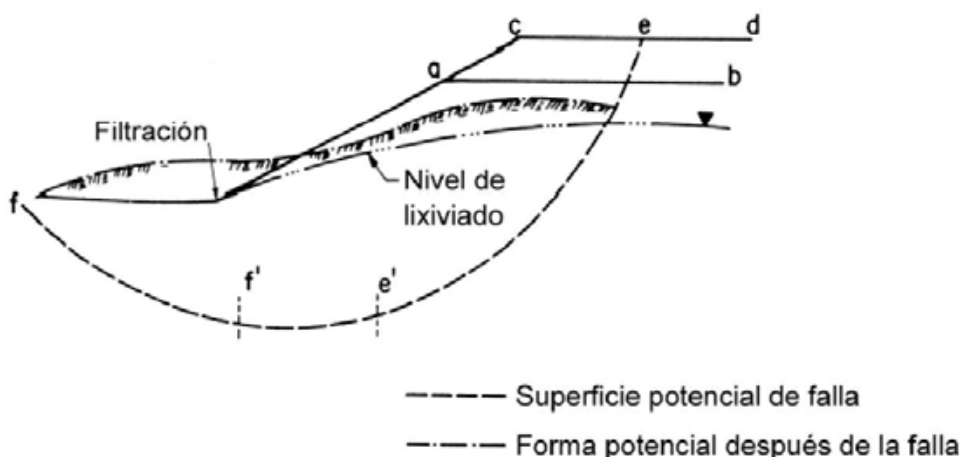
La saturación incrementa el peso unitario del recubrimiento y disminuye la resistencia friccionante a lo largo de la interface. La fuente más común de saturación son las precipitaciones, grietas en recubrimiento y mal drenaje, pero la saturación también puede ser causada por un incremento del nivel de lixiviados dentro del relleno sanitario.

Figura 75. Inestabilidad que pasa por el pie del talud con un suelo de fundación rígida.



Fuente: Angelone, S. 2010

Figura 76. Inestabilidad que pasa por debajo del pie del talud con un suelo de fundación blando.



Fuente: Angelone, S. 2010

14.2. Post uso de la infraestructura y equipamiento existente

Cuando se cierra un relleno sanitario, no es necesario quedarse con el equipamiento y la infraestructura anterior. La balanza ya no será necesaria se puede trasladar al nuevo relleno. Se deben identificar y evaluar la infraestructura que seguirá funcionando y la que deberá ser trasladada; se recomienda habilitar un vivero, ya que el cierre requerirá de cobertura vegetal, así como de humus (sería ideal contar con área de compostaje).

14.3. Controles posteriores al cierre del relleno sanitario

Se debe realizar los siguientes controles después del cierre del relleno sanitario:

- Estabilidad de taludes: La configuración de los taludes definitivos del relleno, deberá definirse de acuerdo a los lineamientos, que marque un análisis de estabilidad de taludes, realizado previamente (citado acápite 10.1)
 - Levantamiento topográfico del terreno
 - Asentamientos y derrumbes (Control visual, una vez por año)
 - Fugas del gas de relleno fuera del área (en rellenos grandes y en rellenos medianos cercanos de áreas pobladas, eso se debe controlar entre 2 y 4 veces por año durante los 5 primeros años después del cierre del relleno).
 - Estado de la reforestación sobre el cuerpo del relleno, en los taludes y alrededor.

El estado de la vegetación existente árboles y plantas en crecimiento es un buen indicador si hay fugas de gas. Como el metano tiene un impacto asfixiante sobre muchas plantas, tanto en la atmósfera como en el suelo, un sitio con considerable menor densidad de vegetación indica una fuga de gas.

15. Post clausura de relleno sanitario mecanizado

Se debe analizar las alternativas de uso futuro del relleno sanitario clausurado, con base en su ubicación principalmente y en otros factores específicos para cada caso. Durante el monitoreo posterior se revisa la estabilidad de la masa de residuos, se realiza la captación de gases y lixiviado, el tratamiento de estos últimos y el manejo de las aguas pluviales, durante varios años.

Por lo general un relleno sanitario clausurado se utiliza como un lugar de esparcimiento y recreación, en ningún caso se debe construir sobre este, grandes infraestructuras ni deben ser considerados como áreas habitables.

Algunas alternativas que se pueden tomar en cuenta son las siguientes:

- Plantas de aprovechamiento de residuos
- Parques temáticos asociados al manejo de residuos
- Campos deportivos
- Campos de golf
- Campos para generación de energía solar
- Parques recreacionales y de esparcimiento
- Parques temáticos
- Jardines botánicos de plantas que no sean medicinales o comestibles
- Rutas para bicicleta y patinaje
- Estaciones de transferencia



Bibliografía

Angelone, S. (2010). Estabilidad de taludes. Recuperado el 27 de 05 de 2013, de <http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/ESTABILIDAD%20TALUDES%202010%20color%20.pdf>

Basilea, 2012. Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Deshechos Peligrosos y su Eliminación

Bid, 2012. Informe III, Planes de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos, Ingeniería Básica, Evaluación de Impacto Ambiental, BID, Consorcio de Gestión Integral, Bolivia.

Browning, 1991, Understanding the Waste Cycle, Browning-Ferris Industries, Mobius Curriculum. Revista ingeniería de construcción.

CalRecovery Inc, 1997. "Guía de Rellenos Sanitarios en Países de Desarrollo" California, Estados Unidos de America

Colomer, 2007. Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos, Colomer F., Gallardo Antonio, Universidad Politécnica de Valencia, España.

CPE, 2009, Constitución Política del Estado del año 2009

CPTS, 2001. Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles "Informe de Consultoría sobre la Evaluación de la Operación del Relleno Sanitario de Mallasa". Bolivia.

DANIDA, 2008. Rellenos Sanitarios para Poblaciones Menores a 10.000 habitantes, Cooperación Danesa en Bolivia.

DGAC, 2021. Reglamento sobre Operación de Aeródromos RAB-138, Dirección General de Aeronautica Civil. Disponible en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.dgac.gob.bo/wp-content/uploads/2023/03/RAB-138E5_para-public-1.pdf

Estocolmo, 2009. Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP)

Fernández, I. Y., 2010. Tesis: Diseño y factibilidad de relleno sanitario manual para el municipio de la libertad. San Salvador, El Salvador.

HELVETAS Swiss Intercooperation, 2020. Diagnósticos Territoriales de los Municipios de Cuevo, Boyuibe y Lagunillas. Disponible en: <https://www.helvetas.org/es/bolivia/quienes-somos/publicaciones>

HELVETAS, 2020. Planes de Cierre y Rehabilitación de los Botaderos a Cielo Abierto de Cuevo, Boyuibe y Lagunillas. Disponible en: <https://www.helvetas.org/es/bolivia/quienes-somos/publicaciones>

Helvetas, 2023. Estudio de Diseño Técnico de Preinversión del Rellenos Sanitario de Camiri

Ibnoorca, 1996. Normas Bolivianas NB 757 – NB 760, Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, IBNORCA, Bolivia.

ICA, 2002. Fundación Ica "Algunas experiencias Municipales exitosas en el control de los

residuos sólidos en México”.

IWA, 2023. Landfill Leachate Management. International Water Association; Vinay Kumar Tyagi and C. S. P. Ojha

Jaramillo, 2002. Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, Universidad de Antioquía, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Colombia.

LEY 031, Ley Marco de Autonomías y Descentralización. “Andrés Ibáñez”, del 19 de Julio de 2010. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.planificacion.gob.bo/uploads/marco-legal/Ley%2N%C2%B0%20031%20DE%20AUTO%20NOMIAS%20Y%20DESCENTRALIZACION.pdf>

Ley 1333, Ley General del Medio Ambiente Nro. 1333, del 27 de abril de 1992. Disponible en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://sea.gob.bo/digesto/CompendioII/N/129_L_1333_01.pdf

LEY 300, Ley Marco de la Madre Tierra y Desarrollo Integral para Vivir Bien, del 15 de octubre del 2012. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://mineria.gob.bo/juridica/20121015-11-39-39.pdf>

Ley 755, 2015. Ley Nro. 755 de Gestión Integral de Residuos. Disponible en: <https://datos.siarh.gob.bo/biblioteca>

DS - 2954. Decreto Supremo Nro. 2954 de Reglamento General a la Ley No 755 de Gestión Integral de Residuos. Disponible en: <https://datos.siarh.gob.bo/biblioteca>

Matsufuji, 2007. A road to Sanitary Landfil. Japan International Cooperation Agency JICA

Melendez, 2004. Guía Práctica para la Operación de Celdas Diarias en Relleno Sanitarios Pequeños y Medios, Meléndez C., PROARCA/SIGMA Argentina.

MINAM, 2009. Guía de Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Relleno Sanitario Manual, Sandoval Leandro, Ministerio del Ambiente, Perú.

Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2014. Guía para el Cierre Técnico de Botaderos, aprobado mediante resolución Ministerial 398 del 29 de septiembre de 2014. Disponible en: <https://datos.siarh.gob.bo/biblioteca>

Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2021. Planificación Nacional para el Cierre Técnico de Botaderos, R.M. 269/2021 del 18 de mayo de 2021. Disponible en: <https://www.mmaya.gob.bo/marco-legal/resoluciones-ministeriales/>

MMAyA, 2014. Guía para el Diseño, Construcción, Operación, y Cierre de Rellenos Sanitarios, aprobado mediante resolución Ministerial 398 del 29 de septiembre de 2014. Disponible en: <https://datos.siarh.gob.bo/biblioteca>

MMAyA, 2019. Guías para la preparación del estudio de Diseño Técnico de Pre inversión en Gestión Integral de Residuos Sólidos, Categorías Menores, Medianos y Mayores aprobado mediante Resolución Ministerial Nro. 007 del 15 de enero de 2019. Disponible en: <https://datos.siarh.gob.bo/biblioteca>

Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018. Guía para el Diseño de Servicios de Aseo Urbano aprobado mediante resolución Ministerial 725 del 21 de diciembre de 2018. Disponible en: <https://datos.siarh.gob.bo/biblioteca>

Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018. Guía para el fortalecimiento e Inclusión Social de Recicladoras y Recicladores de Residuos urbanos Reciclables aprobado mediante resolución Ministerial 726 del 21 de diciembre de 2018. Disponible en: <https://datos.siarh.gob.bo/biblioteca>

Morales, 2022. Cierre Técnico y Rehabilitación de Botaderos, Lecciones aprendidas y buenas practicas en los Municipios de Lagunillas, Cuevo y Boyuibe en el Chaco Boliviano; Helvetas Swiss Intercooperation Bolivia. Disponible en: <https://www.helvetas.org/es/bolivia/quienes-somos/publicaciones>

MMAYA, 2021, Planificación Nacional para el Cierre técnico de botaderos, R.M. 269/2021 del 18 de mayo de 2021

MMAYA, 2011, Diagnostico Nacional de Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia, Ministerio de Medio Ambiente y Agua

OPS, 1998. Organización Panamericana de la Salud, “Diagnóstico de la situación del Manejo de Residuos Sólidos

Municipales en América latina y el Caribe”, 2 da edición. Washington, D.C.

OPS, 2005 Organización Panamericana de la Salud, “Informe de la Evaluación Regional de los servicios de manejo de Residuos Sólidos Municipales en América Latina y el Caribe” Washington, D.C.

ONUDI, 1997. Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos, Fernández A, Sánchez O, ONUDI – LARE, 1997.

PLAN, 2016, Plan de Implementación de la Ley 755 aprobado mediante Resolución Ministerial Nro. 489 del 23 de diciembre de 2016 por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua

PNUMA, 2021. Hoja de ruta para el cierre progresivo de los basurales en América Latina y el Caribe, Programa para el Medio Ambiente ONU. Disponible en: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/noticias/el-pnuma-presenta-hoja-de-ruta-para-el-cierre-progresivo-de-los>

Proarca, 2004. Guía para la Gestión del Manejo de Residuos Sólidos Municipales, Salazar D, PROARCA/SIGMA Argentina.

P&D, 2004. The Urban Unit Urban Sector Policy and Management Unit, Design and Operation of Sanitary Landfill, P&D Department. India

R.M. 432, 2015, “Calsificacion de residuos en Bolivia”, Resolucion Ministerial Nro. 432 del 11 de noviembre del 2015 del Ministerio de Medio Ambiente y Agua

Roben, 2002. Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales, Eva Röben, DED/, Loja Ecuador, 2002.

Rushbrook P., 1998. A Technical Guide to Solid Waste landfills in Middle and Lower Income Countries. Rushbrook P., Pugh M.

Pearson, 1996. Sistema de Tratamiento de Lixiviado Relleno Sanitario, Ingeniería Ambiental; 2ed, Henry, J. G.; Heinke, Gary. W. Editorial Pearson.

Petts J. 1994. Eduljee G. Enviromental Impact Assessment for Waste Treatment and Disposal Facilities, Great Britain

Planning, Design, and Operation, Washington, EE.UU. 1998: Banco Mundial.

Segura, 2011. Maquinaria para Gestion lintegral de Residuos Sólidos Urbanos "Fundamentos y Aplicaciones"; Jose Carlos Segura Cobo, Bellisco Ediciones Técnicas y Científicas; Madrid, España

Superintendencia de Servicios, 2017. Informe Nacional 2015 respecto a la Disposicion Final de Residuos Solidos, Bogota, Colombia.

Tchobanoglous, 2002. Handbook of Solid Waste Management, Second Edition – McGRAW – HILL. Disponible en: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071356237>

Vasco, 2015. Documento Guía Para la Realización de Balances Hídricos en Vertederos. Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial

Wehenpohl, 2000. Manual para la Supervisión y Control de Rellenos Sanitarios, Wehenpohl Günther GTZ México



Planta de Tratamiento de Lixiviados, Relleno Sanitario Mecanizado "El Ingenio", El Alto



