

Manual de Protocolo de Construcción Nuevos Rellenos Sanitarios con Revestimientos Compuestos



USAID
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA



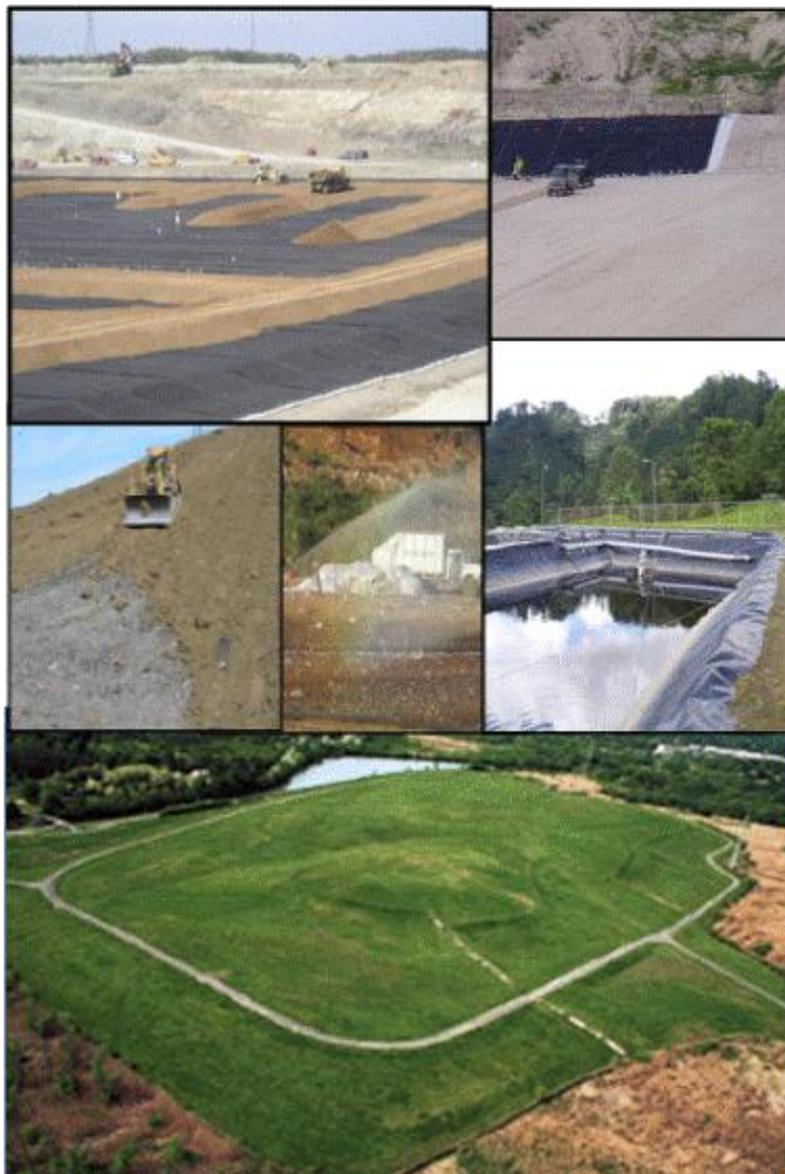
CCAD
COMISIÓN CENTROAMERICANA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

ACUERDO DE COOPERACIÓN USAID - CCAD

Editor: Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD) 2010

Este documento ha sido posible gracias al apoyo del Gobierno de los estados Unidos a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). Los puntos de vista/opiniones aquí expresados no reflejan necesariamente los de USAID ni los del Gobierno de los Estados Unidos.

MANUAL DE PROTOCOLO DE CONSTRUCCIÓN NUEVOS RELLENOS SANITARIOS CON REVESTIMIENTOS COMPUESTOS



USAID
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA



CCAD
COMISIÓN CENTROAMERICANA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

ACUERDO DE COOPERACIÓN USAID - CCAD

Este documento ha sido posible gracias al apoyo del pueblo de los Estados Unidos de América, a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID). Los puntos de vista/opiniones aquí incluidos no reflejan necesariamente los de USAID o los del Gobierno de los Estados Unidos.

GENERALIDADES

ANTECEDENTES

En la actualidad, tanto Centroamérica como República Dominicana enfrentan el problema del manejo de residuos sólidos, ocasionado por los sectores urbano y productivo, por lo que surge la necesidad de proponer iniciativas que faciliten la reducción y manejo de estos residuos. Diferentes estudios, experiencias y actividades que se han realizado para el análisis de este tema en la región, han propuesto una serie de soluciones, dentro de las cuales muchas de estas buenas alternativas están orientadas en lograr un menor impacto al ambiente y la salud humana.

Con fondos de USAID, a través de la CCAD y USEPA, se han venido realizando acciones regionales de fortalecimiento en el área de la gestión integral de desechos sólidos a través de la elaboración de un “Marco de referencia para una política de manejo de los desechos sólidos en Centroamérica” y “Recomendaciones para un Plan de Acción en Desechos Sólidos para Centroamérica”. Asimismo, bajo PROCARCA/SIGMA, con la elaboración de la “Guía práctica para la operación de celdas diarias en rellenos sanitarios pequeños y medianos”, la “Guía para la Gestión del Manejo de Residuos Sólidos Municipales”, el “Estudio para la evaluación mercadológica de los Industriales en El Salvador”, entre otros. Existen otras iniciativas desarrolladas por USAID con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), como es el “Modelo de Biogás Centroamericano” Otras entidades, como la Organización Panamericana de Salud han contribuido con los países a través de guías que permiten realizar diseños de rellenos sanitarios en general de tamaño pequeño o mediano, dentro de las cuales cabe destacar: la “GUÍA PARA EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS MANUALES”.

En la actualidad, los países del CAFTA-DR se encuentran en diferentes estados de avance en la materia, específicamente en lo que se refiere a la disposición final. Varios de estos países, adoptan los rellenos sanitarios como un método de disposición final de desechos sólidos aceptable. El Salvador y Costa Rica son los países de la región que cuentan con mayor avance en el área de rellenos sanitarios.

En Costa Rica, en el marco de su Plan Estratégico 2006-2010, la acción estratégica 4: Rellenos Sanitarios Regionales, en lugar de Botaderos, establece la importancia de los rellenos sanitarios sobre la base de la fuerte economía de escala que ofrecen, estimando una capacidad de atención entre 100,000 y 200,000 habitantes, por lo que estiman que para el año 2012, estarán implementando el 100% de los rellenos regionales.

El Salvador, recientemente ha lanzado su Plan Nacional de Manejo de Desechos Sólidos que incluye, entre otros, la construcción de 6 rellenos sanitarios, ampliación de 3 rellenos y la construcción de 42 plantas de compostaje y reciclaje.

En general, los rellenos sanitarios modernos, son estructuras de ingeniería localizadas, diseñadas, operadas y monitoreadas de tal forma que cumplan con requerimientos de control y aseguramiento de calidad. Estos deben ser diseñados para proteger el ambiente de contaminantes

que provienen de desechos domiciliarios, pudiendo además recibir lodos no peligrosos, desechos industriales y ripio. Es por ello que se vuelve de suma importancia para la construcción de estos rellenos, de acuerdo con los estándares federales de USEPA, considerar entre otros: restricciones sobre el lugar, requerimientos de la membrana compuesta, la recolección de lixiviados y sus sistemas de remoción, prácticas de operación, monitoreo de las aguas subterráneas y prácticas de operación.

Sobre esta base, de acuerdo con los planes de acción de El Salvador y Costa Rica, y el interés expresado por el resto de los países del CAFTA-DR, en los cuales existen acciones actuales incipientes orientadas a la construcción de rellenos sanitarios, se enmarca el fortalecimiento a los países a través de una herramienta guía que les permita a los países contar con sistemas de aseguramiento de calidad para el cumplimiento del objetivo primordial de la protección de la salud y del ambiente de contaminantes.

TABLA DE CONTENIDO

1.0	INTRODUCCIÓN	7
1.1	Propósito	8
1.2	Componentes generales para la ubicación del relleno	9
1.3	Componentes del revestimiento de las celdas del relleno.....	10
1.4	Componentes del sistema de recolección de lixiviados	12
1.5	Control de calidad/Aseguramiento de calidad de tiempo completo.....	13
1.6	Biogás	13
1.7	Puntos críticos de la inspección	14
2.0	RECUBRIMIENTOS PARA SUELO	15
2.1	General.....	15
2.1.1	Control del agua de tormentas durante la construcción de recubrimiento.....	15
2.2	Requerimientos de materiales in-situ para el recubrimiento del suelo	16
2.3	Requerimientos de materiales para el recubrimiento del suelo.....	17
2.3.1	Suelos para recubrimientos construidos	18
2.3.1.1	Prueba de humedad/densidad (H/D).....	18
2.3.1.2	Pruebas sobre el coeficiente de permeabilidad	19
2.4	Requerimientos para la construcción de recubrimiento para el suelo.....	20
2.4.1	Generalidades	20
2.4.2	Recubrimientos de suelo construidos	22
2.4.2.1	Encaje del recubrimiento	22
2.4.2.2	Hidratación del suelo del recubrimiento.....	23
2.4.2.3	Tamaño del terrón y de las rocas	24
2.4.2.4	Esfuerzo de compactación (Compactación de suelos).....	25
2.4.2.5	Plasticidad del suelo	26
2.4.2.6	Protección del recubrimiento.....	26
2.4.2.7	Cubierta protectora	27
2.5	Aseguramiento de calidad y frecuencia para realizar pruebas del recubrimiento suelo ...	27
2.5.1	Recubrimientos de suelo construidos	28
2.5.1.1	Densidades de campo y contenido de humedad	28
2.5.1.2	Análisis granulométrico.....	30
2.5.1.3	Límites de Atterberg.....	30
2.5.1.4	Coeficiente de permeabilidad	30
2.5.2	Verificación de espesor	30
2.5.3	Verificación de materiales in-situ y preparación de subrasante	31
2.6	Puntos críticos de inspección	33
3.0	RECUBRIMIENTOS DE GEOMEMBRANA.....	34
3.1	Generalidades.....	34
3.2	Fabricación.....	34
3.3	Transportes.....	34
3.4	Envío.....	35
3.5	Almacenamiento	35
3.6	Instalación.....	35
3.6.1	Preparación de la subrasante	36
3.6.2	Desplazamiento de la geomembrana	36
3.6.3	Clima	37
3.6.4	Equipo sobre la geomembrana	38
3.6.5	Consideraciones para construir sobre pendientes con inclinación pronunciada...	38
3.7	Sellado	39

3.8	Pruebas.....	41
3.8.1	Control de calidad de fabricación.....	42
	3.8.1.1 Lote de resina.....	42
	3.8.1.2 Pruebas del fabricante de geomembrana	42
3.8.2	Conformidad.....	42
3.8.3	Selladuras	42
	3.8.3.1 Verificación de pruebas de selladuras	42
	3.8.3.2 Pruebas no destructivas	43
	3.8.3.2.1 Pruebas de presión del aire	44
	3.8.3.2.2 Pruebas de caja de vacío	44
	3.8.3.3 Pruebas destructivas	45
3.9	Reparaciones y repetición de pruebas.....	47
3.10	Zanja de anclaje y relleno	48
3.11	Cubierta protectora y materiales de drenaje.....	49
	3.11.1 Despliegue	49
	3.11.2 Espesor y material	50
3.12	Puntos críticos de inspección	51
4.0	SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS	53
4.1	Capa de drenaje de lixiviados	53
	4.1.1 Materiales	53
	4.1.2 Construcción.....	54
	4.1.3 Realización de pruebas de control de calidad.....	55
4.2	Tubería de recolección de lixiviados	56
4.3	Colectores de lixiviados.....	57
4.4	Traslado de lixiviados.....	58
4.5	Manejo de lixiviados recuperados	60
4.6	Puntos críticos de inspección	63
5.0	RECUBRIMIENTOS CONSTRUIDOS POR DEBAJO DEL NIVEL FREÁTICO.....	64
5.1	Generalidades.....	64
5.2	Análisis, diseño y construcción.....	64
	5.2.1 Generalidades	64
	5.2.2 Determinación del nivel freático estacional más alto.....	65
5.3	Control a corto plazo de las aguas subterráneas	66
	5.3.1 Caracterización de suelos in-situ	66
	5.3.2 Métodos de decantación	67
5.4	Diseño de decantación y documentación del desempeño	68
5.5	Diseño de recubrimiento y balastro para condiciones de largo plazo.....	69
5.6	Puntos críticos de inspección	72
6.0	DOCUMENTACIÓN Y REPORTES DE CONSTRUCCIÓN DE RECUBRIMIENTO	73
6.1	Reportes de evaluación de recubrimiento	73
6.2	Balastro	76
	6.2.1 Suelo como balastro	76
	6.2.2 Desechos como balastro	77
6.3	Puntos críticos de inspección	77
7.0	CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRANEAS.....	78
7.1	Importancia primaria de la seguridad en el lugar de trabajo.....	79
7.2	Importancia de la limpieza en los procedimientos.....	79
7.3	Monitoreo del diseño del pozo.....	80
7.4	Actividades previas en el campo.....	80
	7.4.1 Determinación de las condiciones esperadas en las aguas subterráneas y geología	

7.4.2	Selección del método de perforación adecuado	81
7.4.3	Selección de materiales para el pozo.....	81
7.5	Actividades de campo.....	82
7.5.1	Seguridad.....	82
7.5.2	Selección de la ubicación para la perforación	83
7.5.3	Instalación del pozo de monitoreo.....	84
7.5.4	Desarrollo del pozo de monitoreo	86
7.6	Puntos críticos de la inspección	88
8.0	CONSTRUCCIÓN DE SONDA PARA MONITOREO DE BIOGÁS EN EL RELLENO ..	88
8.1	Construcción de una sonda para el monitoreo de gas	90
8.2	Monitoreo de biogás	92
8.3	Puntos críticos de inspección.....	93

FIGURAS

Figura 1:	Vista aérea de relleno sanitario con nueva construcción de revestimiento compuesto	9
Figura 2:	Revestimiento compuesto estándar con detalle de la capa de drenajes de la geored.....	11
Figura 3:	Revestimiento compuesto estándar con detalle de la capa granular de drenaje	11
Figura 4:	Canal de aguas pluviales a lo largo del perímetro del relleno	16
Figura 5:	Cargas paralelas en una proporción de 3:1 en una pendiente lateral	21
Figura 6:	Detalles de la unión del recubrimiento del suelo.....	23
Figura 7:	Hidratación del recubrimiento del suelo.....	24
Figura 8:	Procesamiento del suelo del recubrimiento para controlar el tamaño de terrones.....	24
Figura 9:	Compactación del recubrimiento del suelo	25
Figura 10:	Colocación de la cubierta protectora	27
Figura 11:	Calibración nuclear de densidad	29
Figura 12:	Rollos geosintéticos de recubrimiento de HDPE almacenados adecuadamente	35
Figura 13:	Subrasante preparado	36
Figura 14:	Desplazamiento de la geomembrana	37
Figura 15:	Vehículos de baja presión sobre el suelo, todo terrenos, sobre la geomembrana	38
Figura 16:	Geomembrana de soldadura de fusión	39
Figura 17:	Geomembrana de soldadura de extrusión.....	40
Figura 18:	Pruebas de presión de aire en selladuras soldadas por puntos.....	44
Figura 19:	Realización de pruebas de caja de vacío	45
Figura 20:	Pruebas destructivas	46
Figura 21:	Daño a recubrimiento de HDPE con indicador de reparación.....	48
Figura 22:	Zanja de anclaje durante excavación.....	48
Figura 23:	Zanja de anclaje rellena con suelo	49
Figura 24:	Cubierta protectora desplegada en tramos.....	50
Figura 25:	Colocación de capa de drenaje granular al final de un tramo	50
Figura 26:	Geocompuesto con geored y geotextil	54
Figura 27:	Coser geotextil	55
Figura 28:	Tuberías de recolección de lixiviados ranuradas y perforadas	56
Figura 29:	Instalación de tubería de recolección de lixiviados	57
Figura 30:	Sumidero de recolección de lixiviados.....	58
Figura 31:	Tubería de elevación para lixiviados y sistema de distribución	59
Figura 32:	Laguna revestida con aireación para el tratamiento de lixiviados	62
Figura 33:	Detalle del drenaje subterráneo para decantación	67
Figura 34:	Drenaje subterráneo para retirar aguas subterráneas	67
Figura 35:	Detalle del drenaje subterráneo con pared lateral sin cohesión y fondo cohesivo.....	68
Figura 36:	Detalle de la resistencia al levantamiento a largo plazo	69
Figura 37:	Estabilidad de levantado para elemento del sistema de recubrimiento	70
Figura 38:	Detalle de un pozo de monitoreo de aguas subterráneas común o piezómetro.	82
Figura 39:	Pozo para el monitoreo de aguas subterráneas	85
Figura 40:	Finalización del pozo de monitoreo de aguas subterráneas con recubrimiento, seguro y plancha de	

concreto	87
Figura 41: Sonda de gas en un relleno	91
Figura 42: Detalle común de una sonda para el monitoreo de gas en un relleno	92

TABLAS

Tabla 1: Construcción general de rellenos - Puntos críticos de la inspección	14
Tabla 2: Pruebas estándar en suelos para la verificación de recubrimientos para suelo in-situ	17
Tabla 3: Pruebas estándar pre-construcción en suelos	17
Tabla 4: Pruebas estándar en suelos para recubrimientos para suelo construidos	18
Tabla 5: Elementos clave para la construcción del recubrimiento del suelo	20
Tabla 6: Puntos críticos de inspección del recubrimiento del suelo	33
Tabla 7: Pruebas estándar en materiales de geomembrana de HDPE	41
Tabla 8: Puntos críticos de inspección del recubrimiento de geomembrana	51
Tabla 9: Puntos críticos de la inspección en un sistema de recolección de lixiviados	63
Tabla 10: Recubrimientos construidos por debajo del nivel freático - Puntos críticos de inspección	72
Tabla 11: Puntos críticos de la inspección en la documentación de construcción del recubrimiento	77
Tabla 12: Puntos críticos de la inspección de pozos para el monitoreo de aguas subterráneas	88
Tabla 13: Puntos críticos de inspección en la sonda de monitoreo de biogás	93

APÉNDICES

Apéndice A -	Glosario	95
Apéndice B -	Lista de referencias	99
Apéndice C -	Especificaciones de materiales para geomembrana HDPE y geored	105
Apéndice D -	Formulario para la finalización del pozo de monitoreo	109
Apéndice E -	Legislación aplicable con relación a desechos sólidos	112
Apéndice F -	Lista de verificación de auditoría/inspección	113

1.0 INTRODUCCIÓN

Este documento ha sido elaborado bajo el Acuerdo de Cooperación CCAD-USAID/CAFTA-DR, como una guía para la construcción de rellenos sanitarios. Este manual está diseñado para brindar asistencia a empresas públicas, privadas o combinadas de manejo y disposición final de desechos sólidos, así como municipalidades y para la capacitación de inspectores de salud ambiental en cuanto a las técnicas adecuadas para el diseño y construcción de nuevos rellenos sanitarios de desechos sólidos con revestimientos de geomembrana.

El propósito de este manual es enfocar el tema de rellenos sanitarios de desechos sólidos municipales y no incluye residuos peligrosos o médicos no tratados. Para el propósito de este manual, los desechos sólidos municipales son la basura que proviene del área municipal, de la comunidad, del comercio, de las instituciones, la agricultura, minería y actividades recreativas, incluyendo basura, desechos, residuos, lodos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales, de una planta de tratamiento de suministro de agua, cenizas, limpieza de calles, animales muertos, automóviles abandonados, desechos médicos tratados e inertes y demás materiales desechados incluyendo materiales sólidos, líquidos, semisólidos o algunos recipientes con materiales gaseosos.

Entre los desechos peligrosos se incluye cualquier desecho sólido que, debido a su cantidad, concentración o características físicas, químicas o infecciosas, pueda implicar un peligro sustancial presente o posterior a la salud humana o al ambiente de no tener un almacenamiento, tratamiento o disposición adecuada. O bien, aquellos materiales que ocasionen o contribuyan a incrementar la mortalidad o una enfermedad irreversible o discapacitante.

Entre los desechos peligrosos se incluye: desechos peligrosos inflamables, corrosivos, reactivos y tóxicos. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), según las enmiendas realizadas a través de la Ley para la Conservación y Recuperación de Recursos (*Resource Conservation and Recovery Act*) de 1976, Código 42 de Estados Unidos, §§6901 identifica y enumera los desechos peligrosos bajo la Ley de Disposición de Desechos Sólidos (*Solid Waste Disposal Act*). Se puede encontrar información adicional sobre desechos peligrosos en <http://www.epa.gov/osw/hazard/index.htm>

Este documento ha sido preparado como una guía general y no cumple el propósito de representar un diseño real para un relleno sanitario. Todos los aspectos relacionados con el revestimiento de desechos para el relleno sanitario, el revestimiento de geomembrana, el sistema de recolección de lixiviado, los

revestimientos para rellenos construidos por debajo de la capa freática, pozos para monitoreo de aguas subterráneas, sondas para el monitoreo del biogás y demás artículos incluidos en este manual, deben ser diseñados por un ingeniero calificado.

La Asociación de Desechos Sólidos de Norte América (Solid Waste Association of North America - SWANA-) ofrece capacitación y diplomados para el Gerente de Operaciones en Rellenos (MOLO, por sus siglas en inglés). Este curso provee un amplio estudio de operaciones eficientes relacionadas con rellenos, incluyendo diseño del sitio, cumplimiento de normativa y aspectos a tomar en cuenta durante la planificación, operación y cierre de rellenos. Se puede encontrar información adicional sobre el curso MOLO impartido por SWANA en <http://www.epa.gov/osw/hazard/index.htm>.

La organización ISWA (International Solid Waste Association) ofrece capacitación y certificaciones a través de un Programa Internacional para Gerente de Desechos. Este curso está diseñado para proporcionar un certificado reconocido a nivel internacional para gerentes profesionales en temas de manejo de desechos, en base a sus logros académicos y su experiencia de trabajo en la práctica. El certificado consta de cuatro niveles, de los cuales tres se denominan Intermedio, Avanzado e Internacional, dependiendo de los criterios que los solicitantes deseen completar ante la ISWA. Existe un cuarto nivel Preliminar que se estableció para aquellas personas que cuentan con experiencia en la práctica pero carezcan de una calificación a nivel académico. Puede encontrar información adicional sobre el Programa Internacional para Gerente de Desechos de ISWA en el siguiente enlace: <http://www.epa.gov/osw/hazard/index.htm>.

1.1 Propósito

El propósito de este manual es proveer una guía técnica y un nivel mínimo sugerido de control y verificación para la construcción de nuevos rellenos sanitarios. Esto incluye la construcción de revestimientos compuestos para rellenos, sistemas de recolección de lixiviado, pozos para el monitoreo de aguas subterráneas y pozos para el monitoreo de biogás.

Las nuevas celdas para desecho de los rellenos se construirán con un revestimiento compuesto y un sistema de recolección de lixiviados. El revestimiento compuesto deberá consistir de dos componentes: el inferior que incluye un revestimiento para el suelo y el superior, que será una geomembrana. Sobre el revestimiento compuesto se colocará un sistema de recolección de lixiviados y una cubierta protectora de suelo.



Figura 1: Vista aérea de relleno sanitario con nueva construcción de revestimiento compuesto

Este manual provee criterios para los materiales, construcción y aseguramiento o control de calidad en cuanto a diversos elementos del sistema de revestimiento, incluyendo los siguientes:

- Revestimiento para el suelo (Capítulo 2)
- Revestimiento de geomembrana (Capítulo 3)
- Capa o nivel de recolección de lixiviado (Capítulo 4)
- Revestimientos construidos por debajo del nivel freático máximo estacional (Capítulo 5)
- Documentación e informes sobre la construcción del revestimiento (Capítulo 6)
- Pozos para el monitoreo de aguas subterráneas (Capítulo 7)
- Sondas de rellenos para el monitoreo del biogás (Capítulo 8)

1.2 Componentes generales para la ubicación del relleno

Para un nuevo relleno se deben tomar en cuenta diversas condiciones físicas y sociológicas alrededor del sitio. Entre las condiciones físicas se incluyen las características naturales como la geología, hidrogeología, las aguas subterráneas, hidrología, clima, ríos y corrientes, áreas de fallas, zonas de impacto sísmico, áreas inestables y especies en peligro de extinción. Estas condiciones físicas se deben tomar en cuenta a través de un estudio de impacto ambiental del sitio propuesto para el relleno.

Los rellenos se deben construir fuera de arroyos, drenajes, lagos, estanques y demás cuerpos de agua. Se deben ubicar suficientemente lejos de estas características para evitar el lavado de los desechos sólidos durante eventos de tormentas extremas.

Los sistemas de transporte para aguas de tormentas (diques, canales, lagunas y tuberías) se deben diseñar y construir para mover el agua alrededor del relleno y evitar que entre a la celda de desechos del relleno o bien que lave los desechos. Los sistemas de drenaje, como mínimo, se deben diseñar conforme a las normas de diseño para aguas pluviales o bien conforme el evento de 25 años y 24 horas.

El agua pluvial debe dirigirse hacia el sistema de drenajes perimetral. El agua pluvial que caiga en el área activa del relleno se deberá contener con bermas ser tratados como lixiviados.

Se debe realizar un estudio de impacto ambiental del sitio propuesto para el relleno y así determinar si existe alguna restricción en cuanto a la ubicación del mismo. En este estudio debe incluirse una revisión de información publicada aunado a una investigación de campo real del sitio. Si la revisión de los datos publicados y la investigación de campo inicial no revelan ninguna restricción que impida la ubicación de un relleno sanitario en el sitio, entonces se debe conducir un estudio hidrogeológico. Esto incluiría una descripción de la geología de la región, una descripción local del material que se encuentra debajo de la base del cuerpo acuífero más bajo o bien a una profundidad de 300 metros, la que sea menor hasta la superficie, una descripción de los procesos geológicos activos en los alrededores del relleno, lo cual incluye la identificación de cualquier falla y hundimiento en el área del relleno; una descripción de los cuerpos acuíferos regionales que se encuentren en los alrededores, una caracterización de las aguas subterráneas, incluyendo la profundidad hasta las mismas, así como la dirección e índice del flujo de estas, incluyendo las propiedades geotécnicas de los materiales del subsuelo.

Entre las condiciones sociales a considerar se encuentra incluir la proximidad a escuelas, iglesias, hospitales, cementerios, cuerpos de agua, desarrollos comerciales y residenciales, pozos para el suministro de agua, pozos de producción de petróleo, gas y otros, pozos de producción mineral, tuberías, líneas para los servicios, aeropuertos, sitios arqueológicos, históricos, y con una excepcional calidad estética y acceso vial hacia las instalaciones. Estas condiciones sociales son comúnmente consideradas con el involucramiento del gobierno y la comunidad. El involucramiento público a lo largo del proceso brinda la oportunidad de determinar problemas locales y abordarlos con suficiente tiempo en el proceso de desarrollo del relleno. Se debe contactar a las entidades gubernamentales locales al inicio del proceso y durante el proceso de selección del sitio.

1.3 Componentes del revestimiento de las celdas del relleno

Se construirán nuevas celdas de disposición final en el relleno con un revestimiento compuesto y un sistema de recolección de lixiviados. El revestimiento compuesto debe incluir dos componentes, el componente inferior que consta de por lo menos una capa de suelo compactado de 60 cm con una

conductividad hidráulica menor a 1×10^{-7} cm/seg y el componente superior que consiste de revestimiento de geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) con un espesor mínimo de 60-mil (0.152 cm). El componente inferior comúnmente consiste de suelos excavados en el sitio que se colocan y compactan con maquinaria pesada. Este revestimiento se analiza para verificar la conductividad hidráulica, compactación y propiedades del suelo. El revestimiento de geomembrana se debe instalar en contacto directo y uniforme con el suelo compactado. La geomembrana viene con una superficie lisa o texturizada. La geomembrana texturizada tiene un ángulo de mayor fricción que la lisa, lo cual provee una mayor estabilidad para la masa de residuos, el revestimiento, sistema de recolección de lixiviados, capa de drenaje y cubierta protectora. Para poder determinar si se usa una geomembrana texturizada o lisa, se debe realizar, en la base del relleno, un análisis detallado de estabilidad de la masa de residuos. Esto evalúa la estabilidad de la masa de residuos en configuraciones intermedia y final del relleno. Se asume que sucederán fallas rotacionales (circulares) y de bloque (que se deslizan a lo largo de un plano definido) en el material de residuos. Estas condiciones de falla se analizan comúnmente a través de un programa de computación como STABL (<http://www.ecn.purdue.edu/STABL/>).

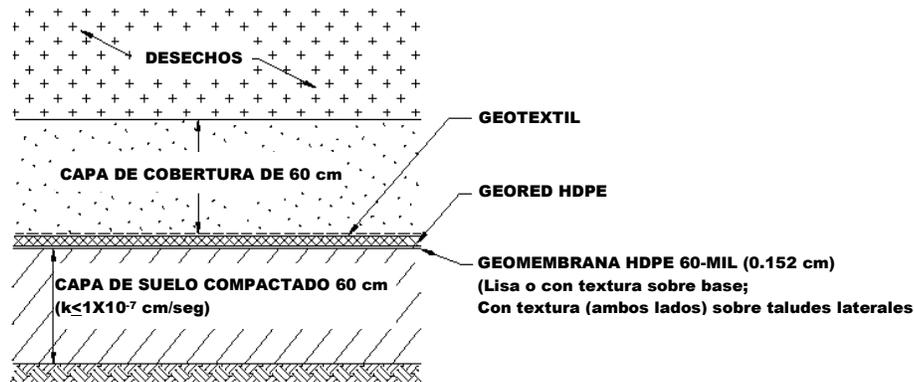


Figura 2: Revestimiento compuesto estándar con detalle de la capa de drenajes de la geored

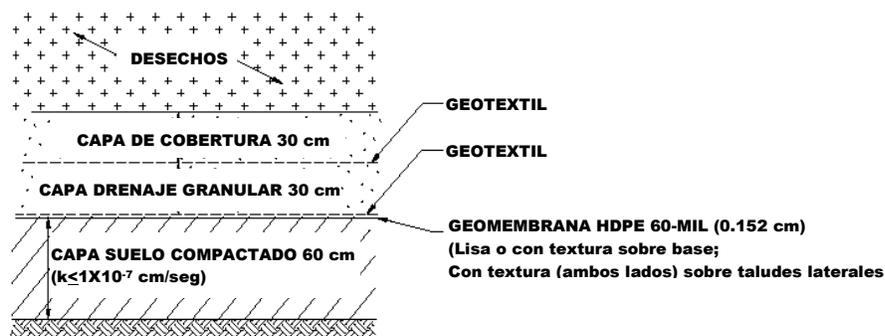


Figura 3: Revestimiento compuesto estándar con detalle de la capa granular de drenaje

1.4 Componentes del sistema de recolección de lixiviados

El propósito del sistema de recolección de lixiviados es controlar la acumulación de lixiviados en los residuos durante la operación activa y monitorear los niveles de lixiviados después de haber cerrado el sitio. El líquido que entra al relleno se convierte en lixiviado y se mueve hacia el fondo del mismo, donde se recolecta a lo largo del recubrimiento de geomembrana. El recubrimiento tiene, sobrepuesto, un sistema de recolección de lixiviados que se extiende a lo largo del fondo y las pendientes laterales de cada celda de residuos del relleno. El sistema de recolección se coloca inclinado para asegurar que los lixiviados fluyan hacia los colectores de lixiviado. El sistema de recolección de lixiviados consiste de 5 componentes principales que son:

- Capa de drenaje;
- Tubería de recolección;
- Colectores;
- Sistema de bombeo y elevación y
- Manejo de lixiviados recolectados.

La mayoría de estos componentes están hechos de cloruro de polivinilo (PVC) y de polietileno de alta densidad (HDPE). Se ha demostrado que estos materiales son excelentes para su uso en sistemas de recolección de lixiviados de rellenos sanitarios en base a su resistencia a este tipo de líquidos. Todos los agregados en los drenajes y cualquier material granular no debe tener más de 15% de carbonato de calcio para prevenir atascos. Estos materiales ayudarán a asegurar el funcionamiento adecuado del sistema de recolección de lixiviados durante la vida activa y en el período post-cierre de la planta.

El sistema de recolección de lixiviados consistirá de una capa de drenaje granular o geosintético, tubería para la recolección de lixiviados y una cubierta protectora de suelo granular. El sistema de recolección de lixiviados se encuentra sobre el sistema de recubrimiento que drena hacia el colector. Cada una de las tuberías para traslada los lixiviados al colector y a las tuberías de extracción.

La capa de drenaje geosintética consiste de una capa de geored para el drenaje y tela geotextil. La geored comúnmente se fabrica de HDPE para formar una estructura de drenajes tridimensional que reemplaza una capa para drenaje de arena o grava. La geored está cubierta con la tela geotextil para evitar que partículas del suelo obstruyan el núcleo del drenaje. Las capas separadas de tela geotextil y geored se

pueden combinar a través del uso de un producto geocompuesto (por ejemplo un compuesto de geotextil/geored o un geocompuesto de un solo lado, del lado liso de la geomembrana; un compuesto de geotextil/geored/geotextil o bien un geocompuesto de doble lado, en el lado texturizado.

1.5 Control de calidad/Aseguramiento de calidad de tiempo completo

La construcción y las pruebas que se realizan en todos los elementos del recubrimiento de la celda para desechos en el relleno se deben realizar según este manual y sus actualizaciones periódicas. Se recomienda realizar actividades de aseguramiento de calidad en la mayoría de las fases durante la construcción de un relleno. La supervisión de la construcción del recubrimiento y todas las actividades de aseguramiento de calidad las debe realizar un ingeniero graduado, con experiencia en ingeniería geotécnica, ambiental, civil y manejo de desechos sólidos. Este ingeniero tendrá su certificado. El Ingeniero o su representante se deben encontrar en el sitio durante todo el proceso de construcción y la realización de pruebas del sistema del recubrimiento. Se recomienda que el Ingeniero visite el área activa del relleno por lo menos una vez por semana, o bien con la frecuencia que considere necesario dependiendo de la experiencia de su representante, pero deberá estar presente específicamente durante la construcción de celdas, e instalación del sistema de recubrimiento y drenajes para lixiviados y aguas pluviales.

1.6 Biogás

Conforme los desechos sólidos se descomponen en el relleno, se genera un gas. El biogás consiste de aproximadamente 50 por ciento de metano (el componente primario del gas natural), alrededor de 50 por ciento de dióxido de carbono (CO₂), con pequeñas y variadas cantidades de nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, sulfuro y demás contaminantes. La gran mayoría de estos contaminantes variados son compuestos orgánicos que no provienen del metano.

El biogás presenta varias inquietudes para los operadores del relleno. El biogás es una fuente significativa de olores y puede representar una inquietud en cuanto a explosiones, debido a las altas concentraciones de metano; representa potencialmente una fuente de gases de invernadero.

El biogás se monitorea a través del uso de un sistema perimetral de monitoreo alrededor del relleno para detectar migración subterránea de biogás hacia estructuras en el sitio y fuera del mismo. Estos sistemas de monitoreo perimetral comúnmente se monitorean cada tres meses para determinar si existe presencia de metano.

Entre las medidas para el control de biogás se incluyen sistemas pasivos y activos. Un sistema pasivo incluiría chimeneas o pozos abiertos en el relleno. Estos sistemas pasivos permiten que el biogás se libere hacia la atmósfera, reduciendo y controlando así las presiones en la masa de residuos del relleno.

Un sistema activo incluye pozos, tubos colectores, quemadores, generadores de gas a energía u otros sistemas de combustión de gas para rellenos. El biogás recolectado de un sistema activo se puede redirigir a un quemador y allí ser destruido. Sin embargo, existen usos beneficiosos para este biogás. Los generadores de energía pueden ser alimentados con biogás para producir electricidad. Adicionalmente, las industrias que usan gas natural pueden reemplazarlo con biogás.

Para obtener información adicional sobre el biogás, refiérase a USEPA Landfill Methane Outreach Program [*Programa de USEPA para el Acercamiento al Uso de Metano*]<http://www.epa.gov/lmop/>.

1.7 Puntos críticos de la inspección

Tabla 1: Construcción general de rellenos - Puntos críticos de la inspección

	DESCRIPCIÓN	CUÁNDO	FRECUENCIA
1	Construcción del relleno		
1.1	Construcción del recubrimiento del suelo	En cada uno de los eventos de construcción	Por lo menos una vez por evento
1.2	Construcción del recubrimiento de la geomembrana.		
1.3	Construcción de la capa para la recolección de lixiviados.		
1.4	Recubrimiento construido por debajo de nivel freático estacional máximo.		
1.5	Documentación e informes sobre la construcción del recubrimiento		
1.6	Construcción de pozos para el monitoreo de aguas subterráneas		
1.7	Construcción de sonda para el monitoreo de biogás		
1.8	Control de calidad de la construcción de tiempo completo en el sitio		

2.0 RECUBRIMIENTOS PARA SUELO

2.1 General

Los recubrimientos para el suelo pueden consistir de 60 cm de suelo del lugar o construido. Todos los recubrimientos para el suelo deben poseer un coeficiente de permeabilidad no mayor de 1×10^{-7} cm/seg, un límite líquido (LL) no menor de 30 y un índice de plasticidad (IP) no menor de 15. El porcentaje de finos del suelo que pasan por el colador de 0.75 mm debe ser de por lo menos el 30%. Todo el material del suelo debe pasar el colador de una pulgada y no debe contener rocas o piedras que equivalgan a más del 10% de peso. El espesor mínimo para cualquier recubrimiento de suelo es de 60 cm para un revestimiento compuesto.

El primer paso en la construcción de un recubrimiento para el suelo es precalificar los materiales del suelo que se han seleccionado para la construcción del recubrimiento. El material del recubrimiento para el suelo puede ser estratos de suelo encontrados in situ o bien suelos que se hayan excavado durante la construcción de celdas o de una fuente seleccionada específica. Los suelos encontrados in-situ se pueden dejar usar como material para el recubrimiento, si se ha verificado el tipo de material y la subrasante se ha preparado en forma adecuada (referirse a la Sección 2.2).

Se debe seguir la secuencia del desarrollo del relleno de tal forma que la cobertura del recubrimiento se desarrolle para minimizar la migración de contaminantes más allá de los límites de la construcción durante el llenado, maximizando así la vida operativa del sitio.

Se recomienda ejecutar aseguramiento de calidad y pruebas de control de calidad a tiempo completo durante la construcción del recubrimiento de las celdas de disposición final del relleno.

2.1.1 Control del agua de tormentas durante la construcción de recubrimiento

El control de flujo de aguas pluviales hacia el recubrimiento del relleno, tanto durante como posterior a la construcción, es sumamente importante.

Los sistemas de transporte de aguas de pluviales (diques, canales, lagunas y tuberías) se deben diseñar y construir para transportar el agua alrededor del área del recubrimiento del relleno y evitar así que las aguas pluviales ingresen al área de recubrimiento del relleno.

Las aguas pluviales que se encuentren en el relleno se deben dirigir alrededor del área del recubrimiento del mismo. Las aguas pluviales que se acumulen en el recubrimiento del relleno se deben remover tan pronto como sea prácticamente posible a través del flujo gravitacional o por medio del uso de bombas. De no ser posible drenar el área del recubrimiento del relleno a través del flujo gravitacional, las bombas se deben mantener en el sitio durante la construcción para poder realizar la eliminación de agua con prontitud.



Figura 4: Canal de aguas pluviales a lo largo del perímetro del relleno

2.2 Requerimientos de materiales in-situ para el recubrimiento del suelo

Los suelos in-situ se pueden utilizar como material para recubrimiento si cumplen con los requerimientos generales de un recubrimiento para el suelo:

- Espesor mínimo de 60 cm
- Coeficiente de permeabilidad de no más de 1×10^{-7} cm/seg
- Límite de líquidos (LL) no menor de 30
- Índice de plasticidad (IP) no menor de 15 y
- El porcentaje de finos del suelo que pasan por el colador de 0.75 mm debe ser de por lo menos el 30%. Todo el material del suelo debe pasar el colador de una pulgada y no debe contener rocas o piedras que equivalgan a más del 10% de peso.

La verificación de materiales in-situ y la preparación de la subrasante se incluyen en la Sección 2.5.3, Verificación de materiales in-situ y preparación de la subrasante

Tabla 2: Pruebas estándar en suelos para la verificación de recubrimientos para suelo in-situ

CATEGORÍA DE PRUEBA DE SUELO	TIPO DE PRUEBA	MÉTODO ESTÁNDAR DE PRUEBA	FRECUENCIA DE PRUEBA
Recubrimientos in situ para suelo	Colador (Gradación)	ASTM D 422 o D 1140	1/5000 m ² por 15 cm de espesor del recubrimiento
	Límites de Atterberg	ASTM D 4318	
	Coefficiente de permeabilidad	ASTM D 5084 o CoE EM1110-2-1906 (laboratorio) o Permeámetro con entrada de aire (campo)	
	Espesor	Topógrafo registrado	1/500 m ²

Notas:*Referirse al Apéndice B para referencias de todos los métodos de prueba estándar

2.3 Requerimientos de materiales para el recubrimiento del suelo

Según los estándares, las muestras representativas de suelos a utilizar como recubrimiento se deben verificar inicialmente en un laboratorio geotécnico para asegurar que cumplan con los siguientes requerimientos mínimos.

- Análisis granulométrico - ASTM D 422 o ASTM D 1140 - Por lo menos el 30% pasan por el colador de malla de 0.075mm.
- Límites de Atterberg - ASTM D 4318 - Límite líquido (LL) de no menos de 30 e Índice de Plasticidad (IP) de no menos de 15.
- Coeficiente de Permeabilidad - Apéndice VII del Manual del Cuerpo de Ingenieros EM 1110-2-1906 o ASTM D 5084 - 1×10^{-7} cm/seg o menos.

Se requerirá de la realización de pruebas iniciales de suelos adicionales si hubiera un cambio en los materiales o bien en el banco de préstamo de material. La tabla 3 enumera las pruebas requeridas para el control de calidad, así como los requerimientos mínimos.

Tabla 3: Pruebas estándar pre-construcción en suelos

CATEGORÍA DE PRUEBA DE SUELO	TIPO DE PRUEBA	MÉTODO ESTÁNDAR DE PRUEBA	FRECUENCIA DE PRUEBA
Prueba de control de calidad para materiales de préstamo	Relación entre humedad y densidad	ASTM D 698 o D 1557	Una vez por tipo de suelo
	Colador (Gradación)	ASTM D 422 o D 1140	
	Límites de Atterberg	ASTM D 4318	
	Coefficiente de permeabilidad	ASTM D 5084 o CoE EM1110-2-1906	1/Relación humedad/densidad

2.3.1 Suelos para recubrimientos construidos

La tabla 4 enumera las pruebas requeridas para el control de calidad, así como los requerimientos mínimos para los recubrimientos de suelo construidos.

Tabla 4: Pruebas estándar en suelos para recubrimientos para suelo construidos

CATEGORÍA DE PRUEBA DE SUELO	TIPO DE PRUEBA	MÉTODO ESTÁNDAR DE PRUEBA	FRECUENCIA DE PRUEBA
Recubrimiento de suelo construido	Densidad del campo	ASTM D 1556, D 2167 o D 2922	1/700 m ² por 15 cm tongada paralela ^A ; 1/30 metros lineales por 30 cm de recubrimiento de pared lateral (tongadas horizontales) ^A
	Colador (Gradación)	ASTM D 422 o D 1140	1/9,000 m ² por 15 cm de tongada paralela ^A ; 1/600 m lineales por 30 cm de recubrimiento de pared lateral (tongada horizontal) ^A
	Límites de Atterberg	ASTM D 4318	
	Coefficiente de permeabilidad	ASTM D 5084 o CoE EM1110-2-1906 (laboratorio) o Permeámetro con entrada de aire (campo)	
	Espesor	Topógrafo registrado	1/450 m ² (tongadas paralelas) ^A ; 15-m secciones cruzadas (recubrimientos para pared lateral de tongada horizontal) ^A

Notas:

A - Se debe realizar como mínimo una de cada una de las pruebas indicadas para el espesor del recubrimiento de cada unidad, según se indica, sin importar el área o longitud del recubrimiento.

2.3.1.1 Prueba de humedad/densidad (H/D)

Además de los requerimientos mínimos de pruebas que se muestran en la Tabla 3, se debe determinar la relación entre humedad/densidad por cada material de relleno de suelo a utilizarse en la construcción del recubrimiento del suelo. La curva de compactación de humedad/densidad (H/D) debe incluir una línea de cero espacios de aire en base a la gravedad específica medida o estimada en el suelo compactado. Los dos procedimientos estándar aceptables en cuanto a prueba de relación entre humedad/densidad son los siguientes:

- ASTM D 698 (Proctor estándar) -- 600 kN-m/m³¹ (para equipo liviano) o
- ASTM D 1557 (Proctor modificado) -- 2,700 kN-m/m³¹ (para equipo pesado)

Para poder determinar si el suelo propuesto es adecuado para su uso como material de recubrimiento, se deben conducir pruebas de permeabilidad en muestras compactadas a través de los procedimientos de

¹Los valores de energía asignados a cada uno de estos dos métodos de prueba son esfuerzos de compactación usados en el laboratorio de suelos para compactar cada espécimen de prueba y deben ser comparables a la capacidad de compactación del equipo usado para construir el recubrimiento del suelo.

prueba de esfuerzo de compactación descritos anteriormente. Estos suelos deben prepararse y verificarse según se indica a continuación.

2.3.1.2 Pruebas sobre el coeficiente de permeabilidad

Una vez determinadas las relaciones entre contenido/densidad en uno o más esfuerzos de compactación, se debe compactar una muestra de suelo a aproximadamente 95% de la densidad máxima en seco, con el contenido óptimo de humedad, por medio del uso de ASTM D 698 o a aproximadamente 90% de la densidad máxima en seco a un contenido de humedad 1% más seco que el óptimo en el que se usa el ASTM D 1557. Posteriormente se debe realizar una prueba apropiada de coeficiente de permeabilidad sobre la muestra. Antes de que el material se considere apropiado para la construcción de recubrimiento, se debe demostrar el coeficiente de permeabilidad máximo aceptable de 1×10^{-7} cm/seg en cualquier muestra de suelo.

Una vez demostrado el coeficiente de permeabilidad aceptable a través de pruebas, el porcentaje de compactación y el contenido de humedad de la muestra para demostración se convierte en el estándar mínimo a usar en el control de campo (sin embargo, los estándares mínimos no deben ser inferiores al 95% de compactación a una humedad óptima usando el ASTM 698 o 90% de compactación en un contenido de humedad de 1% usando el ASTM 1557.

El fluido para verificar la permeabilidad debe ser: agua del grifo, una solución de sulfato de calcio de 0.005N o bien agua freática de la perforación de prueba de donde se tomaron las muestras de suelo. El agua destilada o desionizada no es aceptable como fluido permeante y no se debe utilizar.

Tanto los métodos de prueba, como todos los cálculos de la información de prueba se deben proveer a través del reporte de evaluación del recubrimiento. Cualquier desviación de los métodos mencionados a continuación se debe justificar ampliamente, explicar y documentar en el reporte de evaluación del recubrimiento.

Los dos métodos aceptables para realizar pruebas de laboratorio para determinar el coeficiente de permeabilidad son los siguientes:

- Prueba de permeabilidad de carga variable -- ASTM D 5084.
- Prueba de permeabilidad de carga constante -- ASTM D 5084.

2.4 Requerimientos para la construcción de recubrimiento para el suelo

Los elementos clave para la construcción del recubrimiento del suelo son los siguientes:

Tabla 5: Elementos clave para la construcción del recubrimiento del suelo

Elemento clave	Por qué
Fuerte control de calidad	Para asegurar que tanto los materiales, como la construcción se realicen de acuerdo con los planos, normativa y autorización de construcción.
Selección adecuada del suelo	El suelo debe cumplir con las especificaciones de permeabilidad, límite de líquido, índice de plasticidad, porcentaje de materiales finos del suelo y contenido de piedras.
Control de humedad	Disminuir la permeabilidad y controlar el agrietamiento por desecación de las arcillas de alta plasticidad utilizadas frecuentemente para suelo de recubrimiento.
Grado de compactación	Asegurar que el suelo se compacte adecuadamente para que cumpla con los requerimientos de permeabilidad.
Tipo y peso del equipo de compactación	Para alcanzar la densidad, adecuar la adherencia y la reducción del tamaño de terrones.
Espesor del relleno	Penetración total a través del relleno suelto que se encuentra debajo de la compactación y sobre el relleno previamente compactado.
Tamaño de los terrones	Para reducir las vías de filtración
Adhesión de la interface de levante	Para reducir las vías de filtración
Proteger el recubrimiento de la desecación.	La desecación ocasiona agrietamiento en el suelo del recubrimiento.
Protección del agua estancada	La saturación completa de cualquier porción del recubrimiento y su cubierta protectora compromete su integridad estructural e incrementa el grado de agrietamiento en el caso de secarse.
Mantenimiento a conciencia después de finalizado el recubrimiento	Para evitar la desecación, el surcamiento, la erosión y la acumulación de sedimentos en el recubrimiento.

2.4.1 Generalidades

Los recubrimientos en pendientes laterales con un ángulo de inclinación mayor de 3:1 (3 horizontal a 1 vertical) no se deben construir en cargas paralelas debido a la ausencia inherente de estabilidad del equipo de compactación sobre estas pendientes inclinadas y también debido a la ineficiencia de la compactación.

Los recubrimientos de paredes laterales se deben construir con rellenos horizontales.



Figura 5: Cargas paralelas en una proporción de 3:1 en una pendiente lateral

La ubicación de recubrimientos construidos (de material tipo arcilla) se debe realizar de acuerdo con los siguientes aspectos:

- Todas las áreas de superficie de subrasante se deben escarificar a un mínimo de 5 cm y se deben preparar para recibir el recubrimiento.
- La parte superior de cada capa debe quedar levemente rugosa antes de colocar la siguiente carga de suelo para compactación.
- Ningún relleno suelto debe tener un espesor mayor que la huella de la compactadora de tal forma que se realice una adhesión completa con la parte superior del relleno previo.
- Las limitaciones de equipo y de seguridad prohíben niveles de terreno terminado con inclinaciones superiores a 3:1 si el recubrimiento está construido en forma paralela a la superficie. En el caso de una pendiente excavada con inclinaciones laterales mayores de 3:1, el recubrimiento de las paredes laterales se debe construir con cargas sucesivas en forma horizontal.
- Los rellenos horizontales se deben construir lo suficientemente anchos para permitir que el equipo de construcción pueda colocar, atravesar, acondicionar la humedad, compactar y nivelar el relleno al mismo tiempo que mantiene un espesor mínimo en el recubrimiento de 60 cm perpendiculares a la cara del recubrimiento.

- La superficie superior del recubrimiento de suelo terminado se debe verificar con un rodillo de ruedas lisas antes de la evaluación final del espesor del recubrimiento y antes de la colocación del recubrimiento de geomembrana.
- La superficie de un recubrimiento para suelo se debe compactar con apisonadora después de 24 horas de finalizada la construcción para mitigar los efectos de la desecación.

2.4.2 Recubrimientos de suelo construidos

Los recubrimientos de suelo construidos podrían consistir de suelos in-situ sobre-excavados y recompactados y/o suelos de material de relleno, ya sea en el sitio o fuera del mismo.

Los recubrimientos del suelo se construirán de forma expedita. Cualquier prolongamiento en la programación o demoras en la construcción del recubrimiento del suelo, tales como construcciones típicas de celdas, demoras debido al mal clima, problemas del contratista, etc., se explicarán en el reporte de evaluación de recubrimiento.

2.4.2.1 Encaje del recubrimiento

Al llenar una celda de desechos de un relleno con vista a futuras celdas, los primeros seis (6) metros del recubrimiento no deben recibir desechos para facilitar el encaje con el siguiente segmento del recubrimiento. Los recubrimientos continuos no se deben construir «empalmando» todo el espesor de un nuevo segmento de recubrimiento seguido de la sección de recubrimiento previamente construida. Los encajes de recubrimiento se deben realizar a través de uno de los siguientes métodos:

- La orilla de la sección antigua de recubrimiento se termina en una pendiente de tal forma que toda la orilla del recubrimiento existente esté unida a la nueva construcción sin juntas de construcción que estén sobrepuestas (Figura 6).
- La orilla de la sección antigua de recubrimiento se termina en capas escalonadas para que el espesor de cada unidad del recubrimiento existente esté unido a la nueva construcción sin juntas de construcción sobrepuestas. La longitud del área de unión debe ser de por lo menos 5 metros por metro de espesor del recubrimiento (Figura 6).

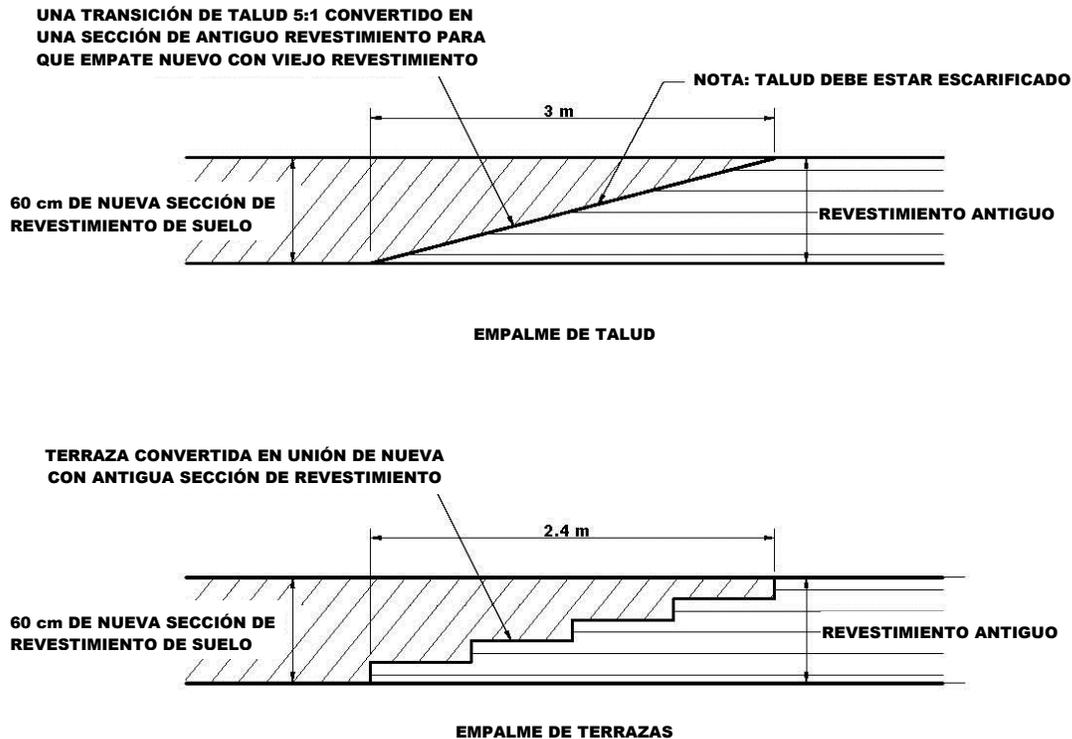


Figura 6: Detalles de la unión del recubrimiento del suelo

2.4.2.2 Hidratación del suelo del recubrimiento

No podemos dejar de enfatizar la importancia de utilizar el método adecuado para agregar agua al suelo del recubrimiento. Debido a su naturaleza cohesiva, algunos suelos arcillosos son difíciles de hidratar hasta alcanzar el contenido de humedad requerido para la compactación. Por lo tanto, antes de agregar el agua, se debe completar la reducción de tamaño de los terrones pasándolos por discos, pulverizando, posiblemente a través de filtros, etc. (Se recomienda realizar un mínimo de cinco pasadas de disco o bien tres de pulverizadora en ángulos derechos alternados, en donde el suelo lo permita, para su procesamiento. Adicionalmente se deben pasar los discos de ser necesario para romper y mezclar profundamente el suelo del recubrimiento antes de la compactación.) Se agrega agua, entonces el suelo se mezcla a profundidad y se debe acumular de ser necesario para permitir el tiempo adecuado (usualmente durante la noche o más) para hidratar. A mayor grado de plasticidad del suelo, más tiempo tomará el proceso de mezcla e hidratación. El agua a utilizar para la hidratación de los suelos del recubrimiento deberá estar limpia y no deberá haber tenido contacto con desechos o bien con materiales contaminados (ver Figura 7).



Figura 7: Hidratación del recubrimiento del suelo

2.4.2.3 Tamaño del terrón y de las rocas

Los terrones del suelo se deberán reducir al menor tamaño necesario para alcanzar su coeficiente de permeabilidad reportado por el laboratorio de pruebas y para poder destruir cualquier evidencia de macroestructura después de la compactación de terrones bajo condiciones de densidad controlada (ver Figura 8).



Figura 8: Procesamiento del suelo del recubrimiento para controlar el tamaño de terrones

El material del suelo del recubrimiento no debe incluir rocas o piedras mayores de 25 mm de diámetro o que impliquen un total de más del 10% en peso. Cien por ciento del material usado para el recubrimiento del suelo debe pasar el filtro de 25 mm. La carga final para revestimientos compuestos no debe contener ninguna roca o cualquier otro material que pueda ocasionar daño a la geomembrana.

2.4.2.4 Esfuerzo de compactación (Compactación de suelos)

Todos los recubrimientos de suelo construidos deben compactarse con un compactador neumático (de preferencia) o bien con un apisonador (pata de cabra). Ningún otro equipo es adecuado para la compactación de recubrimientos de suelo construidos. El espesor del relleno se debe controlar para que haya una penetración total a través del relleno suelto que se está compactando sobre el relleno compactado previamente; por lo tanto, el espesor del relleno compactado no debe ser mayor que la longitud del compactador neumático o que el apisonador. Esto es necesario para alcanzar una adherencia adecuada entre las cargas y reducir las vías de filtración.

Se debe contar con dispositivos de limpieza y mantenimiento adecuados en el rodillo de la compactadora, de tal forma que la compactadora neumática o apisonadora no se atasque con las arcillas del suelo al punto que no logren una penetración completa durante la compactación inicial. Se necesita una apisonadora de pata de cabra para lograr la adherencia, reducir los terrones individuales y lograr una mezcla de la matriz del suelo a través de su acción amasadora.



Figura 9: Compactación del recubrimiento del suelo

Además de su acción amasadora, el peso del equipo de compactación es muy importante. Al usar el método de prueba D 698 ASTM (Estándar de Proctor), el peso mínimo de la compactadora debe ser 2230 kilogramos por metro lineal de ancho del tambor, se recomienda un mínimo de ocho pasadas para el proceso de compactación. El equipo de compactación que desarrolla un esfuerzo de compactación equivalente al ASTM D 1557 (Proctor Modificado) realizará una mayor compactación, tendrá un menor coeficiente de permeabilidad debido a la disminución de espacios vacíos y un menor contenido óptimo de humedad necesario para lograr la máxima densidad seca. Este menor contenido óptimo de humedad

puede ayudar a controlar el agrietamiento por desecación de las arcillas de alta plasticidad utilizadas con frecuencia para el suelo del recubrimiento.

2.4.2.5 Plasticidad del suelo

Se debe adherir y mantener el control de calidad de la plasticidad del suelo durante la selección de materiales para la construcción del recubrimiento. Las pruebas de los límites de Atterberg y la gradación se deberán realizar continuamente, de tal forma que se pueda detectar cualquier cambio en las propiedades físicas y por consiguiente se puedan realizar las pruebas de laboratorio indicadas. En cualquier momento que se detecten cambios en el límite de líquido o bien en el índice de plasticidad por más de 10 puntos, se deberá realizar una nueva serie de compactación en el laboratorio para determinar la densidad seca máxima, la humedad óptima y el coeficiente de permeabilidad de laboratorio. Para poder determinar adecuadamente la variabilidad del suelo utilizado para la construcción del recubrimiento, se recomienda fuertemente realizar pruebas exhaustivas a los materiales de relleno para el suelo del recubrimiento antes de su uso para establecer sus límites Atterberg y sus parámetros de compactación. Esto podría requerir la perforación de hoyos auger en el material de relleno para obtener muestras adecuadas y determinar estos factores.

Debido a las características de contracción/expansión y de agrietamiento por desecación en las arcillas de alta plasticidad, se sugiere que, siempre que sea posible, se limite el índice de plasticidad para suelos de recubrimiento de arcilla entre 15 a 30.

2.4.2.6 Protección del recubrimiento

Los recubrimientos construidos y probados deben contar con suficientes controles de drenaje en la superficie para evitar la acumulación de agua contaminada y no contaminada. El agua externa al área recubierta se debe redirigir y alejar del área recubierta a través de canales de desviación o diques. Toda agua estancada que se acumule en las superficies del recubrimiento construido recientemente se debe remover pronta y adecuadamente. Las áreas en donde se observe agua estancada se debe volver a nivelar para asegurar un flujo adecuado en los drenajes. La superficie del recubrimiento de suelo ya completado se debe cuidar de la humedad antes de la colocación de la geomembrana u otros materiales sobrepuestos para reducir el agrietamiento por compactación; la saturación de estos suelos a través del estancamiento del agua no es una práctica aceptable. La saturación completa de cualquier porción del recubrimiento y su cubierta protectora compromete su integridad estructural y acelera e incrementa el grado de agrietamiento por compactación en el caso de secarse.

Si el recubrimiento del suelo no estará cubierto por geomembrana el tiempo suficiente y existe la posibilidad de generar desecación u otro daño (generalmente por dos (2) o más semanas) se puede aplicar

una capa de suelo temporal de 30 cm. Esta capa temporal se debe construir con suelos de recubrimiento para recubrir las condiciones de la construcción. La capa temporal se debe eliminar antes de la colocación de la geomembrana.

2.4.2.7 Cubierta protectora

Una cubierta protectora sobre el sistema de recolección de lixiviados y el sistema de eliminación en general debe contar con permeabilidades equivalentes o mayores de 10^{-4} centímetros por segundo, o bien se deben incluir pasajes apropiados para la humedad, como chimeneas, para permitir que los lixiviados se drenen efectivamente hacia el sistema de recolección de lixiviados. El espesor mínimo de la cubierta protectora es el siguiente:

- Debe existir como mínimo una cubierta de 60 cm entre una geomembrana y los desechos. Parte de esta separación puede ser proporcionada por un sistema de recolección de lixiviados y de eliminación adaptable.
- Debe existir como mínimo una cubierta de 30 cm entre las tuberías de recolección de lixiviados y los desechos.



Figura 10: Colocación de la cubierta protectora

2.5 Aseguramiento de calidad y frecuencia para realizar pruebas del recubrimiento del suelo

Cada pared lateral de recubrimiento construido y área de suelo desarrollada como un segmento separado (no monolíticamente) se debe considerar como áreas que se evalúan independientemente para efectos de calcular las dimensiones para determinar el número requerido de muestras. Esas paredes laterales o bien áreas de suelo construidas o excavadas como un contenedor (monolíticamente) se pueden sumar para la determinación de la frecuencia de realización de pruebas y las ubicaciones.

Todos los hoyos excavados o creados durante cualquiera de los muestreos y/o pruebas realizadas se deben rellenar con una mezcla de suelo de recubrimiento enriquecido por lo menos en un 20% con bentonita y compactado por medio de apisonamiento manual o rellenado con una apropiada mezcla para juntas con bentonita.

2.5.1 Recubrimientos de suelo construidos

A continuación se trata el tema de pruebas de aseguramiento de calidad y frecuencia para la realización de estas pruebas. La tabla 4 provee una referencia rápida para los tipos de pruebas, métodos de prueba estándar y la frecuencia con que se deben realizar dichas pruebas. Las evaluaciones para el recubrimiento de paredes laterales para cargas construidas en paralelo a la superficie de la excavación se evaluarán utilizando los mismos criterios y tiempos de pruebas que se muestran a continuación.

Las evaluaciones para el recubrimiento de paredes laterales para cargas construidas horizontalmente se pueden realizar en una frecuencia que no exceda 30 cm en espesor (es decir, 2 cargas). Las ubicaciones de las prueba para la verificación de la densidad del campo no deben exceder 30 metros lineales y se deben ubicar dentro del metro más cercano al a pared protegida.

La práctica usual para la realización de muestras de laboratorio en control de calidad de recubrimiento construido es recuperar muestras representativas del tubo de muestreo y/o conducir pruebas de la permeabilidad del campo. La ubicación del muestreo/la realización de pruebas debe ser adyacente a una prueba de densidad/humedad de campo para comparar los resultados de campo y de laboratorio.

2.5.1.1 Densidades de campo y contenido de humedad

Todas las densidades de campo y los contenidos de humedad se deben comparar con los límites especificados a continuación y con la curva indicada, ASTM D 698 o ASTM D 1557 para determinar el material de relleno de suelo correspondiente y considerarlo como adecuado. Las especificaciones de campo adecuadas para la relación de compactación humedad/densidad ASTM D 698 tienen por lo menos 95% de densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo o superior. Las especificaciones adecuadas para la relación de compactación de humedad/densidad ASTM D 1557 tienen por lo menos 90% de densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo de 1% más seco que el óptimo. Tanto para ASTM D 698 como para D 1557, el contenido de humedad no debe exceder un valor máximo que es regido por los requerimientos de resistencia al corte y la necesidad de minimizar la posibilidad de surcamientos debajo del equipo de construcción o desecación al secarse.



Figura 11: Calibración nuclear de densidad

Un calibrador nuclear de densidad (como el que se muestra anteriormente) puede llegar a costar aproximadamente US\$8,000. Sin embargo, en los métodos de pruebas mencionados se incluyen métodos manuales. El equipo para estos métodos (cilindros actuadores, hornos, balanzas y demás) representan costos en el rango de US\$200, más costos adicionales de envío y laboratorio.

Como una alternativa a lo anterior, se puede usar como base la «línea de los óptimos» (descrita por Benson et al [1991]) como criterios de aceptación. Con este procedimiento alterno, 80% de las densidades del campo se deben ubicar en o sobre la línea de los óptimos. La línea de los óptimos, según la describe Benson et al, es esencialmente una línea que se traza en los puntos que corresponden al contenido óptimo de humedad/densidad máxima seca en las curvas de relación de humedad/densidad en la prueba Proctor modificada, la prueba Proctor estándar y como tercera prueba de compactación, se usa una energía reducida de la prueba estándar de Proctor. (Benson et al ha demostrado que los recubrimientos de suelo compactados que tienen aproximadamente 80% o más de los puntos de datos en densidad de campo sobre la línea de los óptimos tienen una probabilidad significativamente más alta de alcanzar el estándar de permeabilidad 1×10^{-7} cm/seg que los recubrimientos construidos sobre la base de porcentaje de compactación convencional). Si se utiliza este procedimiento, los puntos de densidad de campo que no se encuentren sobre la línea de los óptimos no se deben concentrar en una carga o sección específica de la misma.

Las secciones de recubrimiento de suelos compactados que no pasen tanto los requerimientos de densidad como de humedad se deben trabajar de nuevo y volver a verificar hasta que la sección en cuestión pase las pruebas. Todos los resultados de las pruebas de densidad de campo se deben reportar en el informe de evaluación de recubrimiento, tanto si tienen valores que pasan o no la prueba. Las frecuencias de pruebas difieren para los dos métodos de colocación de carga que se muestran a continuación:

- Carga paralela - una prueba por cada 750 metros cuadrados de área de superficie por carga (pero no menos de 3 pruebas de densidad por 15 cm de carga).
- Carga horizontal - una por cada 30 metros lineales por cada 30 cm de espesor.

2.5.1.2 Análisis granulométrico

Se debe tomar un mínimo de una muestra de prueba cada 10000 metros cuadrados de área de superficie por carga, o fracción mayor de la misma, pero no menos que una por cada 15 cm de recubrimiento de carga paralela o bien una prueba por cada 600 metros lineales por 30 cm de espesor horizontal del recubrimiento.

2.5.1.3 Límites de Atterberg

Utilice la misma frecuencia para la realización de pruebas que para el análisis granulométrico. Si el límite de líquido o bien el índice de plasticidad varían en más de 10 puntos al compararlos con la curva indicada de humedad/densidad para dicho material de relleno para el suelo, entonces el suelo se considera como un material de relleno para suelo separado y se debe realizar una nueva serie de pruebas, incluyendo la de humedad/densidad, relación de compactación, análisis granulométrico y coeficiente de permeabilidad; estos resultados se deben utilizar para el control de construcción en el campo.

2.5.1.4 Coeficiente de permeabilidad

Para realizar las pruebas de campo o la prueba de laboratorio de permeabilidad, utilice la misma frecuencia que para el análisis granulométrico.

2.5.2 Verificación de espesor

El espesor de los recubrimientos de suelo construidos será determinado solamente por medio de métodos de inspección con instrumentos. Se debe realizar como mínimo un punto de verificación por cada 500 metros cuadrados de área de superficie. Si el área evaluada es menor a 500 metros cuadrados, se requieren como mínimo dos puntos de referencia para verificación. Las ubicaciones de referencia se deben anotar en un dibujo del área evaluada. Todos los cálculos de elevaciones necesarios para la

determinación del espesor se adjuntarán como parte de la documentación de apoyo para el informe de evaluación de recubrimiento, incluyendo cualquier corrección necesaria para la medición del espesor real en forma perpendicular a las paredes laterales. De ser apropiado, se deben proveer secciones cruzadas a un espaciamiento aproximado de 30 metros que muestren un verdadero espesor de cobertura para los recubrimientos de las paredes laterales construidas con cargas horizontales.

2.5.3 Verificación de materiales in-situ y preparación de subrasante

En la siguiente sección se describe la verificación de materiales in-situ y la preparación de la subrasante de geomembrana.

Después de excavar el fondo y los lados de cada celda según sus grados de diseño, el profesional de aseguramiento de calidad deberá inspeccionar la superficie expuesta de los materiales in-situ para determinar visualmente qué áreas no cumplen con los requerimientos del recubrimiento del suelo. La inspección visual deberá cubrir todas las áreas alineadas. Asimismo, esta inspección debe incluir la observación del equipo pesado, como camiones o cargadores, al aplanar la superficie en los grados determinados. Si se observa una fractura o falla mayor, las pendientes de excavación y la base del área fracturada o bien donde se encuentra la falla será mapeada completamente por un geólogo bajo la dirección del Ingeniero Certificador.

La presencia de fracturas estructurales mayores, juntas, planos de estratificación, materiales no apropiados y demás características primarias y/o secundarias que puedan afectar adversamente la calidad del recubrimiento se abordarán al excavar nuevamente el área en cuestión a una profundidad mínima en el recubrimiento del suelo y alineado según los requerimientos para recubrimientos de suelo construidos. Entre los materiales no adecuados se incluyen, pero no se limitan a áreas blandas, que ceden ante la presión, materiales mojados, saturados, materiales nocivos, suelos con manchas de petróleo, aceite de petróleo y materiales orgánicos. Las áreas no adecuadas ubicadas debajo del recubrimiento se deberán excavar y reemplazar con materiales adecuados de recubrimiento de suelo y se deberán compactar por lo menos con una densidad de 95% de Proctor estándar. Si se observan aguas subterráneas, se deberán utilizar las medidas apropiadas que se indican en la Sección 5.0. El profesional de Aseguramiento de calidad deberá documentar y reportar todas las observaciones visuales en el Reporte de evaluación de recubrimiento.

El contratista deberá tener el cuidado necesario durante los trabajos de excavación de no dañar la integridad del material de recubrimiento in-situ. Si existen áreas consideradas no aceptables debido a daños realizados por el contratista, observación visual o mapeo, dichas áreas con fallas serán excavadas

nuevamente y se preparará la subrasante o cobertura según los requerimientos para el recubrimiento de suelo construido.

Se realizarán pruebas en las áreas de recubrimiento in-situ según la Tabla 2, Pruebas estándar en suelos para la verificación de recubrimientos para suelo in-situ. Las áreas que no pasen el procedimiento de verificación se alinearán con 60 cm de recubrimiento de suelo construido.

Una vez llegue la excavación al grado, se realizará una prueba y verificación en los 60 cm superiores según lo indicado en la Tabla 2. Después de haber realizado pruebas en todas las áreas de recubrimiento in-situ y de que las pruebas hayan sido superadas, se puede escarificar y recompactar los 15 cm superiores para preparar la subrasante de recubrimiento de membrana flexible. El personal de aseguramiento de calidad deberá realizar observaciones visuales de los 15 cm superiores del material in-situ para determinar si es aceptable al momento de escarificación y recompactación.

La preparación de toda la subrasante tendrá inspecciones continuas en el sitio realizadas por el profesional de aseguramiento de calidad o bien su representante durante la construcción. Todo el muestreo y las pruebas de campo, tanto durante la construcción como después de finalizada la preparación de subrasante será realizado por el representante de aseguramiento de calidad. El recubrimiento de geomembrana se colocará directamente sobre la subrasante del recubrimiento in-situ recompactado. Los siguientes procedimientos se utilizarán para recompactar los 15 cm de subrasante de recubrimiento in-situ.

1. La superficie de recubrimiento in-situ se escarificará a una profundidad mínima de 15 cm y luego se compactará nuevamente a un mínimo del 95% de Proctor estándar a un contenido de humedad según se estableció durante las pruebas previas a la construcción.
2. Las áreas en las que se colocará el recubrimiento de geomembrana deberán entonces apisonarse hasta que queden relativamente lisas y parejas, sin surcos, vacíos, rocas, grietas por desecación y demás características que puedan afectar la integridad del recubrimiento de geomembrana que se colocará encima. Un evaluador evaluará la superficie recompactada antes de la instalación del recubrimiento de geomembrana y verificará que el recubrimiento se encuentre a los grados correctos; asimismo documentará lo anterior en el Reporte de evaluación de recubrimiento. Antes de la instalación de la geomembrana, el profesional a cargo de aseguramiento de calidad y el instalador de la geomembrana deberán determinar si las condiciones y grados de la subrasante recompactada son las apropiadas para la instalación del recubrimiento de geomembrana.

2.6 Puntos críticos de inspección

Tabla 6: Puntos críticos de inspección del recubrimiento del suelo

NO.	DESCRIPCIÓN	CUÁNDO	FRECUENCIA
2	Recubrimiento del suelo		
2.1	La construcción del recubrimiento del suelo cuenta con un monitoreo a tiempo completo de la construcción en aspectos de aseguramiento y control de calidad.	En cada uno de los eventos de construcción	Por lo menos una vez por evento
2.2	Uniones del recubrimiento a celda de desechos recubierta ya existente	Durante la construcción de la unión a celda de desechos recubierta ya existente	2 semanas
2.3	Pruebas a los materiales del suelo previo a la construcción	Antes de empezar la construcción del recubrimiento del suelo	Una vez por evento
2.4	El suelo cumple con las especificaciones de los materiales del recubrimiento	Antes de empezar la construcción del recubrimiento del suelo	Una vez por evento
2.5	Equipo de compactación y esfuerzo adecuados	Primer día de la construcción de recubrimiento del suelo	Diariamente durante la construcción del recubrimiento del suelo
2.6	Recubrimiento del suelo hidratado	Primer día de la construcción de recubrimiento del suelo	Diariamente durante la construcción del recubrimiento del suelo
2.7	Tamaño máximo de terrones y rocas 25 mm	Primer día de la construcción de recubrimiento del suelo	Diariamente durante la construcción del recubrimiento del suelo
2.8	Controles para el drenaje de la superficie presentes para evitar que el agua de la superficie entre al área del recubrimiento.	Antes de empezar la construcción del recubrimiento del suelo	Una vez por evento
2.9	No hay agua estancada en el recubrimiento del suelo.	Durante la primera semana de la construcción del recubrimiento del suelo	Después de cada evento de lluvia
2.10	El recubrimiento del suelo mantuvo la humedad antes de la colocación de la geomembrana para reducir el agrietamiento por rajaduras.	Al finalizar el recubrimiento del suelo	Cada 2 semanas hasta que se coloque la geomembrana sobre el recubrimiento del suelo
2.11	Pruebas en cuanto a la densidad del campo y el contenido de humedad.	Primer día de la construcción de recubrimiento del suelo	Diariamente durante la construcción del recubrimiento del suelo
2.12	Pruebas de laboratorio del suelo de la construcción incluyendo análisis granulométrico, límites de Atterberg y coeficiente de permeabilidad.	Primer día de la construcción de recubrimiento del suelo	Diariamente durante la construcción del recubrimiento del suelo
2.13	El evaluador realiza verificación del espesor de 60 cm del recubrimiento del suelo	Al finalizar el recubrimiento del suelo	Únicamente si la evaluación inicial mostró un espesor inadecuado del recubrimiento del suelo

3.0 RECUBRIMIENTOS DE GEOMEMBRANA

3.1 Generalidades

La geomembrana se usa en un revestimiento compuesto estándar. El material de la geomembrana debe ser un recubrimiento flexible de polietileno de alta densidad (HDPE). Los estándares para los materiales, la construcción, el aseguramiento de calidad y el control de calidad de este material de geomembrana deben seguir los estándares mínimos de la industria y los lineamientos del fabricante.

La geomembrana de HDPE debe tener un espesor promedio mínimo de 60 mils (0.152 cm). El material aceptable de geomembrana debe estar encima y en contacto directo con un suelo subrasante aprobado o bien un material de recubrimiento geosintético.

El equipo de construcción e instalación de las celdas deberá informar al supervisor la fecha de instalación del recubrimiento con anticipación de dos semanas y programar la asistencia de la supervisión y representantes de las comunidades cercanas para efectuar una verificación del control de calidad durante la instalación de la geomembrana.

3.2 Fabricación

El material de geomembrana se debe producir con materias primas vírgenes. Materiales rectificadas, reprocesados o adaptados del mismo lote pueden ser aceptables, pero no se deben usar materiales reciclados o regenerados en el proceso de fabricación. El material de HDPE y las varillas para soldar deben contener entre 2% y 3% de carbono negro y no debe contener más de 1% de otros aditivos.

Las hojas de geomembrana deben encontrarse libres de perforaciones, imperfecciones en la superficie, rasguños o demás defectos (p.ej. color no uniforme, rayones, asperezas, aglomerados de carbono negro u otros aditivos o rellenos, materiales reprocesados notorios visiblemente, etc.)

3.3 Transportes

Todo el material de recubrimiento de HDPE se debe enviar en rollos. Las secciones dobladas o arrugadas de paneles no son aceptables y no se deben utilizar a menos que sea una parte normal del proceso de fabricación.

3.4 Envío

El Ingeniero Certificador o su representante calificado deben inspeccionar que no haya daños o defectos en los materiales recibidos. Empujar, deslizar o arrastrar los rollos puede ocasionarles daño, por lo tanto se debe evitar y contemplar el personal y equipo necesario para su descarga, traslado y manipulación.

3.5 Almacenamiento

El material de geomembrana se debe proteger del suelo blando o mojado y del suelo rocoso o áspero. La membrana de HDPE no se debe aplicar en más de 5 rollos de alto (o según lo recomiende el fabricante) para evitar el aplastamiento del centro de los rollos. Se deberá utilizar una cubierta para proteger la geomembrana si se almacena en el sitio por más de 6 meses. Los rollos se deben almacenar de una forma tal que se evite el cambio de lugar, la abrasión o cualquier otro movimiento adverso que pueda dañar la geomembrana.



Figura 12: Rollos geosintéticos de recubrimiento de HDPE almacenados adecuadamente

3.6 Instalación

Durante las instalaciones de geomembrana se deben seguir todas las recomendaciones del fabricante. Todo material de geomembrana se debe sobreponer y tener contacto íntimo con el suelo de subrasante construido o con el material geosintético.

El manejo y desplazamiento de los rollos de materiales geosintéticos es un proceso potencialmente peligroso que puede ocasionar heridas severas e incluso la muerte. Por lo tanto, la seguridad debe ser la principal prioridad en el lugar de trabajo. Se debe realizar una reunión de seguridad al inicio del trabajo para discutir temas sobre cómo cumplir con los objetivos del proyecto en forma segura. Se debe prestar especial atención al desplazar material geosintético en o sobre pendientes pronunciadas.

3.6.1 Preparación de la subrasante

La superficie del suelo de subrasante (es decir la parte superior del recubrimiento de arcilla) debe encontrarse libre de piedras afiladas, piedras mayores de 3 cm, palos o demás materiales para minimizar el daño potencial en la geomembrana que se sobrepondrá. La superficie de la subrasante del suelo se debe terminar al aplanar con un rodillo de ruedas planas hasta alcanzar una superficie lisa y uniforme.

La subrasante del suelo se debe entonces proteger de la desecación y de agrietamiento, de surcamientos, erosión y estancamientos antes y durante la colocación de la geomembrana. Si el recubrimiento del suelo no estará cubierto por un recubrimiento de geomembrana el tiempo suficiente y existe la posibilidad de generar desecación u otro daño al recubrimiento del suelo, (generalmente por dos (2) o más semanas), se puede aplicar una capa de suelo temporal de 30 cm. Esta capa temporal se debe construir con suelos de recubrimiento para recubrir las condiciones de la construcción. La capa temporal se debe eliminar antes de la colocación de la geomembrana. La condición de la subrasante se debe preservar a través de la aplicación regular de agua y compactación con aplanadora o bien al colocar un mínimo de 30 cm de cubierta de suelo temporal que debe ser retirada antes de la colocación de la geomembrana y de evaluar nuevamente la superficie de subrasante del suelo.



Figura 13: Subrasante preparado

3.6.2 Desplazamiento de la geomembrana

El desplazamiento (incluyendo el equipo que se utiliza en el manejo de la geomembrana) no debe dañar la subrasante. En los casos en que el material de geomembrana se coloca sobre los materiales geosintéticos, el equipo de construcción (que no sean los vehículos de tipo todo terreno) no debe transitar directamente sobre el material geosintético inferior.

Como se mencionó anteriormente, la seguridad debe ser una de las principales prioridades y se debe prestar especial atención al desplazar material geosintético en o sobre pendientes pronunciadas.



Figura 14: Desplazamiento de la geomembrana

3.6.3 Clima

La geomembrana no se debe colocar durante condiciones de clima inclemente, tales como lluvia o fuertes vientos. El agua de la lluvia se debe redirigir y alejar de la celda recubierta. Esto se puede hacer a través de la construcción de canales de redireccionamiento y diques o bien al readaptar áreas que drenen hacia la celda de desechos.

La construcción de geomembrana y el sellado no se realizará mientras esté lloviendo o si el relleno está experimentando una humedad excesiva que pueda mojar el recubrimiento.

El agua de lluvia caerá directamente en la celda de desechos del relleno. No será necesario eliminar esta agua tan pronto. En todo momento debe haber una bomba para aguas pluviales para bombear el agua de la celda de desechos. Esta bomba deberá ser lo suficientemente grande para eliminar el agua estancada en la celda de desechos en un día.

Durante los períodos de vientos fuertes, el despliegue se debe detener y todas las orillas expuestas del recubrimiento se deberán reducir. Esto se puede lograr con pilas de suelo, maquinaria con recubrimiento de hule, rollos de material geosintético, bolsas de arena u otros materiales pesados que no dañen la geomembrana.

3.6.4 Equipo sobre la geomembrana

No se debe permitir tráfico vehicular sobre la geomembrana antes de la colocación de las capas de recolección de lixiviados o bien las capas de cobertura protectoras. Los únicos vehículos que se pueden permitir sobre la geomembrana son los vehículos de presión baja sobre el suelo (p.ej. carritos de golf, vehículos todo terreno o bien equipo pequeño con llantas de hule y un una presión sobre el suelo inferior a 35 kPa y un peso total de menos de 340 kilogramos). Al personal que esté trabajando en la geomembrana no se le permitirá fumar, portar zapatos que ocasionen daños o involucrarse en otras actividades que puedan dañar la geomembrana.



Figura 15: Vehículos de baja presión sobre el suelo, todo terrenos, sobre la geomembrana

3.6.5 Consideraciones para construcción sobre pendientes con inclinación pronunciada

La construcción en pendientes laterales verticales o casi verticales se debe realizar en segmentos verticales de 3 metros. Las pendientes laterales que sean casi verticales son aquellas que son demasiado inclinadas como para poder caminar u operar con seguridad el equipo necesario. Comúnmente, estas son pendientes laterales que son más inclinadas que 1 horizontal x 1 vertical.

El recubrimiento se debe asegurar en la parte superior con una zanja de anclaje diseñada para el peso del recubrimiento. El recubrimiento para este segmento se debe unir. Los siguientes segmentos verticales se deben construir de forma similar pero dejando un metro adicional para el traslape del segmento inferior del recubrimiento. No es necesario unir la parte inferior de este traslape. Conforme progresa el llenado, se debe agregar una cubierta protectora para asegurar un mínimo de 60 cm de protección al recubrimiento. Se deberá conducir un análisis de estabilidad de la pendiente lateral para determinar la altura máxima incremental aceptable de la cubierta protectora.

Las pendientes laterales verticales y casi verticales se deberán alinear con HDPE texturizado de 60 mil (en ambos lados), así como un geocompuesto de dos lados para proveer protección y drenaje de lixiviados.

3.7 Sellado

El sellado (y las reparaciones) del área de trabajo se deben realizar estrictamente según los métodos aprobados por el fabricante. Esto se realiza usualmente a través de una soldadura de termo fusión o bien una soldadura de extrusión al colocar el HDPE. Es crucial prestar estricta atención a los detalles de los procedimientos para la preparación del sellado recomendado por el fabricante para poder producir áreas consistentes que no permitan las fugas de fluidos y que pasen los requerimientos de las pruebas.



Figura 16: Geomembrana de soldadura de fusión

Solamente se deben desenrollar las láminas de geomembrana que se colocarán y sellarán en el mismo día. Las láminas se deben colocar con el traslape recomendado por el fabricante, sin que esto sea menos de 8 cm para el HDPE. El Ingeniero Certificador o su representante deberán realizar una inspección visual de la colocación y traslape de la geomembrana para verificar que el material se haya colocado con el suficiente traslape.

Las arrugas se deben eliminar tanto como sea posible antes de sellar el campo. Todas las materias extrañas (basura, agua, aceite, etc.) se deben eliminar del área que se va a unir. No se deben permitir dobleces, arrugas grandes o bocas de pez (referirse al Apéndice A Glosario). Solamente se aceptan

pliegues inducidos por el fabricante del proceso de soplado de película. En donde existan arrugas o dobleces, se debe cortar el material, traslaparlo y soldarlo. Este proceso se debe realizar de tal forma que las selladuras no deban sobrellevar cargas tensas significativas. Durante la reparación de arrugas o pliegues, no necesariamente se requerirá que la geomembrana adyacente cumpla con los 8 cm mínimos de traslape, si así lo aprueba el Profesional de aseguramiento y control de calidad. Todas las selladuras finalizadas deben estar unidas y fuertemente selladas.



Figura 17: Geomembrana de soldadura de extrusión

La soldadura por puntos (si se usa) con geomembrana de HDPE debe utilizar únicamente calor. No se permitirá tape de doble lado, goma u otro método cuando se utilice la soldadora de extrusión o de fusión para realizar las uniones.

Selladuras de pendientes laterales (tales como las pendientes que tienen una inclinación mayor que 6 horizontal: 1 vertical) se deben orientar en paralelo a la dirección de la pendiente lateral, no a lo largo de la misma. Las selladuras que unen las pendientes laterales y las secciones del fondo se deben ubicar por lo menos a 1.5 metros de la pendiente lateral y a lo largo del suelo. En las esquinas y en ubicaciones geométricamente de formas raras, se debe minimizar la cantidad de selladuras.

No se debe intentar realizar selladuras a más de 40°C o por debajo de 0°C a temperatura ambiente a menos que se haya demostrado que las selladuras cumplirán con las especificaciones fuera de estos rangos. Posiblemente se requieran procedimientos especiales a temperaturas ambiente por debajo de 0°C tales como precalentar el material de la geomembrana.

Al final de cada día o al final de cada segmento instalado, todas las orillas no selladas se deberán anclar con bolsas de arena u otros dispositivos aprobados. No se deberá utilizar grapas, varillas en forma de U o bien otras anclas de penetración para asegurar la geomembrana.

3.8 Pruebas

La realización de pruebas en las materias primas, los materiales fabricados y la instalación de estos materiales es esencial y requerida para poder determinar su calidad y adaptabilidad para el uso en geomembrana. Todas las propiedades del material de geomembrana deben cumplir con los estándares del fabricante y (en el caso de HDPE) con los valores mínimos establecidos por el Geosynthetic Research Institute (GRI), Estándar GM13. Estos estándares pueden conseguirse en línea en <http://www.geosynthetic-institute.org/specifications.htm>. La Tabla 7 titulada «Pruebas estándar a realizar en material de geomembrana de HDPE» aborda los métodos de prueba aplicables y la frecuencia con que se deben realizar dichas pruebas en estas geomembranas. Para otros tipos de geomembranas, se deben seguir las recomendaciones del fabricante y las prácticas aceptadas por la industria.

Tabla 7: Pruebas estándar en materiales de geomembrana de HDPE

PRUEBA	TIPO DE PRUEBA	MÉTODO ESTÁNDAR DE PRUEBA	FRECUENCIA DE PRUEBA
Resina	Densidad	ASTM D 1505	por cada lote de resina
	Índice de flujo de fusión	ASTM D 1238 (90/2.16 y 190/21.6)	
Control de calidad del fabricante	Prueba por estándar GRI GM13 ^A		
Pruebas de conformidad realizadas por un laboratorio independiente	Espesor	ASTM D 5199 (HDPE liso) o D 5994 (HDPE texturizado)	por 9,000 m ² o fracción mayor del mismo para cada lote de resina
	Gravedad/Densidad específica	ASTM D 1505/D 792	
	Contenido de negro de humo	ASTM D 1603	
	Dispersión de carbono negro	ASTM D 5596	
	Propiedades de tensión	ASTM D 638 ^B Tipo IV	
Selladura destructiva Pruebas de campo	Corte y desprendimiento	ASTM D 4437	Varía según el campo, laboratorio y archivo
Pruebas de selladuras de campo no destructivas	Presión de aire	GRI GM6	todas las selladuras de soldadura de fusión de doble rodadura
	Vacío	ASTM D 5641	todas las selladuras que no hayan sido verificadas con presión de aire, cuando sea posible

Notas:

A - Las pruebas de resistencia contra rayos UV no se requieren para el HDPE que se va a cubrir inmediatamente.

B - Dividir la elongación calculada usando 5 cm iniciales de longitud de distancia entre marcas

3.8.1 Control de calidad de fabricación

El fabricante de la geomembrana debe realizar pruebas en todos los materiales relacionados con la fabricación de geomembranas para determinar su calidad y adaptabilidad para el uso. En la Tabla 7 se encuentran las pruebas, métodos y frecuencia para realizarlas.

3.8.1.1 Lote de resina

El fabricante de geomembrana es quien compra la resina que se utiliza para la fabricación de geomembranas. El fabricante de geomembrana debe realizar pruebas en cuanto a la densidad y el índice de fluidez de las geomembranas de HDPE. Los métodos para realizar las pruebas y la frecuencia con la que deben realizar se encuentran en la Tabla 7.

3.8.1.2 Pruebas del fabricante de geomembrana

El fabricante de geomembrana conduce muchas pruebas a lo largo del proceso de fabricación y después de que se ha producido la geomembrana. Para la geomembrana de HDPE, entre las pruebas del fabricante se podría incluir el espesor, la densidad, contenido de negro de humo, dispersión de negro de humo, propiedades de tensión, resistencia al desgarre, resistencia a la perforación, tiempo de inducción a la oxidación, envejecimiento, resistencia al agrietamiento por estrés y (en el caso de HDPE texturizado) nivel de aspereza. Los tipos y frecuencias de las pruebas se encuentran en la Tabla 7.

3.8.2 Conformidad

Antes de aceptar la geomembrana del fabricante, el Ingeniero Certificador debe verificar que cumpla con las especificaciones requeridas. En el caso de geomembrana de HDPE, el laboratorio independiente deberá realizar pruebas sobre el espesor, la densidad, el contenido de carbono negro, la dispersión de carbono negro y las propiedades de tensión. Los métodos para realizar las pruebas y la frecuencia con la que deben realizarse se encuentran en la Tabla 7.

3.8.3 Selladuras

El Ingeniero Certificador o su representante deberá observar todos los procedimientos para la verificación de selladuras y todas las pruebas correspondientes. Todas las pruebas de selladuras de la geomembrana deben seguir los procedimientos para la realización de pruebas recomendados por el fabricante.

3.8.3.1 Verificación de pruebas de selladuras

Cada día, antes de empezar las selladuras de campo, se deben realizar selladuras de prueba en fragmentos de la geomembrana para verificar que las condiciones para las selladuras sean las adecuadas.

Cada selladura de prueba debe tener por lo menos 90 cm de largo por 30 cm de ancho. Cuatro especímenes de 2.5 cm de ancho (cuando sea posible 6 si se usa soldadura de fusión de doble rodadura) se recortarán de la muestra de las selladuras de prueba. En dos de los especímenes de campo se probará el corte y en dos se probará el desprendimiento (4 de ser posible si se están realizando pruebas de soldadura de fusión de doble rodadura tanto en las soldaduras internas como en las externas).

Las pruebas de corte y desprendimiento en el campo se deben conducir utilizando un tensiómetro de campo. El tensiómetro de campo es un dispositivo de pruebas diseñado para evaluar condiciones en el sitio de construcción y realizar pruebas de elongación, fuerza pico y fuerza de desprendimiento. El tensiómetro de campo que se utiliza para realizar las pruebas de desprendimiento y corte debe contar con certificado de calibración actualizado.

Los criterios de falla son los mismos que los que se utilizan para la prueba de selladura destructiva que se describen a continuación. Si una selladura de prueba falla, deberá repetirse. Si esta última también falla, entonces se deberá construir dos selladuras de prueba adicionales, en las cuales también se deberá realizar las pruebas correspondientes. Este proceso debe continuar y no se puede iniciar la soldadura con la máquina o soldadora (si aplica) hasta que todas las selladuras de prueba pasen las pruebas.

En los siguientes casos se deberán realizar selladuras de prueba adicionales:

- Al inicio de cada período de selladura en cada aparato de selladuras utilizado ese día (el inicio de cada período de selladuras es la mañana e inmediatamente después de receso);
- Cuando se den condiciones ambientales significativamente diferentes (tales como cambio de temperatura, nivel de humedad, polvo, etc.);
- En cualquier momento en el que la máquina se haya apagado por más de 30 minutos y
- Al sellar diferentes geomembranas (es decir, encajes y de liso a texturizado).

Durante la soldadura de extrusión se deberá verificar tanto al soldador como la máquina durante cada nueva selladura de prueba. Durante la soldadura de fusión se deberá verificar únicamente la máquina durante cada selladura de prueba, ya que la máquina no depende tanto del operador en estos casos. Cada sellador individual debe realizar por lo menos una selladura de prueba cada día en el que procederá a realizar selladuras.

3.8.3.2 Pruebas no destructivas

Se deberán realizar pruebas continuas no destructivas en todas las selladoras realizadas por el instalador. En las soldaduras de fusión de doble rodadura las pruebas de presión del aire y en las soldaduras de

extrusión las pruebas de caja de vacío son los únicos métodos aceptables para las selladuras de geomembrana de HDPE. Todas las selladuras de fábrica, además de las selladuras de campo se deberán verificar a través de pruebas no destructivas. Todas las fugas indicadas se deberán aislar y reparar siguiendo los procedimientos que se describen en la Sección 3.9 del presente documento.

3.8.3.2.1 Pruebas de presión del aire

Los extremos del canal de aire de la soldadura de fusión de doble rodadura se deberán sellar y se deberá aplicar presión hasta alcanzar aproximadamente 200 kPa para HDPE. Entonces se debe apagar la bomba de aire y se debe observar la presión transcurridos 5 minutos. Una pérdida de menos de 27 kPa es aceptable si se determina que el canal de aire no está bloqueado entre los extremos sellados. Una pérdida equivalente a o mayor de 27 kPa indica la presencia de una fuga en una selladura, la cual se deberá aislar y reparar siguiendo los procedimientos que se describen en la Sección 3.9. El Ingeniero Certificador o su representante deberá observar y registrar todas las lecturas del calibrador de presión.



Figura 18: Pruebas de presión de aire en selladuras soldadas por puntos

3.8.3.2.2 Pruebas de caja de vacío

Se debe aplicar una válvula de succión de aproximadamente 8 a 13 cm de calibrador de vacío en todas las selladuras soldadas de extrusión que puedan ser verificadas de esta forma. Entre los ejemplos de selladuras con soldaduras de extrusión que nos se prestan fácilmente a pruebas de vacío se pueden mencionar botas, accesorios, etc. Se debe observar si existen fugas en la selladura por lo menos durante 10 segundos mientras se expone a este vacío. El Ingeniero Certificador o su representante deberá observar el 100% de la realización de estas pruebas.



Figura 19: Realización de pruebas de caja de vacío

3.8.3.3 Pruebas destructivas

Las muestras para pruebas destructivas se deben tomar como mínimo de una ubicación estratificada por cada 150 metros de selladura de campo o fracción mayor de la misma. El metraje para la reparación individual de fugas de más de 3 metros y para reparaciones individuales de más de 3 metros en selladuras que fallaren también se debe contar y en las mismas se deben realizar pruebas destructivas usando la misma frecuencia para la realización de pruebas descrita anteriormente. Como mínimo, se debe realizar una prueba destructiva en cada soldadura que se utilice para selladuras o para reparaciones. Se debe eliminar una cantidad suficiente de la selladura para realizar las pruebas de campo, las pruebas de laboratorio independiente y para archivar suficiente material para realizar pruebas nuevamente en la selladura, cuando así lo ameriten. Las pruebas de campo deberán incluir por lo menos dos especímenes de prueba para desprendimiento (4 cuando sea posible para realizar pruebas en ambos lados en las selladuras de soldaduras de fusión de doble rodadura). Las pruebas de campo del laboratorio independiente deberán incluir por lo menos cinco especímenes de prueba para corte (10 cuando sea posible para realizar pruebas en ambos lados en las selladuras de soldaduras de fusión de doble rodadura). A las ubicaciones de las pruebas destructivas para selladuras se les deberán colocar tiras de refuerzo y la tira se deberá soldar completamente por extrusión a la geomembrana madre. En las secciones reforzadas no se realizarán pruebas destructivas. Si el Ingeniero Certificador o su representante lo consideran necesario, se pueden realizar pruebas destructivas adicionales.



Figura 20: Pruebas destructivas

Si una prueba destructiva no cumple con los criterios descritos a continuación, se pueden conducir pruebas destructivas adicionales por lo menos a una distancia de 3 metros a los lados de la prueba destructiva fallida. En el caso que fallara alguna de estas pruebas destructivas, se deberá repetir tanto el muestreo como el proceso de la realización de la prueba hasta que la selladura fallida tenga pruebas destructivas que sí pasaron. Entonces la selladura fallida se debe marcar entre las pruebas que sí se pasaron. Como alternativa, todas las selladuras realizadas por el soldador/por la máquina en el mismo período de tiempo (entre las pruebas destructivas que sí pasaron o las soldaduras de prueba) y representadas por la prueba destructiva fallida se deben marcar.

Todos los especímenes probados en el campo desde una ubicación de pruebas destructivas deben pasar la prueba de corte y desprendimiento para que se considere que la selladura pasó la prueba. Se determina que los especímenes que hayan sido probados en el campo pasaron las pruebas si el espécimen en el que se probó el desprendimiento falló en la prueba FTD y todos los especímenes de prueba cumplieron con los criterios enumerados en esta subsección. Las pruebas del laboratorio independiente deberán confirmar estos resultados de campo.

El criterio mínimo para que pase una prueba de laboratorio independiente es cumplir con lo siguiente:

- Por lo menos 4 de 5 especímenes a los que se les haya realizado pruebas en el modo de desprendimiento deben estar en el modo de prueba FTB.
- Por lo menos 4 de 5 especímenes al determinar si se encontraban en el modo de desprendimiento o bien de corte.

- El requerimiento mínimo para el refuerzo de corte para HDPE es de 95% de fuerza de la lámina madre del fabricante, pero no menos de 210 N/cm.
- El requerimiento mínimo para el refuerzo de corte para HDPE es de 62% de fuerza de la lámina madre del fabricante, pero no menos de 137 N/cm y el anexo de la prueba FTB.
- El valor promedio de los 5 especímenes de cada determinación de desprendimiento y corte debe cumplir con el mínimo valor especificado.

Los criterios anteriores deben cumplirse en ambas rodaduras de cada selladura de soldadura de fusión de rodadura doble antes de tomarlo en cuenta como una prueba positiva.

En la Tabla 7 se encuentran los métodos para las pruebas de geomembrana. Se debe notar que los fabricantes de geomembrana pueden tener diferentes valores para el refuerzo de sus hojas de geomembrana y por lo tanto, los valores de corte y desprendimiento requeridos se proporcionan SLQCP únicamente como porcentajes. Como consecuencia, los valores de refuerzo de lámina del fabricante se deben proveer antes de que se determine si los resultados de la prueba son positivos.

Si pasan menos de 4 de los 5 especímenes de cada ubicación de prueba destructiva, o bien si el promedio calculado de los 5 especímenes es inferior al mencionado anteriormente o si más de un espécimen del grupo de 5 especímenes muestra una falla en el adhesivo de rasgamiento, entonces la selladura ha fallado.

3.9 Reparaciones y repetición de pruebas

Continuamente se realizan inspecciones visuales para encontrar señales de orificios, penetraciones, rasgamientos o rupturas en el recubrimiento. Cualquier agujero, penetración, rasgamiento o ruptura en el recubrimiento se reparará por medio del uso de parches de material de recubrimiento adicional y soldadura de fusión sobre el área dañada. En las selladuras de estos trabajos de reparación se realizarán pruebas no destructivas y posiblemente pruebas destructivas (referirse a los criterios de pruebas destructivas para las selladuras reparadas según se describe en la Sección 3.8.3.3.).

Todas las arrugas en las selladuras y las ubicaciones de pruebas destructivas se deberán reparar en una distancia de por lo menos 15 cm en cada lado del área probada o detectada. En las selladuras de estos trabajos de reparación se realizarán pruebas no destructivas y posiblemente pruebas destructivas (referirse a los criterios de pruebas destructivas para las selladuras reparadas según se describe en la Sección 3.8.3.3.)



Figura 21: Daño a recubrimiento de HDPE con indicador de reparación

3.10 Zanja de anclaje y relleno

La zanja de anclaje se deberá completar alrededor de todas las porciones de la geomembrana en las que las orillas de la geomembrana no necesitarán un encaje para expandirse a la siguiente área en donde se colocará recubrimiento. La zanja de anclaje excavada deberá tener orillas redondeadas para poder ayudar a proteger la geomembrana. No se debe permitir que suelo flojo quede debajo de la geomembrana en la zanja de anclaje. La excavación de la zanja de anclaje no se deberá hacer con demasiada anticipación del despliegue de la geomembrana.



Figura 22: Zanja de anclaje durante excavación



Figura 23: Zanja de anclaje rellena con suelo

La zanja de anclaje se debe llenar y compactar por lo menos al 90 por ciento de la densidad según se determina en los valores de humedad/densidad en la parte de suelos de este manual (refiérase a la Sección 2.5). Se debe tener cuidado durante el llenado y la compactación de la zanja para evitar daños en la geomembrana. La zanja de anclaje se debe llenar lo antes posible después del despliegue del sintético. No es necesario reportar los resultados de las pruebas de compactación.

3.11 Cubierta protectora y materiales de drenaje

3.11.1 Despliegue

Todos los materiales de suelo que se colocan sobre una geomembrana se deben colocar durante la parte más fresca del día y se deben desplegar en «tramos» a lo largo de la superficie para controlar la cantidad de holgura y minimizar arrugas y pliegues en la geomembrana. Estos materiales deben desplegarse solamente pendiente arriba en las pendientes laterales de tal forma que se minimice el estrés sobre la geomembrana. El material colocado como cubierta protectora se debe colocar por medio de equipo liviano (como tractores con menos de 35 kPa de presión de contacto) y al mismo tiempo mantener por lo menos 30 cm de agua entre el tractor y la geomembrana. Se requiere de observación de tiempo completo realizada por el Ingeniero Certificador o bien su representante durante el despliegue de estos materiales en contacto directo con los materiales geosintéticos.



Figura 24: Cubierta protectora desplegada en tramos

3.11.2 Espesor y material

Por lo menos 60 cm de la cubierta protectora (que podría incluir una capa granular de recolección de lixiviados) se debe colocar sobre la geomembrana completada para evitar daños durante la operación.

La cubierta protectora que se colocó sobre la superficie de la geomembrana de HDPE no debe contener ninguna roca mayor de 1 cm, vegetación u otros materiales que pudieran dañar la geomembrana. Si la cubierta protectora contiene materiales de más de 1 cm en tamaño, una capa de geotextil protector se debe colocar debajo de la superficie de HDPE de la geomembrana.



Figura 25: Colocación de capa de drenaje granular al final de un tramo

Una cubierta protectora que cubre el sistema de recolección de lixiviados y el sistema de eliminación en general debe contar con permeabilidades equivalentes o mayores de 1×10^{-4} cm/seg, o bien drenajes en

forma de chimeneas o se deben construir pasajes apropiados para que los lixiviados se drenen hacia el sistema de recolección de lixiviados y al sistema de eliminación.

3.12 Puntos críticos de inspección

Tabla 8: Puntos críticos de inspección del recubrimiento de geomembrana

NO.	DESCRIPCIÓN	CUÁNDO	FRECUENCIA
3	Recubrimiento de la geomembrana		
3.1	La construcción del recubrimiento de la geomembrana cuenta con un monitoreo a tiempo completo de la construcción en aspectos de aseguramiento de calidad y control de calidad.	En cada uno de los eventos de construcción	Por lo menos una vez por evento
3.2	recubrimiento de membrana flexible de polietileno de alta densidad de 0.152 mm (60 mil)	En cada uno de los eventos de construcción	Por lo menos una vez por evento
3.3	Geomembrana fabricada adecuadamente, embarcada, enviada y almacenada para proteger el material en caso de daños.	En cada uno de los eventos de construcción	Por lo menos una vez por evento
3.4	La subrasante se compacta y se apisona hasta quedar liso y libre de piedras filosas, o bien piedras mayores de 1 cm en tamaño; se elimina también palos y otros materiales.	Al finalizar el recubrimiento del suelo y antes de desplegar el recubrimiento de geomembrana	Por lo menos una vez por evento
3.5	Se despliega la geomembrana para no dañar la subrasante.	Primer día de la construcción de recubrimiento de geomembrana	Diariamente durante la construcción del recubrimiento de geomembrana
3.6	Los únicos vehículos que se pueden permitir sobre la geomembrana son los vehículos de presión baja sobre el suelo (p.ej. carritos de golf, vehículos todo terreno o bien equipo pequeño con llantas de hule y un una presión sobre el suelo inferior a 35 kPa y un peso total de menos de 340 kg).	Primer día de la construcción de recubrimiento de geomembrana	Diariamente durante la construcción del recubrimiento de geomembrana
3.7	Todas las selladuras fueron soldadas por puntos por fusión o soldadas por extrusión.	Primer día de la construcción de recubrimiento de geomembrana	Diariamente durante la construcción del recubrimiento de geomembrana
3.8	Se verifica la presión de aire en todas las soldaduras por puntos de fusión.	Primer día de la construcción de recubrimiento de geomembrana	Diariamente durante la construcción del recubrimiento de geomembrana
3.9	Se realiza la prueba de caja de vacío en todas las soldaduras de extrusión.	Primer día de la construcción de recubrimiento de geomembrana	Diariamente durante la construcción del recubrimiento de geomembrana
3.10	No selladuras arriba de 40° C o por debajo de 1° C a temperatura ambiente en el aire	Primer día de la construcción de recubrimiento de geomembrana	Diariamente durante la construcción del recubrimiento de geomembrana
3.11	Control de dobleces, arrugas grandes y bocas de pez.	Primer día de la construcción de recubrimiento de geomembrana	Diariamente durante la construcción del recubrimiento de geomembrana

NO.	DESCRIPCIÓN	CUÁNDO	FRECUENCIA
3.12	Al final del día laboral, se deben anclar todas las orillas no selladas.	Primer día de la construcción de recubrimiento de geomembrana	Diariamente durante la construcción del recubrimiento de geomembrana
3.13	Pruebas apropiadas de los materiales de la geomembrana.	Primer día de la construcción de recubrimiento de geomembrana	Diariamente durante la construcción del recubrimiento de geomembrana
3.14	Pruebas destructivas en las selladuras.	Primer día de la construcción de recubrimiento de geomembrana	Diariamente durante la construcción del recubrimiento de geomembrana
3.15	Construcción y relleno de zanja de anclaje.	Antes de rellenar la zanja de anclaje.	Diariamente, durante el relleno de la zanja de anclaje.
3.16	Se coloca una cubierta protectora o una capa de drenaje sobre la geomembrana para controlar los tramos y minimizar las arrugas y dobleces en la geomembrana.	Primer día de la cubierta protectora o de la construcción de la capa de drenaje.	Diariamente durante la cubierta protectora o durante la construcción de la capa de drenaje.
3.17	Verificación del evaluador de una cubierta protectora con un mínimo de 60 cm y o capa de drenaje granular.	Al finalizar la cubierta protectora o la capa de drenaje.	Únicamente si la evaluación inicial mostró un espesor inadecuado
3.18	Control de rocas mayores de 1 cm, vegetación u otros materiales que pudieran dañar la geomembrana.	Primer día de la construcción de la cubierta protectora o de la capa de drenaje.	Diariamente durante construcción de la cubierta protectora o de la capa de drenaje.

4.0 SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS

El propósito del sistema de recolección de lixiviados es controlar la acumulación de lixiviados en los residuos durante las operaciones activas del sitio y monitorear los niveles de lixiviados después de haber cerrado la planta de desechos. El sistema de recolección de lixiviados consiste de una capa de drenaje, tubos colectores, recolectores, un sistema de bombeo, elevación y manejo de lixiviados recuperados.

Se recomienda realizar aseguramiento de calidad y pruebas de control de calidad a tiempo completo durante la construcción del los sistemas de recolección de lixiviados del relleno.

4.1 Capa de drenaje de lixiviados

La capa de drenaje de lixiviados se coloca sobre el recubrimiento para permitir que los lixiviados fluyan en forma horizontal hacia las tuberías de recolección de lixiviados. La capa de drenaje de lixiviados puede consistir de un sistema de geored o bien de material granular en los grados base; sin embargo, en las paredes laterales solamente se podrá utilizar una capa de drenaje de geored.

4.1.1 Materiales

Los materiales del suelo que se utilizan para construir capas de recolección de lixiviados deberían consistir de suelo granular limpio (lavado de ser necesario). Los suelos granulares en las capas de recolección de lixiviados deben tener permeabilidades no menores de aproximadamente 1.0×10^{-2} cm/sec. El material que se pone en contacto con la geomembrana debe tener un tamaño máximo de partículas según lo que se indica en la Sección 3.11.2. Los materiales granulares que se colocan alrededor de las tuberías de recolección deben tener un tamaño de grano mayor que el tamaño de las perforaciones o ranuras de las tuberías de recolección.

El material granular debe tener menos del 5% que pasa el colador de 0.075 mm y una conductividad hidráulica mínima de 1×10^{-2} cm/seg y se puede utilizar en cualquier porción de cualquier fase. El tamaño de las partículas del material de drenaje granular se limita a un máximo de 1 cm sin colchón de geotextil (o bien 3 cm con colchón de geotextil) para evitar la perforación del sistema de geomembrana subyacente.

Una capa de geored comúnmente está formada de una rejilla tridimensional de polietileno. Proporciona un flujo de líquido plano para trasladar los lixiviados acumulados hacia la zanja de recolección de lixiviados. Aunque la geored es mucho más delgada que una capa de drenaje granular, tiene una mucho mayor conductividad hidráulica que le permite una transmisión general de lixiviado equivalente, de no ser

mayor. A la geored se le sobrepondrá un geotextil para separar el suelo de la cubierta de la geored y mantener una conductividad hidráulica adecuada en el sistema; se puede utilizar en cualquier porción de cualquier fase.



Figura 26: Geocompuesto con geored y geotextil

La base de la capa de drenaje se inclina para promover el flujo de líquidos hacia las tuberías de recolección de lixiviados y finalmente hacia los sumideros para extracción. La caja de drenaje granular o geored deberá proveer suficiente capacidad de flujo para trasladar en forma efectiva los lixiviados hacia las zanjas de recolección y sumideros, reduciendo así las acumulaciones. Las acumulaciones de lixiviados se estiman utilizando el modelo de computadora HELP (Evaluación hidrológica del rendimiento del relleno, por sus siglas en inglés). En todas las áreas de desechos se mantendrá un máximo de 30 centímetros de lixiviados.

El sistema de recubrimiento para las paredes laterales utilizará una capa de drenaje de geocompuesto de doble lado.

4.1.2 Construcción

Los materiales granulares (lavados de ser necesario) se deben colocar y esparcir por medio del uso de equipo y métodos que minimicen la generación de material fino. El material que se coloca sobre la geomembrana u otros geosintéticos se debe colocar según lo que se describe en la Sección 3.11.1. Los materiales granulares no deben recibir ninguna compactación aparte de la que fuera incidental durante el proceso de colocación y esparcimiento.

El Geocompuesto o los materiales de la geored se colocarán sobre el piso en contacto directo con la geomembrana. Los geocompuestos o georedes se unirán a un espaciado máximo de 1.5 metros a lo largo de las selladuras de los lados y 30 cm en selladuras cruzadas. Las georedes se cubrirán con un geotextil no tejido. El geotextil que se encuentra sobre la geored o bien sobre el componente de geotextil geocompuesto se coserá.



Figura 27: Coser geotextil

4.1.3 Realización de pruebas de control de calidad

Las pruebas de aseguramiento de calidad realizadas en los suelos granulares y conducidas por el laboratorio independiente deben consistir análisis de tamaño granular (ASTM D 422) y permeabilidad (ASTM 2434), que se conducen a una frecuencia mínima de 1 por 2,300 m³ de material colocado. Los requerimientos para realizar pruebas de permeabilidad se pueden anular si se puede demostrar a través de una correlación con los análisis de tamaño granular que el material fácilmente cumple con los criterios de permeabilidad. Todas las pruebas se deben conducir sobre el material después de que este se ha colocado en caso de cualquier reducción en el tamaño granular que haya sucedido durante el proceso de colocación. También se recomienda que se realicen pruebas en el material granular en cuanto al tamaño granular (y permeabilidad de ser necesario) para precalificar el material antes de utilizarlo.

El proveedor o el laboratorio independiente deben realizar pruebas en el material granular utilizado en las capas de recolección de lixiviados en cuanto a su contenido de carbonato de calcio (usando el Método de Prueba J&L S-105-89 u otro método apropiado). El contenido de carbonato de calcio medido no debe exceder el 15%.

De no haber drenajes en forma de chimeneas a través de la cubierta protectora hacia el sistema de

recolección de lixiviados, las pruebas de permeabilidad también se deben conducir en la cubierta protectora para verificar que la permeabilidad no sea inferior a 1×10^{-4} cm/seg.

Los resultados de las pruebas del fabricante en cuanto a los materiales geosintéticos deben ser verificados por el Ingeniero Certificador para determinar si cumplen con los requerimientos mínimos para estos materiales, establecidos por el ingeniero de diseño.

El espesor de las cubiertas de recolección de lixiviados granulares y las capas de la cubierta protectora se deben verificar a una frecuencia de un punto de verificación por 500 m².

4.2 Tubería de recolección de lixiviados

Comúnmente, cada celda debe contener una tubería de recolección de lixiviados. El piso del recubrimiento se inclina hacia la tubería de recolección. Las tuberías de recolección de lixiviados comúnmente consistirán de una tubería de cloruro de polivinilo, SCH 80, o bien una tubería de polietileno de alta densidad, SDR 17 o menor. Estas tuberías de recolección se perforarán con tres filas de orificios espaciados a aproximadamente 120 grados alrededor del perímetro. Los tamaños de las perforaciones deben coincidir con la gradación del medio de drenaje circundante por medio del uso de criterios estándar para filtros, pero no debe ser menor que 1 cm de diámetro. El piso de las tuberías de recolección se inclinará hacia el colector. El espesor de las paredes de la tubería se debe determinar a través de cálculos de aplastamiento de tubería, pandeo de paredes y deflexión de anillo.



Figura 28: Tuberías de recolección de lixiviados ranuradas y perforadas

Las líneas de recolección de lixiviados se colocan en el piso del relleno. En países suramericanos, debido a los suelos que tienen una cubierta muy baja en cuanto a permeabilidad e índices de lluvia extremadamente altos, se colocan capas adicionales de líneas para la recolección de lixiviados, aproximadamente cada 7 metros verticales. Esto representa un método para evitar que los lixiviados se acumulen en el suelo de la cubierta sobre el fondo del relleno, ocasionando que los lixiviados se filtren a los lados del relleno. Otra forma efectiva de evitar que los lixiviados se acumulen en el suelo de la cubierta que se encuentra sobre el fondo del relleno es limpiar las ventanas a través de la cubierta diaria e intermedia antes del desarrollo de labores de cada día. Esto permite que los desechos tengan contacto constante con los desechos que se colocaron debajo, proveyendo un trayecto de flujo libre para lixiviados.



Figura 29: Instalación de tubería de recolección de lixiviados

4.3 Colectores de lixiviados

Los lixiviados que ingresan en la capa de drenaje y/o en las tuberías de recolección se descargan posteriormente en los colectores. Los colectores se rellenan con un material granular con un tamaño de partículas que oscila entre 1 cm a 8 cm y contiene menos del 15% de carbonato de calcio. Los sumideros se recubren con una capa adicional de geomembrana y también reciben la protección de un geotextil entre el material granular y la geomembrana. Los lixiviados se almacenan en los sumideros hasta que la bomba de lixiviados los extraen. Un tamaño común para un sumidero puede ser de por lo menos 3 metros por lado, cuadrado al fondo.

Los lixiviados se eliminan de los sumideros a través del uso de una bomba eléctrica o neumática que se coloca en el sumidero a través de una tubería de elevación. Los lixiviados entonces se pueden descargar del sumidero para almacenaje y/o para su desecho. Los lixiviados se eliminarán a una velocidad suficiente para mantener la cabeza del recubrimiento fuera del sumidero por debajo del nivel de 30 cm. Desde los sumideros, los lixiviados se trasladarán a un sistema principal o bien a un tanque de almacenamiento o camiones con tanques.



Figura 30: Sumidero de recolección de lixiviados

Las tuberías de elevación de los sumideros se ubican a lo largo del perímetro del área de desecho, directamente al subir la pendiente lateral de los sumideros. La tubería de elevación provee un medio para reducir los bombeos sumergibles a la inclinación de la pendiente lateral y a los sumideros de recolección. La porción inferior de la tubería de elevación que se encuentra dentro del sumidero tiene perforaciones de 1 cm que permiten que los lixiviados fluyan hacia las bombas. Para evitar que la sección perforada de la tubería de elevación se atasque, un geotextil reviste el área del sumidero.

4.4 Traslado de lixiviados

Los lixiviados recuperados de los colectores se bombearán directamente al tanque de un camión, se recircularán o se bombearán o drenarán por gravedad a través de un sistema principal hacia lagunas de evaporación o a otros lugares de almacenamiento o de tratamiento en el sitio. Los lixiviados bombeados o drenados por gravedad directamente en el tanque del camión se desecharán en un lugar fuera del sitio,

en un lugar de tratamiento de aguas residuales aprobado. Se puede utilizar cualquier combinación de los sistemas de traslado mencionados anteriormente.

Se puede utilizar un sistema principal para lixiviados en cualquiera de las fases en el sitio. El sistema principal para lixiviados trasladará los lixiviados de los colectores hacia instalaciones para el almacenamiento de lixiviados o bien lagunas de evaporación. Todos los componentes principales se fabricarán de materiales resistentes a los lixiviados como tuberías de cloruro de polivinilo o tuberías de polietileno de alta densidad. En el diseño se proveerán alcantarillas para realizar un acceso adecuado para el mantenimiento del sistema. En el caso de una interrupción forzada, la sección principal se puede apagar y se bombearán los lixiviados hacia un tanque de agua o de camión para ser transportados al lugar de almacenaje o tratamiento.



Figura 31: Tubería de elevación para lixiviados y sistema de distribución

Si se desea, los lixiviados o la condensación de gases se pueden descargar directamente al lugar de almacenaje de lixiviados en el sitio. Estas instalaciones deberán consistir de tanques futuros o lagunas. Los tanques de almacenaje ubicados fuera de las áreas alineadas tendrán una ocupación secundaria. Las lagunas de almacenaje se recubrirán con geocompuesto. Los lixiviados de las instalaciones de almacenaje serán recirculados o trasladados a instalaciones futuras para el tratamiento en el sitio o bien a instalaciones de evaporación; de lo contrario se transportarán fuera del sitio a una planta de tratamiento de aguas residuales aprobada.

Si se desea, los lixiviados o los condensados de gases se pueden descargar directamente a las lagunas para la evaporación de lixiviados en el sitio. Estas lagunas se recubrirán con geocompuesto. Las lagunas almacenarán lixiviados y condensado de gas y permitirán que se evaporen de forma natural. Estos líquidos se pueden cargar desde la laguna hacia el tanque del camión para su desecho fuera del sitio o bien para su recirculación.

Los lixiviados también se pueden bombear o drenar por gravedad directamente de los sumideros o de las lagunas hacia tanques de camiones para su transporte. Si la manguera de carga está conectada directamente a la descarga del sumidero por bombeo, se proveerá protección para la contención de derrames, tal como una cubeta portátil, en los lugares donde haya conexión de mangueras. Es necesario que todas las válvulas estén cerradas mientras se está conectando el camión al sistema de tuberías de descarga.

Para poder trasladar lixiviados a un tanque de camión se requiere de un operador capacitado. El operador debe seguir todos los requerimientos de seguridad del sitio, entre los cuales se incluye, como mínimo, tener un vestuario adecuado y contar con el equipo de seguridad, así como tener conocimiento sobre la contención de derrames y los requerimientos para realizar reportes, incluyendo el uso de almohadillas desechables o temporales contra derrames.

Los lixiviados se deben desechar en un lugar autorizado o a través de un permiso indicado de descarga de aguas residuales.

4.5 Manejo de lixiviados recuperados

Existen diferentes alternativas para el manejo de lixiviados recuperados: 1) descarga en una planta de tratamiento de aguas residuales fuera del sitio, 2) evaporación, 3) recirculación, y 4) tratamiento y descarga en el sitio.

Es importante notar que todos los sistemas de contención de lixiviados, especialmente las lagunas, se deben ubicar sobre y fuera de cualquier característica de drenaje que esté propensa a las inundaciones. Estas incluyen corrientes, ríos, lagunas, lagos y canales de drenaje. Los sistemas de contención de lixiviados se deben diseñar para proveer un margen libre para que las lagunas puedan manejar eventos de lluvia y tormentas extremas sin desbordamientos.

En el caso de que el relleno se ubique en un lugar relativamente cercano a una planta de tratamiento de aguas residuales convencional, podría ser posible descargar los lixiviados en el sistema de drenaje de aguas residuales para tratamiento en la planta o bien trasladarlo directamente del relleno a la planta. Antes de intentar esto, el relleno debe determinar si la planta de tratamiento podrá acomodar y tratar la cantidad y calidad de lixiviados. Podría ser necesario realizar un tratamiento previo a los lixiviados.

Si el relleno se ubica en un área en la que la evaporación anual sobrepase la precipitación anual, entonces la evaporación de lixiviados podría ser una oportunidad. En este caso, los lixiviados se pueden descargar directamente a las lagunas para la evaporación de lixiviados en el sitio. Estas lagunas se recubrirán con geocompuesto. Las lagunas almacenarán lixiviados y condensado de gas y permitirán que se evaporen de forma natural o bien con la asistencia de aireadores mecánicos. Los lixiviados se pueden cargar desde la laguna hacia el tanque del camión para su desecho fuera del sitio o bien para su recirculación.

Los lixiviados se pueden manejar a través de la recirculación hacia el relleno con ciertas limitaciones en cuanto a dónde se puede realizar la recirculación. La recirculación debe suceder solamente en las áreas en las que la construcción incluye un recubrimiento de geocompuesto y un sistema de recolección de lixiviados, según lo que se describe en el presente manual. La recirculación se limitará a las áreas con profundidad de desechos de por lo menos 4 metros.

La recirculación se efectuará al introducir nuevamente los lixiviados recolectados en la masa de desechos del relleno. La recirculación se logra de forma tal que evita estancamientos o acumulaciones significativas de lixiviados en cualquier área. Entre los métodos típicos de recirculación se incluyen, pero no se limitan a los siguientes: aplicaciones de rociado en el frente de trabajo, campos de saturación e irrigación por goteo.

Los modelos computarizados, tales como el modelo HELP (evaluación hidrológica del desempeño del relleno, por sus siglas en inglés), se deben utilizar para modelar el porcentaje de lixiviados que se pueden recircular sin exceder los 30 cm de cabeza de lixiviados en el recubrimiento. Para obtener más información sobre el modelo HELP, siga el siguiente enlace: <http://el.ercd.usace.army.mil/products.cfm?Topic=model&Type=landfill>.

Si ninguna de las alternativas presentadas en los párrafos anteriores son viables, entonces necesitará algún tipo de tratamiento para manejar adecuadamente los lixiviados. Al igual que la composición de los desechos que se depositan en el relleno puede variar sustancialmente de municipalidad en municipalidad,

los lixiviados producidos en los rellenos también pueden tener características que varían ampliamente. La calidad y cantidad de lixiviados puede sufrir variaciones sustanciales con los cambios de clima. Conforme sucede la degradación del contenido en el relleno a lo largo del tiempo, la calidad de los lixiviados también cambia.



Figura 32: Laguna revestida con aireación para el tratamiento de lixiviados

Se han utilizado diferentes tipos de diseños para tratar los lixiviados. En algunos de los procesos se incluyen pasos biológicos, físicos y químicos. Un diseño típico incluiría tres etapas de tratamiento: 1) pre-tratamiento, 2) tratamiento biológico y 3) tratamiento físico y químico. Generalmente, el pre-tratamiento incluye el filtro, la sedimentación y el ajuste del pH. El tratamiento biológico está diseñado para eliminar principalmente la Demanda biológica de oxígeno (BOD, por sus siglas en inglés), la Demanda química de oxígeno (COD) y algunos de los nutrientes. Los métodos más comunes para el tratamiento biológico incluyen lagunas de oxidación, lagunas aireadas y lodos activados. La última y final etapa puede incluir una serie de procesos diseñados principalmente para eliminar el color, sólidos suspendidos, metales pesados y cualquier remanente de COD. Entre los procesos que se pueden utilizar para esta etapa se incluyen el asentamiento, la oxidación del ozono, la filtración de arena, la floculación y otros. La descarga del sistema de tratamiento que se encuentra en el sitio se debe hacer según los requerimientos locales para las descargas.

4.6 Puntos críticos de inspección

Tabla 9: Puntos críticos de la inspección en un sistema de recolección de lixiviados

NO.	DESCRIPCIÓN	CUÁNDO	FRECUENCIA
4	Sistema de recolección de lixiviados		
4.1	La construcción del sistema de recolección de lixiviados cuenta con un monitoreo a tiempo completo de la construcción en aspectos de aseguramiento de calidad y control de calidad.	En cada evento de construcción	Por lo menos una vez por evento
4.2	Capa de drenaje granular, capa de recolección de lixiviados de geocompuesto o geored y geotextil.	Primer día de construcción de la capa de drenaje, geocompuesto o geored	Diariamente durante la construcción de drenaje, geocompuesto o geored
4.3	El material cumple con las especificaciones de la capa de drenaje	En cada uno de los eventos de construcción	Por lo menos una vez por evento
4.4	Colocación y desplazamiento de los materiales adecuado.	Primer día de construcción de la capa de drenaje, geocompuesto o geored	Diariamente durante la construcción de drenaje, geocompuesto o geored
4.5	Tubería de recolección de lixiviados	Primer día de construcción de la tubería de recolección de lixiviados	Diariamente durante la construcción de tubería de recolección de lixiviados
4.6	Colectores de lixiviados.	Primer día de la construcción del colector	Diariamente durante la construcción del colector
4.7	Sistema para el manejo de lixiviados.	Primer día de construcción del sistema para el manejo de lixiviados.	Diariamente durante la construcción del sistema de manejo de lixiviados.

5.0 RECUBRIMIENTOS CONSTRUIDOS POR DEBAJO DEL NIVEL FREÁTICO

5.1 Generalidades

Las excavaciones por debajo del nivel freático estacional más alto pueden experimentar inestabilidad en el fondo o en las pendientes o bien un influjo excesivo de aguas subterráneas que puede impedir la construcción del recubrimiento. El control a corto plazo de las aguas subterráneas se puede lograr al reducir temporalmente el nivel de las mismas con sistemas mecánicos de decantación o bien a través de drenajes, aprovechando la geología favorable, cortando físicamente la filtración de aguas subterráneas, o bien una combinación de estos métodos. Después de colocar el recubrimiento, se puede experimentar una fuerza hacia arriba o bien un levantamiento debido a la presión hidrostática que actúa en el piso del recubrimiento. La resistencia a largo plazo para levantar cualquiera de los componentes del sistema de recubrimiento se puede lograr con el peso de las porciones traslapadas del sistema del recubrimiento y de ser necesario, al agregar peso en la parte superior del sistema de recubrimiento. El sistema a corto plazo para el control de aguas subterráneas debe funcionar en todo tiempo hasta que se aplique suficiente resistencia a largo plazo para minimizar el potencial de levantado del recubrimiento.

Se debe notar que tanto en las condiciones de largo como de corto plazo, sin el equipo adecuado y demás instalaciones, mantener un sistema de decantación para mantener bajo el nivel de agua puede ser muy difícil y puede ocasionar daños al sistema de recubrimiento.

5.2 Análisis, diseño y construcción

5.2.1 Generalidades

Al considerar la construcción de recubrimientos por debajo del nivel freático estacional más alto se necesitan uno o más años de información de trasfondo para obtener acceso a las condiciones de las aguas subterráneas en el sitio. La construcción de recubrimientos por debajo del nivel freático requiere que el dueño u operador haga lo siguiente:

- Analizar las condiciones físicas del sitio para determinar si los suelos in-situ y las condiciones de las aguas subterráneas presentan la posibilidad de que las fuerzas hidrostáticas pudieran ocasionar inestabilidad en la subrasante o bien levantar algunos componentes del sistema de recubrimiento;
- Diseñar un sistema y los procedimientos correspondientes en los que se incluya la deshidratación y/o el empleo de balastos en forma de suelo o bien desechos sólidos compactados que adecuadamente actúen en contra de las fuerzas de levantamiento y

creen una condición de estabilidad para el recubrimiento durante la construcción del revestimiento, operación de llenado y el cuidado al cierre y post-cierre, y

- Construir el sistema y completar los procedimientos de construcción correspondientes con un nivel aceptable de monitoreo y ejecución de pruebas, además de documentar adecuadamente todas las actividades para mostrar claramente que la integridad del sistema de recubrimiento se ha protegido en todo tiempo durante la construcción del revestimiento y se continuará protegiendo durante la vida operativa, período de cierre y post-cierre del relleno.

5.2.2 Determinación del nivel freático estacional más alto

La actividad inicial en el proceso de análisis es determinar si el recubrimiento se extiende por debajo del nivel freático estacional más alto y está sujeto a presiones de levantado hidrostáticas. La información estratigráfica e hidrogeológica específica del sitio, obtenida a través de estudios específicos estratigráficos del subsuelo del sitio, se debe utilizar para definir las aguas subterráneas, la dirección del flujo de las mismas y el nivel freático estacional más alto de un sitio específico. Estos estudios utilizan un programa geológico e hidrogeológico y estudia a través de un monitoreo continuo de piezómetros y pozos para el monitoreo de aguas subterráneas ubicados a lo largo de la propiedad del relleno para determinar las aguas subterráneas, la dirección del flujo y la elevación. Este estudio es muy importante y se debe realizar antes del diseño y la construcción de un recubrimiento por debajo del nivel freático estacional máximo.

Los piezómetros se construyen en forma similar a los pozos para el monitoreo de aguas subterráneas con el único propósito de monitorear la profundidad de las aguas subterráneas y por lo tanto determinar la elevación de las estas. Las muestras de calidad de las aguas subterráneas no se toman de los piezómetros.

El nivel freático estacional más alto es el nivel de agua más alto que se mide o calcula en un sitio acuífero durante las investigaciones o el monitoreo de un sitio. Las mediciones del nivel de las aguas subterráneas que se utilizan para determinar el nivel freático estacional más alto deben incluir eventos de monitoreo documentados en años recientes en pozos de monitoreo existentes, así como en pozos de monitoreo instalados recientemente.

El nivel freático estacional más alto se prepara primero al realizar una representación gráfica de la ubicación de los pozos para el monitoreo de aguas subterráneas y los piezómetros y la elevación correspondiente en cada punto. Los intervalos del contorno de elevación de las aguas subterráneas se interpolan entre los puntos de monitoreo y luego se conectan los contornos de elevación de las aguas subterráneas para formar contornos de aguas subterráneas.

Este mapa del nivel freático estacional conforma la base para el diseño del recubrimiento del ingeniero diseñador. El nivel freático estacional más alto se debe reevaluar rutinariamente como parte de la evaluación del recubrimiento. Datos adicionales que pueden resultar en una revisión del nivel freático estacional más alto se pueden obtener de las lecturas de elevación de los pozos para el monitoreo de aguas subterráneas que se encuentran en el sitio o bien de los estudios de caracterización de las aguas subterráneas. El nivel freático estacional más alto no se debe ajustar hacia abajo.

En el reporte de evaluación de recubrimiento, por cada nuevo incremento de construcción de recubrimiento, el ingeniero debe proporcionar:

- una descripción del nivel freático estacional más alto;
- un resumen de los datos recolectados sobre aguas subterráneas, y
- un análisis del diseño del recubrimiento o de los requerimientos del balastro

5.3 Control a corto plazo de las aguas subterráneas

La construcción exitosa del recubrimiento depende de la capacidad de mantener una excavación estable y de controlar la filtración de las aguas subterráneas y la presión de levantamiento durante el período de la construcción. El recubrimiento de un relleno se debe diseñar con un método para evitar el levantamiento del recubrimiento durante la construcción, asegurar que el recubrimiento esté estable durante el llenado del relleno y demostrar que los fundamentos del recubrimiento son estables y adecuados para la construcción de un recubrimiento. Estos tres requerimientos se relacionan con el control a corto plazo de las aguas subterráneas desde el inicio de la construcción del recubrimiento hasta la finalización del balastro. El método más directo para controlar las aguas subterráneas es disminuir el nivel de las mismas a través de un sistema de decantación. El método apropiado de decantación es una función de las propiedades del suelo in-situ y del perfil del suelo, según se explica más adelante.

5.3.1 Caracterización de suelos in-situ

Los suelos in-situ que se encuentran en el fondo y en las paredes laterales de la excavación son el fundamento para el sistema de recubrimiento. Para efectos de discutir el control de las aguas subterráneas y elevar el potencial, los suelos in-situ del relleno consisten de capas heterogéneas de suelos que no tienen cohesión y suelos que sí la tienen.

5.3.2 Métodos de decantación

Entre los métodos de decantación se incluye el uso de un drenaje subterráneo a lo largo del piso de las celdas del relleno que se deberá extender hacia las paredes laterales hasta llegar a 30 cm sobre el nivel freático estacional más alto en dicha área del relleno. Los drenajes subterráneos pueden consistir de franjas de geocompuestos o pueden cubrir el piso de la celda y las pendientes laterales, zanjas rellenas de grava y/o de tuberías u otro medio para transportar el agua desde la base de la celda del relleno a un área de sumidero. Los drenajes subterráneos deben dirigir las aguas subterráneas a un sumidero que será bombeado a una velocidad suficiente para evitar el levantado del sistema de recubrimiento o bien una excavación abierta en la que el agua se pueda evacuar para evitar que dicha agua recargue el sistema de drenado subterráneo.

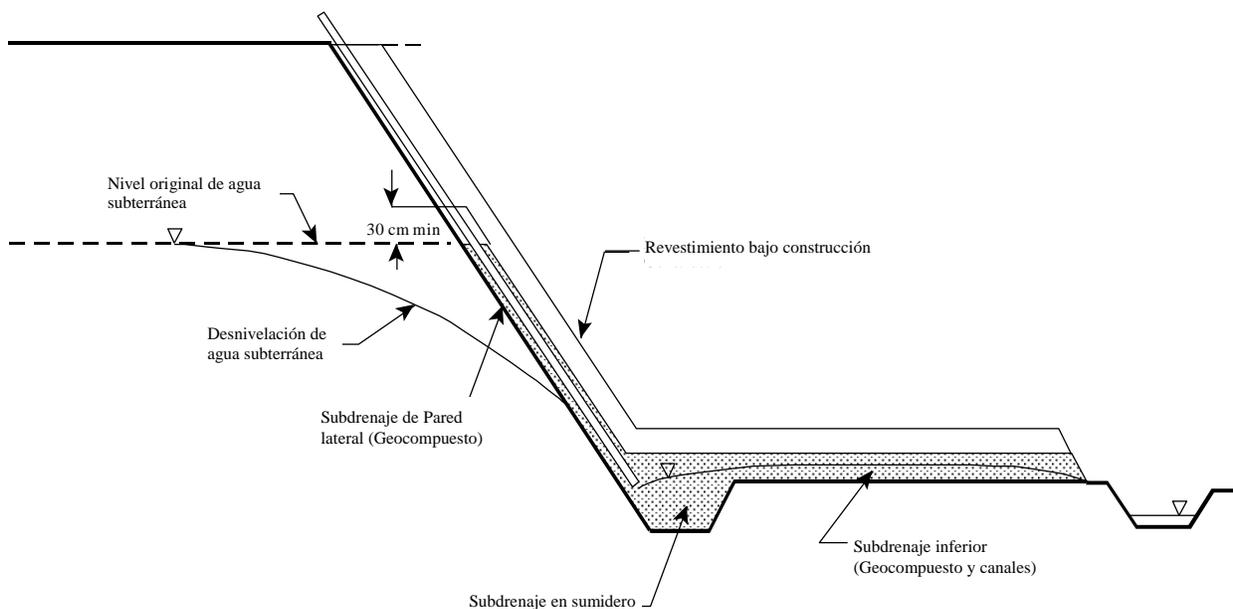


Figura 33: Detalle del drenaje subterráneo para decantación



Figura 34: Drenaje subterráneo para retirar aguas subterráneas

Colocar la primera carga de revestimiento de arcilla compactada en el subdrenaje no es algo que se logre fácilmente. Se debe tener cuidado de no dañar el drenaje subterráneo con el esfuerzo de compactación.

Adicionalmente, los pozos o sistemas individuales de remoción de agua también se pueden usar para controlar las presiones de levantado en el recubrimiento.

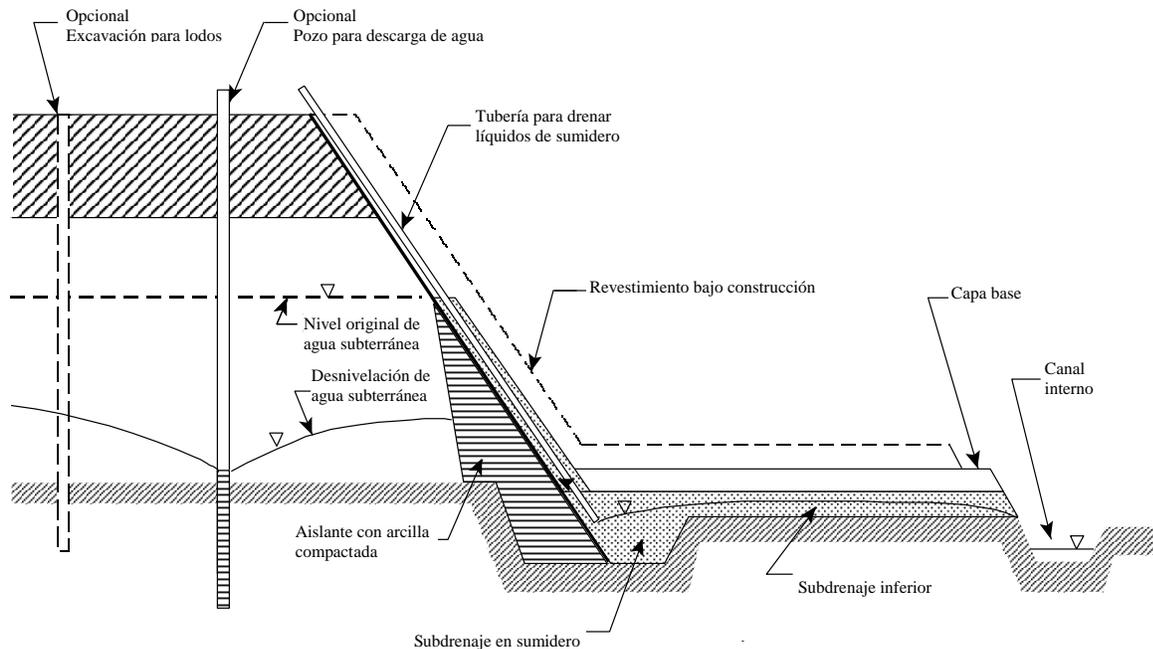


Figura 35: Detalle del drenaje subterráneo con pared lateral sin cohesión y fondo cohesivo.

5.4 Diseño de decantación y documentación del desempeño

El sistema de decantación debe ser diseñado por un ingeniero y debe incluir los índices estimados de filtración en el sistema y los tamaños de las zanjas, sumideros y bombas capaces de eliminar la filtración a la velocidad que ésta se acumule.

Los sistemas de decantación/drenaje subterráneo colocados para control de las aguas subterráneas se deben operar hasta que el recubrimiento y la capa final se coloquen y ya no se necesiten. El sistema debe ser monitoreado frecuentemente para asegurarse de que el sistema de decantación esté funcionando como se requiere durante la colocación de los balastros. Después de colocar el recubrimiento, el recubrimiento por sí mismo puede acomodar cierta cantidad de la fuerza de levantado, según lo que se describe en la siguiente función. La documentación para decantación deberá identificar este nivel aceptable y demostrar que el mismo no se sobrepasó.

5.5 Diseño de recubrimiento y balastro para condiciones de largo plazo

Después de la construcción del recubrimiento y colocación del balastro, el sistema de decantación/drenaje subterráneo se debe terminar con el entendimiento de que las aguas subterráneas eventualmente regresarán al nivel freático estacional más alto. El diseño debe evitar el levantamiento del recubrimiento después de que se haya desarrollado nuevamente la presión hidrostática. La resistencia al levantamiento a largo plazo propuesta proveerá de suficiente peso para contrarrestar la fuerza de levantamiento. La resistencia surgirá del peso de los componentes del sistema de recolección de lixiviados, la cubierta protectora, el balastro del suelo si fuera necesario, el balastro de los desechos y la cubierta final. En la Figura 21 se muestra un diagrama de las presiones hidrostática y la de gravedad sobre el recubrimiento.

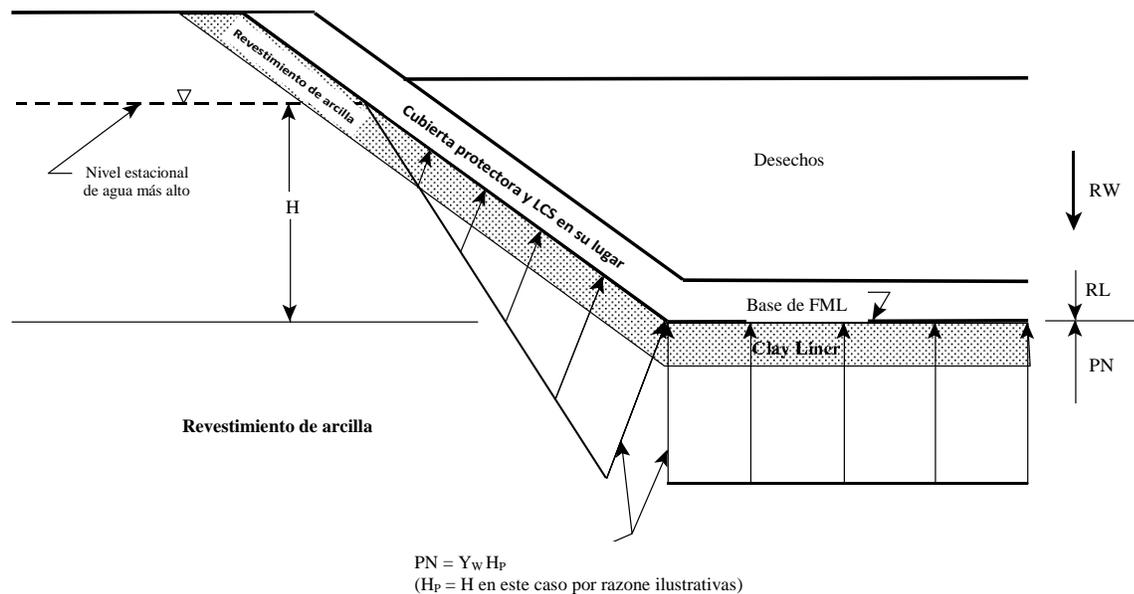


Figura 36: Detalle de la resistencia al levantamiento a largo plazo

La fuerza hidrostática ejercida por las aguas subterráneas en la superficie del fondo del recubrimiento del relleno es definida por una magnitud y una dirección. Debido a que no puede existir una tensión tangencial en un fluido, la dirección de la fuerza hidrostática resultante es perpendicular a la superficie del recubrimiento (Daugherty y Franzini, 1965). En ubicaciones específicas, las presiones de levantamiento hidrostático que actuarán en algún punto dado sobre el recubrimiento (es decir en el fondo de la geomembrana, etc.) se pueden calcular al multiplicar la unidad de peso del agua (γ_{agua}) por la carga de presión (H_p) en ese punto. La presión de levantamiento (PN) por lo tanto, se expresa como:

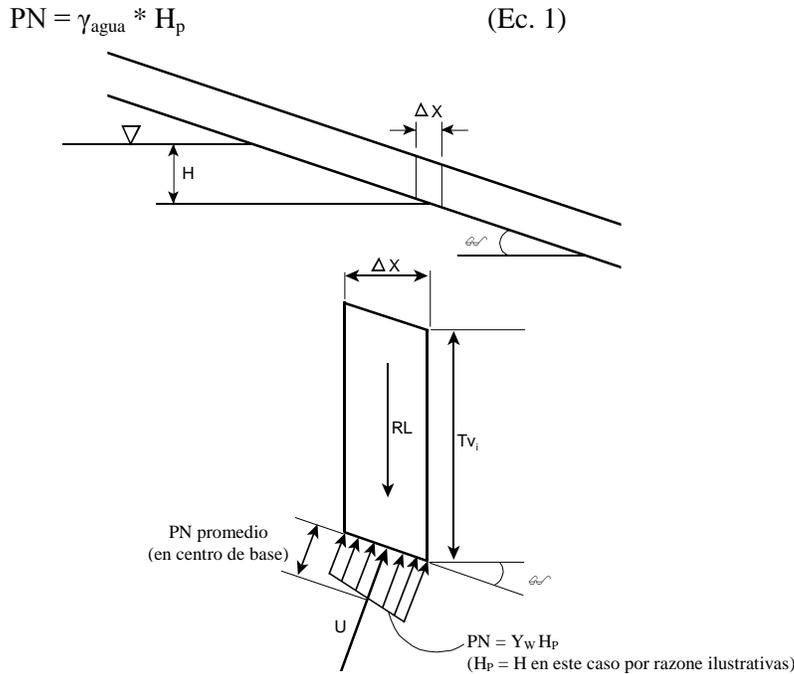


Figura 37: Estabilidad de levantado para elemento del sistema de recubrimiento

Para evaluar la estabilidad de levantado en un punto dado, considere un elemento del suelo y/o de desechos a dicho punto de espesor ΔX sujeto a la presión de levantado PN (Figura 22) a lo largo de la base del elemento. (en este caso simplificado, la carga de presión H_p equivale a la altura de la superficie de las aguas subterráneas H sobre el elemento.) La fuerza de levantado en el elemento (que actúa normal en la superficie del fondo) se calcula así:

$$U = PN_{\text{avg}} * \Delta X / \cos \beta \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde PN_{avg} es la presión de levantado en el centro de la superficie del fondo del elemento y β es el ángulo de la superficie del fondo respecto del ángulo horizontal o bien el ángulo de la pendiente. La fuerza resistente de la gravedad del elemento del sistema del recubrimiento en el punto dado puede expresarse de la siguiente forma:

$$RL = \Delta X * \sum (1/4 * T_{V_L}) \text{ o } RL = \Delta X * (1/4 * T_L + 1/4 * T_{PC} \dots) \quad (\text{Ec. 3})$$

En donde γ_i = peso unitario de cada componente del sistema de recubrimiento (recubrimiento γ_L , cubierta protectora γ_{PC} , etc.)

T_{V_i} = espesor vertical de cada componente del sistema de recubrimiento (recubrimiento T_L , cubierta protectora T_{PC} , etc.)

Se debe notar que con un sistema de revestimiento compuesto que consiste de una geomembrana que se coloca sobre un recubrimiento de arcilla construido, el peso unitario y el espesor vertical del componente del recubrimiento de arcilla no se incluye y no se considerará como cobertura.

Siempre que sea posible, el peso total de la unidad del recubrimiento se debe determinar del Proctor estándar o modificado realizado en el suelo que se va a utilizar como recubrimiento. Para un recubrimiento de arcilla compactado a un mínimo de 95% de densidad seca máxima ($\gamma_{d_{max}}$) y con un contenido de agua mínimo de humedad óptima (ω_{opt} , en formato decimal), la densidad total mínima del recubrimiento se expresa como:

$$\gamma_L = (0.95 * \gamma_{d_{max}}) * (1 + \omega_{opt}) \quad (\text{Ec. 4})$$

El peso unitario total del sistema de recolección de lixiviados y de los suelos de cubierta se debe calcular en el campo o en el laboratorio cuando sea posible.

La siguiente ecuación en la que se equilibran las fuerzas normales de la superficie del recubrimiento se deben satisfacer para que el elemento del sistema de recubrimiento se considere adecuado para resistir la fuerza de levantado normal con un factor adecuado de seguridad (FS_U) por sí mismo:

$$FS_U = RL * \cos \beta / U = \Sigma(\gamma_i * Tv_i) * \cos^2 \beta / (\gamma_{agua} * H) \geq 1.2 \quad (\text{Ec. 5})$$

Si se cumple la anterior ecuación en todas las ubicaciones del recubrimiento, entonces no se requiere de ningún balastro adicional para resistencia contra levantado a largo plazo.

Si el factor de seguridad contra el levantado es menor de 1.2 en cualquier punto del sistema de recubrimiento, entonces se debe agregar peso o un balastro a la parte superior del sistema de recubrimiento. El peso adicional puede ser en forma de suelo o desechos. Si se utiliza suelo, la fuerza de gravedad resistente (RS) del balastro del suelo es equivalente al peso unitario total del suelo (γ_s) multiplicado por el espesor (T_s) del balastro del suelo. Se debe agregar suficiente balastro del suelo para cumplir con la ecuación:

$$(RL + RS) * \cos \beta / U \geq 1.2 \quad \text{o} \quad \Sigma(\gamma_i * Tv_i) * \cos^2 \beta / (\gamma_{water} * H) \geq 1.2 \quad (\text{Ec. 6})$$

En donde γ_i y Tv_i incluyen a γ_s y T_s , respectivamente. Si se utilizan desechos como balastro, se deben cumplir los siguientes requerimientos.

- Los primeros 2 metros del espesor total del balastro, el que sea el menor, colocados en el sistema de recubrimiento, debe encontrarse libre de elementos grandes, los cuales dañarían las partes que se encuentran debajo del sistema de recubrimiento o bien no pueden ser compactadas a la densidad deseada.
- Los desechos deben compactarse hasta llegar a una densidad no menor de 600 kg/m³.

La fuerza de gravedad resistente de los desechos (RW) es igual al peso unitario total de los desechos ($\gamma_{\text{desechos}} = 600 \text{ kg/m}^3$) multiplicado por el espesor de los desechos (T_{desechos}). Se deben agregar suficientes desechos para cumplir con la ecuación:

$$(RL + RW) * \cos \beta / U \geq 1.5 \quad \text{o} \quad \Sigma(\gamma_i * Tv_i) * \cos^2 \beta / (\gamma_{\text{agua}} * H) \geq 1.5 \quad (\text{Ec. 7})$$

en donde γ_i y Tv_i incluyen a γ_{desechos} y T_{desechos} , respectivamente.

El método descrito anteriormente es simplificado y conservador, especialmente debido a que la configuración de la pendiente parte de un modelo de pendiente infinita cuando se coloca un balastro.

5.6 Puntos críticos de inspección

Tabla 10: Recubrimientos construidos por debajo del nivel freático - Puntos críticos de inspección

NO.	DESCRIPCIÓN	CUÁNDO	FRECUENCIA
5	Recubrimientos construidos por debajo del nivel freático estacional más alto		
5.1	El sistema de decantación y/o la construcción de balastro cuenta con un monitoreo a tiempo completo de la construcción en aspectos de aseguramiento de calidad y control de calidad.	En cada uno de los eventos de construcción	Por lo menos una vez por evento
5.2	Sistema de decantación construido y en funcionamiento	En cada uno de los eventos de construcción	Mensualmente hasta que el sistema de decantación ya no sea necesario.

6.0 DOCUMENTACIÓN Y REPORTES DE LA CONSTRUCCIÓN DE RECUBRIMIENTO

6.1 Reportes de evaluación de recubrimiento

Todas las pruebas de aseguramiento de calidad del recubrimiento se deben realizar conforme se indica en este manual. Los datos se deben preparar en el formato del Reporte de Evaluación de Recubrimiento.

Los límites de todos los recubrimientos construidos, incluyendo los más recientes que se cubren en la actual evaluación, se deben marcar claramente con marcadores de color rojo. Estos marcadores deben ser identificables por los trabajadores de los inspectores del sitio y se deben mantener en todo tiempo durante las operaciones activas de desecho dentro del área; se podrán eliminar conforme sea necesario para facilitar las operaciones al recibir aprobación de áreas recubiertas subsiguientemente en el relleno. Las marcas en el reporte de evaluación de recubrimiento deben tener una altura mínima de 1.8 metros y se deben colocar a 300 metros de distancia. Las marcas del reporte de evaluación del recubrimiento no se deben colocar a través del recubrimiento construido.

Cada reporte de evaluación de recubrimiento debe incluir un mapa del sitio claramente legible en el que se describa el sistema coordinado de rejillas para el sitio, la escala gráfica, flecha hacia el norte, el diseño de llenado sectorizado, el plan, el área llenada, el área activa actual y el área cubierta por el envío actual. El mapa del sitio debe mostrar las áreas cubiertas en todos los reportes de evaluación de recubrimiento anteriores. Puede ser una impresión de un dibujo maestro en el que se realicen anotaciones y se actualice con cada remisión de reporte de evaluación de recubrimiento. Adicionalmente, cada reporte de evaluación de recubrimiento debe incluir todo o parte de los siguientes artículos según sea lo apropiado y dependiendo de los elementos construidos en el recubrimiento:

- Toda la documentación de pruebas de campo y de laboratorio realizadas en los suelos del recubrimiento y ubicaciones en donde se realizaron éstas en un plano de localización;
- Toda la documentación de pruebas realizadas en las capas de recolección de lixiviados y en la capa de cobertura protectora;
- Toda la documentación de pruebas realizadas en la geomembrana, incluyendo las certificaciones del fabricante, la documentación de todos los fabricantes y las pruebas independientes, selladuras y registros de reparaciones, pruebas en las selladuras y un mapa del sitio en donde se muestren los paneles, las reparaciones y las pruebas;
- Documentación sobre la certificación del fabricante y pruebas realizadas en todos los

- geosintéticos y
- Documentación sobre la evaluación del espesor del recubrimiento del suelo, recolección de lixiviados, capa de cobertura protectora y ubicación de las zanjas, tuberías y sumideros para la recolección de lixiviados.

Todas las muestras de campo y de laboratorio realizadas a los componentes del recubrimiento y su construcción se debe encontrar bajo la supervisión directa de un Ingeniero Certificador o por su representante calificado. Cualquier área recubierta completada que no cumpla con las condiciones específicas mínimas requeridas en las pruebas se debe trabajar nuevamente o reconstruir hasta alcanzar los resultados requeridos. El no poder alcanzar los resultados requeridos a través del reprocesamiento será una causa de rechazo del área en cuestión. Todas las áreas en que se trabaje de nuevo se deberán probar nuevamente para determinar si cumplen adecuadamente con los requerimientos aplicables.

Un Reporte de Evaluación de Recubrimiento común debe incluir:

1. Narrativa
 - a. Personal de construcción
 - b. Documentos de referencia
 - c. Servicios de aseguramiento de calidad y control de calidad en la construcción
 - d. Actividades de construcción
 - i. Suelo
 - ii. Geosintéticos
 - iii. Sistema de recolección de lixiviados
 - iv. Cubierta protectora
 - e. Demás información pertinente
 - i. Decantación
 - ii. Balastro
 - iii. Otros
 2. Certificados de finalización
 - a. Recubrimiento del suelo
 - b. Subrasante
 - c. Geosintéticos
 - d. Sistema de recolección de lixiviados
 - e. Cubierta protectora
 3. Pruebas de preconstrucción
 - a. Suelo
-

- i. Recubrimiento del suelo
 - ii. Drenajes y suelo de cubierta protectora
 - iii. Piedra de drenaje
 - b. Geosintéticos (del fabricante)
 - i. Geomembrana
 - ii. Geored, geotextil, geocompuesto
 - c. Geosintético, conformación (de las pruebas de aseguramiento de calidad / control de calidad)
 - i. Geomembrana
 - ii. Geored, geotextil, geocompuesto
 - iii. Inventario de todos los geosintéticos
- 4. Pruebas de la construcción
 - a. Recubrimientos del suelo
 - i. Densidades de campo
 - ii. Permeabilidades
 - iii. Propiedades del suelo
 - iv. Mapas de la ubicación de las pruebas
 - b. Geosintéticos
 - i. Soldadura de prueba
 - ii. Colocación del panel
 - iii. Selladura del panel
 - iv. Pruebas no destructivas
 - v. Pruebas destructivas
 - vi. Reparaciones
- 5. Hojas de vida
 - a. Topógrafo
 - b. Instalador de geosintéticos
 - c. Aseguramiento de calidad y control de calidad en la construcción
- 6. Fotografías de la construcción
- 7. Registrar dibujos de la evaluación
 - a. Recubrimiento del suelo
 - b. Recubrimiento de la geomembrana
 - c. Sistema de recolección de lixiviados
 - d. Cubierta protectora

No se puede utilizar ningún área para la recepción de desechos sólidos hasta que sea aceptada.

6.2 Balastro

Los recubrimientos que se construyen debajo de la capa freática requieren de varios elementos de evaluación y aseguramiento de calidad, más allá de los requerimientos que se muestran en el reporte básico de evaluación del recubrimiento. La mayor parte de estas actividades de documentación adicional y evaluaciones se realizan como parte del diseño del recubrimiento antes de la construcción o al mismo tiempo en el que se realiza el monitoreo de la construcción del recubrimiento de arcilla. Para evitar la duplicación en los requerimientos de reportes, estas actividades se deben incluir de forma lógica en el reporte de evaluación del recubrimiento. La documentación y evaluación incluyen lo siguiente:

- Resumen de la estratigrafía del suelo y las propiedades de los suelos expuestos al fondo y en las paredes laterales del área que se está recubriendo.
- El nivel freático estacional más alto ajustado, datos de pozo de monitoreo de aguas subterráneas o demás datos.
- Cálculo del balastro requerido y tipo de balastro a utilizar (suelo o desechos).
- Discusión sobre la necesidad en la subrasante de un sistema de drenaje subterráneo u otro método de decantación.
- Método para controlar las fuerzas de levantado durante la construcción (suelo de baja permeabilidad para los fundamentos, decantación, o una combinación de ambos).
- Monitoreo del sistema de decantación para demostrar que las fuerzas hidrostáticas no se desarrollaron durante la construcción del recubrimiento.
- Elevaciones pre-construcción y en parte superior del recubrimiento y confirmación del peso del recubrimiento. Las elevaciones de la evaluación se deben realizar en la frecuencia requerida en este manual.

6.2.1 Suelo como balastro

Si se debe utilizar suelo como balastro, se debe colocar inmediatamente después de la construcción de la cubierta protectora. El reporte de evaluación del recubrimiento debe documentar la densidad y espesor del balastro del suelo. El espesor del balastro de suelo se debe evaluar con la misma frecuencia que se requiere en este manual en el caso del recubrimiento.

6.2.2 Desechos como balastro

Si se utiliza desechos como balastro, se debe preparar un reporte de seguimiento en la forma del Reporte de Evaluación de Balastro. El reporte debe incluir la siguiente información:

- Peso del compactador que se utilice para compactar los desechos no debe ser menor de 18,000 kg y debe haber un certificado del propietario en el que se certifique que este compactador se utilizó durante todo el período de la colocación del balastro de desechos.
- Certificado del propietario en cuanto al tipo de desechos colocados en el área inferior de 1.5 metros.
- Si no se utilizó un compactador de 18,000 kg, se deben proveer cálculos para demostrar que la densidad de los desechos colocados no es menor a 600 kg/m^3 . Estos cálculos deben incluir lo siguiente:
 - Evaluación inicial del área que recibirá desechos como balastro;
 - Evaluación final y volumen calculado de desechos colocados como balastro y
 - Peso de los desechos colocados, en base a las mediciones reales del peso del camión en la balanza.
- Evaluación de la parte superior de los desechos para documentar que el espesor calculado en el reporte de evaluación del recubrimiento se haya colocado.
- Documentación que demuestre que el sistema de decantación utilizado para disminuir el nivel de las aguas subterráneas durante la construcción del recubrimiento estuvo en funcionamiento hasta la finalización de la colocación del balastro.
- Mediciones sobre el nivel de las aguas subterráneas y mediciones del piezómetro neumático de alambre vibrante para demostrar que las alturas hidrostáticas no excedan los valores permitidos.

Se deberá preparar un reporte de evaluación de balastro después de haber colocado suficiente balastro para demostrar una resistencia adecuada contra el levantado para contrarrestar el nivel freático estacional máximo para una celda de desechos, sector o área de reporte de evaluación determinada.

6.3 Puntos críticos de inspección

Tabla 11: Puntos críticos de la inspección en la documentación de construcción del recubrimiento

NO.	DESCRIPCIÓN	CUÁNDO	FRECUENCIA
6	Documentación e informes sobre la construcción del recubrimiento		
6.1	Reporte de evaluación de recubrimiento	En cada uno de los	Por lo menos una

NO.	DESCRIPCIÓN	CUÁNDO	FRECUENCIA
		eventos de construcción	vez por evento
6.2	Reporte de evaluación de balastro.	En cada uno de los eventos de construcción	Por lo menos una vez por evento

7.0 CONSTRUCCIÓN DE POZOS DE MONITOREO DE AGUAS SUBTERRANEAS

Esta guía describe la instalación de un pozo de monitoreo de aguas subterráneas en un relleno sanitario. El propósito de un pozo de monitoreo es proveer muestras de agua que representen las condiciones de las aguas subterráneas en su ubicación. Un laboratorio realiza pruebas en el agua buscando indicaciones de un impacto ambiental del relleno sanitario.

El propósito de un sistema de monitoreo de aguas subterráneas en un relleno es proveer muestras de agua que representen las condiciones de las aguas subterráneas in-situ. Los análisis de las muestras de laboratorio se utilizan para determinar si el relleno está generando un impacto en las aguas subterráneas. Después de instalar el sistema de monitoreo de las aguas subterráneas, se recolectan muestras a una frecuencia intencional para determinar la variación natural estacional en la química de las aguas subterráneas (comúnmente, una vez cada tres meses). Se analiza en las muestras la presencia de metales y constituyentes orgánicos volátiles.

Se debe instalar un sistema de monitoreo de aguas subterráneas alrededor del perímetro del sitio del relleno con una cantidad suficiente de pozos de monitoreo instalados en ubicaciones y a profundidades apropiadas para presentar muestras representativas de las aguas subterráneas del acuífero que se encuentra más arriba. Este sistema de monitoreo de aguas subterráneas se debe diseñar en base a un estudio hidrogeológico detallado de la propiedad en donde se ubica el relleno. Los pozos para el monitoreo de aguas subterráneas se deben colocar a una distancia máxima de 250 metros uno del otro y alrededor del perímetro descendente del sitio en donde se ubica el relleno. Si el agua fluye a través del sitio, se puede colocar una cantidad apropiada de pozos ascendentes en el relleno para proveer una mejor indicación de las condiciones del agua. Los pozos ascendentes comúnmente se espacian a intervalos mucho mayores que los pozos descendentes. Los pozos ascendentes se pueden espaciar a 500 o más metros de distancia. Se puede realizar un espaciamiento menor de pozos ascendentes dependiendo de las condiciones específicas del sitio.

Detalles adicionales del diseño del sistema de monitoreo de aguas subterráneas y el monitoreo de aguas subterráneas se pueden encontrar en el siguiente enlace de red:

<http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/landfill/finacial/gdwmswl.htm>.

Después de haber obtenido por lo menos cuatro muestras, se conduce el monitoreo de detección. En el monitoreo de detección se comparan los resultados de muestras actuales con valores históricos (antecedentes) para determinar si el relleno está ejerciendo un impacto en las aguas subterráneas. Si los resultados de Detección de monitoreo muestran un punto posible en el relleno, se puede realizar monitoreo de evaluación en los pozos con el impacto aparente. Los resultados de Monitoreo de evaluación se utilizan para confirmar si un relleno está teniendo un impacto en las aguas subterráneas. El monitoreo de evaluación incluye recolectar muestras de agua que se analizan en un rango expandido de constituyentes, incluyendo metales, constituyentes orgánicos volátiles, constituyentes orgánicos semi-volátiles, herbicida organoclorado, bifenoles policlorinados, herbicidas y otros parámetros.

Para obtener información adicional sobre los sistemas de monitoreo de aguas subterráneas y sobre el monitoreo de aguas subterráneas, diríjase a:

<http://www.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/landfill/techman/subparte.pdf>

7.1 Importancia primaria de la seguridad en el lugar de trabajo

La perforación es un proceso potencialmente peligroso que puede ocasionar heridas severas e incluso la muerte. Por lo tanto, la seguridad debe ser la principal prioridad en el lugar de trabajo. Se debe realizar una reunión de seguridad al inicio del trabajo para discutir temas sobre cómo cumplir con los objetivos del proyecto en forma segura. Se debe prestar especial atención a la ubicación de los servicios públicos, peligros específicos del sitio, capacitación y mantenimiento adecuado para el equipo y riesgos por explosiones en perforaciones por cercanía a sitios de disposición final activos y/o clausurados.

7.2 Importancia de la limpieza en los procedimientos

El monitoreo de pozos en rellenos sanitarios se instala generalmente en áreas que no sean impactadas por la polución. Por lo tanto, si las aguas subterráneas existentes están «limpias», esto significa que están libres de impactos ambientales de cualquier clase. Los laboratorios prueban las muestras de agua obtenidas de los pozos para evidenciar la presencia de contaminantes en un rango de partes por mil millones. Por lo tanto, es crítico que todos los materiales de construcción y todo el equipo de perforación de pozos sea previamente limpiado antes de empezar con el proceso de instalación. Cualquier contaminación que se haya introducido inadvertidamente en el proceso de instalación - como la grasa en las tuberías del pozo - podría tener efectos perjudiciales a largo plazo en la calidad de las muestras de agua.

Los materiales para la construcción de pozos como la arena, bentonita y las tuberías de PVC se envían al lugar de trabajo con envolturas protectoras. No se deberá permitir pilas abiertas de arena o de otros materiales de construcción en el lugar de trabajo.

7.3 Monitoreo del diseño del pozo

Los pozos de monitoreo generalmente se construyen con tubos de PVC. Los componentes individuales de los tubos se pueden enroscar; no se necesita goma o solventes en el proceso de ensamblaje e instalación. La sección del fondo de las tuberías del pozo se debe filtrar. El filtro del pozo es la tubería PVC ranurada para que ingresen allí las aguas subterráneas. El monitoreo de la longitud del filtro del pozo es variable y depende de las condiciones del sitio. Tres metros es una longitud común para un filtro de pozo de monitoreo de relleno sanitario.

La profundidad del pozo es también variable y depende de las condiciones del sitio. Generalmente, la base del filtro del pozo se coloca para monitorear la base de la excavación del relleno sanitario adyacente. Una excepción a este lineamiento sería si la capa freática se encuentra debajo de esta elevación. Si el filtro del pozo se coloca sobre la capa freática, no se podrá obtener muestras de agua. Si la profundidad de las aguas subterráneas es desconocida, pero se encuentran posiblemente debajo de la base de la excavación del relleno sanitario, entonces se deben proveer métodos de perforación y materiales suficientes para permitir la toma de una decisión en cuanto a la colocación de la malla, utilizando condiciones que se hayan encontrado en el campo para guiar dichas decisiones en cuanto al diseño.

Después de que la malla y las tuberías se hayan colocado, el espacio anular entre la malla y la pared de perforación se rellena con arena (el «relleno de arena»). El relleno de arena estabiliza la tubería y actúa como filtro a través del cual viajan las aguas subterráneas hacia la malla del pozo.

Por encima del relleno de arena de la malla del pozo, se coloca arcilla de bentonita aproximadamente ½ metro de la superficie. La arcilla de bentonita evita la infiltración de agua de la superficie. Finalmente, se coloca una placa de concreto sobre la superficie (ver Figura 40).

7.4 Actividades previas en el campo

7.4.1 Determinación de las condiciones esperadas en las aguas subterráneas y geología

El proceso de instalación de un pozo de monitoreo es más fácil en su planificación e implementación si se

obtiene información confiable y específica para el sitio sobre la geología y las aguas subterráneas antes de iniciar el trabajo de campo. Las condiciones específicas del sitio afectarán la elección de métodos de perforación y aspectos del diseño de pozo de monitoreo, tales como la elevación de la malla y la profundidad total del pozo.

7.4.2 Selección del método de perforación adecuado

El método de perforación más común y eficiente para un pozo de monitoreo no profundo es la perforación de hueco interior a longitud de pieza perforadora. Este método es adecuado para pozos relativamente superficiales en materiales geológicos relativamente blandos tales como suelos, arcillas o bien materiales no consolidados. La perforación de hueco interior de tubo perforador generalmente no es efectiva en roca dura o en pozos que tienen una profundidad mucho mayor a los 15 metros.

Si se espera encontrar roca dura y/o una instalación de un pozo profundo, consulte con su subcontratista de perforación sobre el método de perforación adecuado en estos casos. El realizar estas consultas al subcontratista de perforaciones durante el proceso de planificación facilitará la perforación misma y el proceso de instalación.

7.4.3 Selección de materiales para el pozo

Los materiales para la instalación del pozo son adquiridos normalmente por el subcontratista de perforaciones, en base a especificaciones detalladas remitidas por el contratista principal. Los detalles sobre la cantidad de pozos y la profundidad de los mismos permitirán que el subcontratista de perforaciones adquiera la tubería necesaria de PVC, la malla de PVC, arena, bentonita y el concreto requeridos para completar el trabajo.

La malla y la tubería para los pozos tienen 5 cm de diámetro en el más común de los casos. La malla para el pozo se selecciona en base al tamaño de partículas del relleno de arena y a las condiciones de formación geológica. La tubería con malla se adquiere del fabricante con ranuras para el ingreso de agua cortadas con maquinaria para controlar sus dimensiones cuidadosamente. A continuación se muestra el detalle de un pozo de monitoreo de aguas subterráneas común o piezómetro.

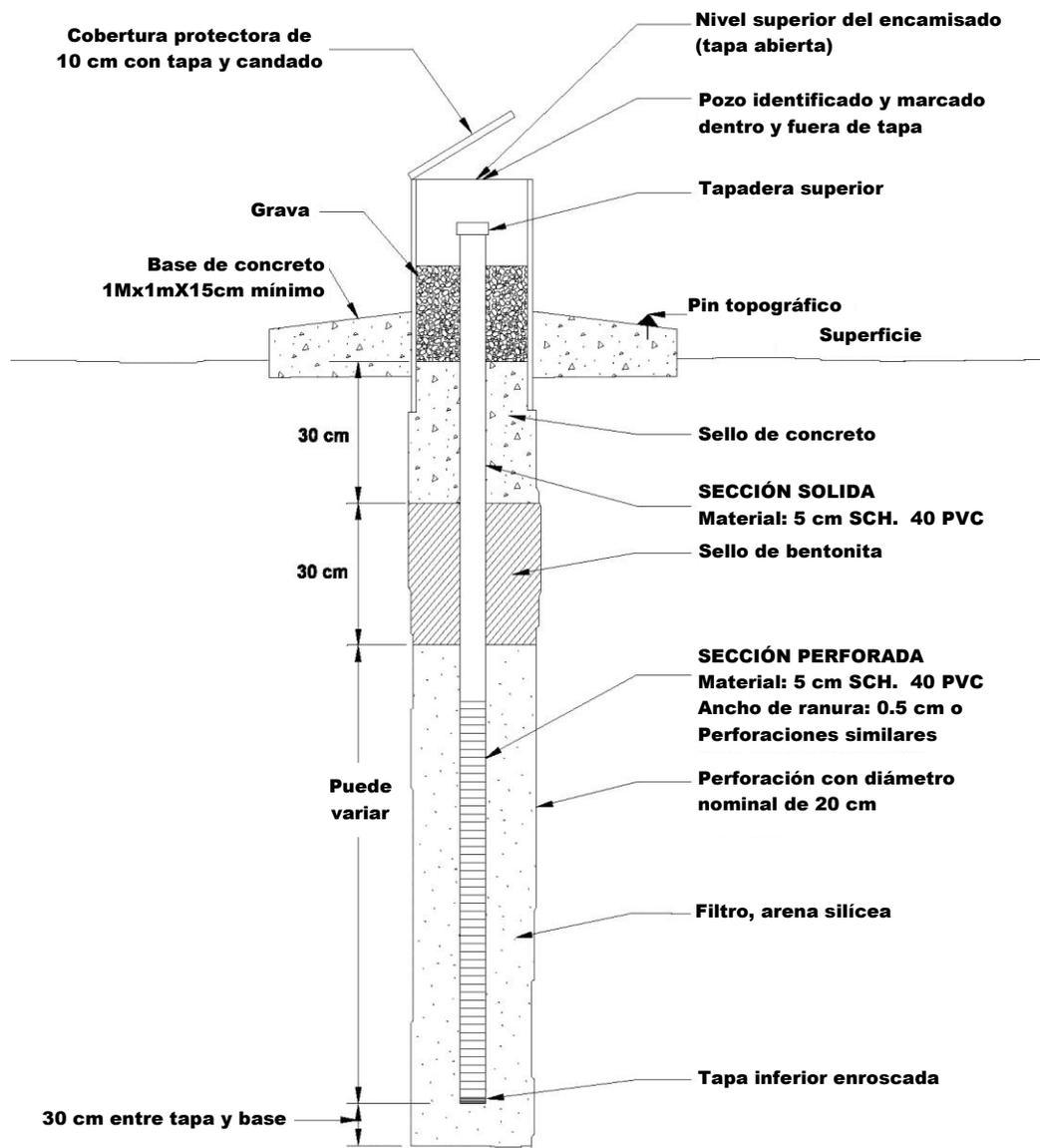


Figura 38: Detalle de un pozo de monitoreo de aguas subterráneas común o piezómetro.

7.5 Actividades de campo

7.5.1 Seguridad

La seguridad es la principal prioridad en el lugar de trabajo. Se debe preparar un Análisis de seguridad en el lugar de trabajo para todas las actividades que se llevan a cabo en un relleno. Este Análisis de seguridad en el trabajo deberá incluir lo siguiente:

- Revisar el Plan de salud y seguridad específico del sitio al inicio del trabajo.
- Conducir reuniones de seguridad diariamente con el personal.
- Evaluar ubicación de la perforación para confirmar que esté libre de instalaciones de servicios.

- Colocarse casco protector, chaleco de seguridad, botas de seguridad, lentes de seguridad y protección para los oídos.
- Mantenerse lejos del área de trabajo de los perforadores y lejos de la maquinaria pesada a menos que se requiera lo contrario para realizar el trabajo.
- Mantenerse lejos de las perforaciones que sean potencialmente inestables.
- Trabajar hacia arriba o en forma cruzada, nunca hacia abajo con maquinaria pesada.

Un tema de seguridad crítico que se debe abordar al inicio del trabajo es realizarlo en áreas libres de todas las instalaciones de servicios públicos - incluyendo líneas de electricidad, agua subterránea, alcantarillados y tuberías para transmisiones eléctricas y de hidrocarburos. Realice consultas al personal basado en el sitio que tenga conocimiento de las condiciones locales, así como a las empresas proveedoras de servicios públicos para determinar la proximidad de las líneas de los mismos. Nunca inicie un trabajo hasta haber resuelto toda incertidumbre relacionada con las líneas de los servicios públicos.

El trabajo de campo dará inicio con una reunión de orientación en seguridad en el trabajo para abordar todos los peligros asociados con la realización del trabajo. Todos los empleados que estarán involucrados en el trabajo de campo deben estar presentes en la reunión de seguridad. Todo el personal que trabaje en el área del equipo de perforación debe tener en todo tiempo puesto un casco protector, zapatos con punta de acero y lentes protectores.

7.5.2 Selección de la ubicación para la perforación

Las ubicaciones para perforación se seleccionan comúnmente antes de la llegada al lugar de trabajo. Un evaluador continuamente vigila estas ubicaciones utilizando las coordenadas proporcionadas por el contratista principal. Al arribo al área de trabajo, después de la observación del evaluador de ubicación, se debe realizar ajustes en la misma para evitar obstáculos como vegetación o suelo disperejo o fangoso.

El equipo de perforación requiere de un área de suelo a nivel de por lo menos diez metros de diámetro, así como un trayecto para llegar a la ubicación de perforación. El equipo de perforación se monta comúnmente en camiones con llantas de hule que sean pesados y con poca movilidad fuera del camino, razón por la cual debe haber un camino adecuado hacia el lugar. Esto pudiera requerir de una limpieza y nivelación realizada con equipo pesado antes de la llegada del subcontratista a cargo de realizar la perforación. En condiciones de humedad/suelo mojado y con lodo, en ocasiones se hace necesario esparcir grava para crear una superficie en la que se pueda transitar para acceder al sitio en el que se va a llevar a cabo la perforación.

7.5.3 Instalación del pozo de monitoreo

Algún equipo y algunos métodos de perforación requieren de agua como parte del proceso de perforación. Esta agua debe enviarse a través de la perforación, por lo tanto el agua debe estar limpia. Los perforadores no pueden utilizar agua de la superficie de lagunas, de tierras con agua en donde se encuentra el ganado, etc., para realizar la perforación debido a que podría estar contaminada.

El equipo para realizar perforaciones se debe descontaminar antes de su uso y entre pozos. Esto requiere de un equipo de limpieza especializado que se debe dejar en el sitio como parte del equipo de trabajo requerido. El supervisor de trabajo debe observar el proceso de limpieza y/o verificar el equipo inmediatamente antes de que sea utilizado.

Una vez descontaminado el equipo para realizar perforaciones y colocado en una ubicación apropiada, se puede iniciar con el proceso de perforación e instalación del pozo. El proceso de perforación de hueco interior de tubo perforador se realiza de forma rápida (sumiendo la presencia de materiales geológicos adecuados); un hoyo de 15 metros con frecuencia se puede terminar en aproximadamente dos horas.

El proceso de instalación del pozo se debe documentar para efectos posteriores de elaboración de reportes. Refiérase al Apéndice D para un formulario de ejemplo que se puede utilizar para la documentación de campo y también para efectos de reportes formales.

Durante el proceso de perforación, se debe documentar cualquier indicación de agua debajo de la superficie. Las indicaciones pueden variar entre cortes con humedad presente a condiciones saturadas. Anotar la profundidad a la que se encontró el agua determinará decisiones tales como la posición de la malla y los métodos de perforación y finalización del trabajo.

Después de que la perforación alcance la profundidad deseada, se construirá el pozo en el agujero perforado. En la base de la malla del pozo se coloca una sección de ½ metro de tubería PVC para que funcione como una bomba. El propósito del sumidero es proveer un lugar para que se asienten los materiales finos sin afectar o atascar la malla del pozo.

La sección ensamblada del sumidero/de la malla se coloca más abajo en el hoyo perforado. Se adjuntan tuberías adicionales de PVC conforme se baja la tubería inicial, hasta llegar al fondo del hoyo. Todos los componentes de la tubería se conectan utilizando conexiones atornilladas; no se puede utilizar goma, cemento o solventes en la construcción del pozo para evitar la introducción de estos contaminantes a las muestras de agua que se obtienen después de la instalación del pozo.

Al finalizar el armado y colocación de la tubería PVC, se permite que aproximadamente un metro de tubería sobresalga del suelo (esta sección es conocida como «stick up»). Se debe colocar una tapa de plástico a la tubería para evitar el ingreso de materia ajena.

Ahora se coloca la arena en la corona circular entre el tubo de PVC y la pared lateral perforada. Se coloca arena hasta que llegue $\frac{1}{2}$ metro por sobre la malla.

Sobre la arena se bombea la mezcla para juntas de bentonita en la corona circular usando una tubería. La mezcla se debe emplazar con la arena hasta llegar a $\frac{1}{2}$ metro de la superficie del suelo.

Ahora se ha colocado un recubrimiento protector de metal alrededor del palo que sobresale del suelo. El recubrimiento debe tener una tapa asegurable para permitir el acceso al tubo de PVC para la realización de muestras. El recubrimiento de metal se empuja en el suelo aproximadamente $\frac{1}{2}$ metro y luego se asegura con el compactador neumático de concreto.



Figura 39: Pozo para el monitoreo de aguas subterráneas

La plancha de concreto está formada de dos tablas de madera para conformar una plancha de dimensiones típicas, 1 metro x 1 metro x 10 cm. En el área de la tabla que se llenará de cemento se coloca una malla con refuerzo de acero. La plancha de cemento se puede proteger para evitar daños al instalar postes de metal («bolardos») alrededor de la plancha. Estos postes se deben instalar a aproximadamente 0.1 metro fuera de la plancha, no en la plancha.

Al concluir con los pasos anteriores en todos los pozos, comúnmente se emplea un GPS para proveer mediciones exactas de la latitud y longitud final, así como la elevación de la parte superior del tubo de PVC del pozo.

El recubrimiento del pozo se debe marcar con el número del pozo y la latitud, longitud y elevación de la parte superior del tubo de PVC del pozo.

7.5.4 Desarrollo del pozo de monitoreo

Los pozos de monitoreo se desarrollan después de la instalación y antes de la realización de muestras. El desarrollo es el proceso de eliminación de todas las perforaciones y demás materiales extraños del pozo. El cronograma del desarrollo de los pozos depende de cuánto tiempo se necesite para que las aguas subterráneas entren al pozo. Después de la instalación, posiblemente se requiera de una semana para que los materiales de perforación se asienten en el pozo y que las aguas subterráneas entren en el mismo.

El desarrollo se puede realizar usando una diversidad de herramientas y equipo; se puede consultar al perforador sobre el mejor método (o los mejores métodos) para lograr un buen desarrollo. También se puede contratar al perforador para que proporcione servicios de desarrollo.

Para cumplir con el desarrollo, primeramente se empuja con cuidado el pozo dentro de la malla del pozo. Sumergirlo de forma muy vigorosa puede colapsar la malla y arruinar el pozo. La herramienta para sumergir actúa también como un pistón dentro de la malla del pozo. Se puede utilizar un material que sea levemente menor en diámetro que la malla del pozo. Esto podría incluir una varilla de acero inoxidable o bien un tubo PVC con pesos y tapadera. La herramienta debe tener pesos para que se hunda en la columna de agua. El tubo PVC se debe llenar de arena y se le deben colocar tapas en cada uno de los extremos. La herramienta debe ser descontaminada y colocada dentro del pozo y con cuidado levantarla y hundirla dentro de la malla del pozo, forzando a que el agua entre y salga del pozo, al mismo tiempo que se están separando los sólidos del relleno de arena y se los está llevando al pozo para su eliminación. Esta acción ayuda a romper materiales no deseables que puedan encontrarse en el relleno de arena y al mismo tiempo se dirigen estos materiales no deseables hacia la malla del pozo, en donde se asientan en el área del sumidero. Estos materiales de granos finos posteriormente se pueden retirar del sumidero utilizando un achicador con una válvula de pie. Como una alternativa, se podría utilizar una bomba eléctrica para el desarrollo. Algunos tipos de bombas eléctricas no están diseñadas para bombear aguas turbias que contengan algunos sólidos, por lo que se recomienda ser precavidos al seleccionar el equipo apropiado.

Estas operaciones se realizan en varios ciclos hasta que se hayan eliminado todos los materiales no deseados y el pozo esté limpio. El agua que produce el pozo comúnmente cambia de ser agua turbia al inicio a un agua clara al final del proceso.

El proceso de desarrollo del pozo se documenta al obtener en forma regular muestras de aguas con un achicador a lo largo del proceso de desarrollo. Por cada muestra de agua se debe registrar la hora a la cual se obtuvo la muestra, la cantidad de agua eliminada, la apariencia visual y las mediciones con instrumentos, incluyendo la temperatura, el pH y la conductividad específica. Conforme se limpie el pozo, las muestras de agua se volverán menos y menos turbias y las lecturas de los instrumentos se estabilizarán.

El tiempo que se requiere para completar este proceso para un pozo varía en gran manera. Comúnmente, cuatro horas es la cantidad máxima de tiempo que se invierte en el desarrollo de un pozo. Sin embargo, si el pozo se filtra en una formación rica en arcillas, el agua podría permanecer turbia aún después de muchos ciclos de desarrollo. Si aparentemente después de muchos esfuerzos no se evidencian cambios, se deberá concluir con el esfuerzo del desarrollo.

Después de completar el desarrollo, el pozo estará listo para la realización de muestras. El área que se encuentra alrededor del pozo se debe limpiar y se deben eliminar todos los escombros. El recubrimiento del pozo se deberá cerrar y asegurar.



Figura 40: Finalización del pozo de monitoreo de aguas subterráneas con recubrimiento, seguro y plancha de concreto

Para obtener información adicional sobre los métodos para la realización de muestreo en aguas subterráneas, así como el equipo a utilizar, refiérase a: Guía ASTM D 4448-85A (1992), «Guía para el muestreo de pozos para el monitoreo de aguas subterráneas».

7.6 Puntos críticos de la inspección

Tabla 12: Puntos críticos de la inspección de pozos para el monitoreo de aguas subterráneas

NO.	DESCRIPCIÓN	CUÁNDO	FRECUENCIA
7	Pozo para el monitoreo de aguas subterráneas		
7.1	Recubrimiento protector de metal.	Después de la construcción	Cada evento de monitoreo de aguas subterráneas
7.2	Plancha de concreto	Después de la construcción	Cada evento de monitoreo de aguas subterráneas
7.3	Área alrededor del pozo de aguas subterráneas y plancha de concreto libre de escombros.	Después de la construcción	Cada evento de monitoreo de aguas subterráneas
7.4	Recubrimiento protector cerrado.	Después de la construcción	Cada evento de monitoreo de aguas subterráneas
7.5	El pozo de monitoreo tiene una tapa removible.	Después de la construcción	Cada evento de monitoreo de aguas subterráneas
7.6	Se evaluó la latitud, longitud y las elevaciones del pozo de monitoreo.	Después de la construcción	No aplica
7.7	Otro pozo para el monitoreo de aguas subterráneas	Según se requiera	Según se requiera

8.0 CONSTRUCCIÓN DE SONDA PARA EL MONITOREO DE BIOGÁS EN EL RELLENO

El gas metano tiene el potencial de migrar literalmente de las celdas de desechos del relleno. Para monitorear y detectar gas que pueda migrar fuera de los límites del área de relleno de desechos, se debe instalar un sistema de monitoreo a lo largo del perímetro del sitio para proporcionar cobertura en las áreas de desecho adyacentes.

El objetivo de un sistema de monitoreo de biogás es asegurar que la concentración del gas metano no exceda el límite inferior de explosión para el metano en los límites de la propiedad en donde se encuentran las instalaciones. El «límite inferior de explosión» significa el porcentaje más bajo por volumen de una mezcla de gases explosivos en el aire que propagarán una llama a 25° centígrados y presión atmosférica.

El metano es explosivo cuando se encuentra presente en el rango de 5% a 15% por volumen en el aire. El

umbral inferior (5% para metano) se llama límite inferior de explosión (LIE) o LEL por sus siglas en inglés. El umbral superior (15% para metano) se llama límite superior de explosión (LSE).

Se deben seleccionar las ubicaciones propuestas para la sonda de monitoreo para proveer puntos de monitoreo entre las áreas de desechos y residencias y estructuras cercanas (tanto dentro como fuera del sitio). La red de monitoreo de gas se instalará por fases conforme se expanda la instalación del relleno sanitario para proveer cobertura de monitoreo continuo entre las áreas de desechos activas y los límites de la propiedad.

El espaciado general para las sondas de gas es de aproximadamente 300 metros alrededor del perímetro del sitio. La sonda se espacia a lo largo del perímetro del sitio según el uso del terreno adyacente y hacia estructuras que se encuentren en las proximidades. La red de monitoreo de gas se debe modificar según sea necesario para que refleje el cambio de la tierra tanto dentro como fuera del sitio.

Un sistema de recolección de biogás se instala para eliminar el biogás. Estos sistemas de recolección pueden ser sistemas «pasivos» o «activos».

Un sistema de biogás «pasivo» comúnmente incluye la colocación de conductos en el relleno, denominados chimeneas. Estos conductos permiten que el biogás pase a través de la cubierta y se liberen hacia la atmósfera o pueden pasar por un proceso de oxidación térmica en quemadores de gas. Los conductos pasivos que se construyen a lo largo de la cubierta final del relleno se espacian a una distancia común de entre 20 y 30 metros

Los sistemas de conductos se pueden instalar tan pronto como los desechos alcancen una altura aproximada de 3 metros sobre el recubrimiento para evitar la acumulación de presión que podría ocasionar migración de gas fuera del sitio o problemas con la estabilidad en la cubierta del relleno. Estos conductos se extenderían de forma incremental conforme se incrementen los desechos. Estos conductos se pueden perforar en el sitio o pueden simplemente ser toneles perforados con hoyos y rellenos con un tubo perforado de 10 cm y grava o piedras. Las perforaciones en el tonel y en el tubo deben ser más pequeñas que la grava o que las piedras, en algunos casos se usa block de pómez desechado o quebrado.

Aunque al ventilar el biogás a la atmósfera impide problemas locales potenciales e impactos adversos, este enfoque contribuye a la liberación de gases de efecto invernadero. Existen diferentes enfoques que se pueden utilizar, como recolectar el gas, quemar el gas en un sistema de oxidación térmica o usarlo en forma que produzca un beneficio.

Un sistema «activo» para el control de biogás incluye pozos, sistema de recolección y quemadores, generadores eléctricos y demás sistemas de combustión de gas para rellenos. En un sistema activo para el control de biogás, los pozos de gas comúnmente se instalan de la superficie hasta no más de 5 metros de la elevación del recubrimiento subyacente (para no perforar el recubrimiento). Estos pozos se espacian comúnmente a una distancia de entre 50 y 100 metros. Los pozos envían el gas al sistema de captación principal, el cual a su vez envía el gas al quemador o bien a otro uso final. El quemador quema el gas, eliminando así el contaminante principal. Un generador de gas a energía u otro usuario directo final también elimina el contaminante principal al mismo tiempo que contribuye con la energía y reduce la dependencia del gas natural.

8.1 Construcción de una sonda para el monitoreo de gas

La instalación de una sonda de gas en un relleno sanitario es generalmente similar a la instalación de un pozo de monitoreo. Un contratista de perforaciones perforará la sonda de monitoreo para gas. El perforador realizará una perforación de 20 cm de diámetro. La sonda consiste de una sección de dren de captación sólida y una sección con ranuras o agujeros, ambas secciones comúnmente se fabrican con un tubo de PVC de 5 cm de diámetro. La sección sólida consistirá de un tubo sólido y se extiende de aproximadamente 1 metro sobre el nivel del suelo a una profundidad de aproximadamente 1.5 metros por debajo del nivel del suelo. La sección ranurada o perforada se extiende del inferior del tubo sólido a una profundidad de 2 metros por debajo de la elevación de grado más baja de la celda de relleno adyacente, la que sea la mayor elevación.

Después de que la perforación alcance la profundidad deseada, se construirá la sonda en el hoyo perforado. Se coloca aproximadamente 30 cm de grava en el fondo del hoyo. El tubo PVC, sólido y perforado y una tapa en la parte del fondo, se coloca en el hoyo. El hoyo se rellena con grava hasta aproximadamente 30 cm sobre la parte superior de la sección ranurada. Se coloca una capa de 90 cm de mezcla de bentonita sobre la grava. Ahora se coloca un recubrimiento protector de metal alrededor del tubo de PVC que sobresale del suelo. El recubrimiento de metal se empuja en el suelo y se rellena con grava hasta alrededor de 15 cm de la parte superior del tubo PVC. La parte superior del tubo de PVC se tapa con una tapa de PVC y con una conexión para toma de muestra. Se coloca una plancha de concreto alrededor del recubrimiento.



Figura 41: Sonda de gas en un relleno

La plancha de concreto se construye con dos tablas de madera para formar una plancha de dimensiones típicas, 1 metro x 1 metro x 10 cm. En el área de la tabla que se llenará de cemento se coloca una malla con refuerzo de acero. La plancha de concreto se puede proteger para evitar daños al instalar postes de metal («bolardos») alrededor de la plancha. Estos postes se deben instalar a aproximadamente 0.1 metro fuera de la plancha, no en la plancha.

Al concluir con los pasos anteriores en todos los pozos, comúnmente se emplea un geoposicionador para proveer mediciones exactas de la latitud y longitud final, así como la elevación de la parte superior del tubo de PVC del pozo.

El recubrimiento del pozo se debe marcar con el número del pozo y la latitud, longitud y elevación de la parte superior del tubo de PVC del pozo.

Después de terminar la construcción de la sonda, estará lista para la realización de muestreo. El área que se encuentra alrededor del pozo se debe limpiar y se deben eliminar todos los escombros. El recubrimiento del pozo se deberá cerrar y asegurar.

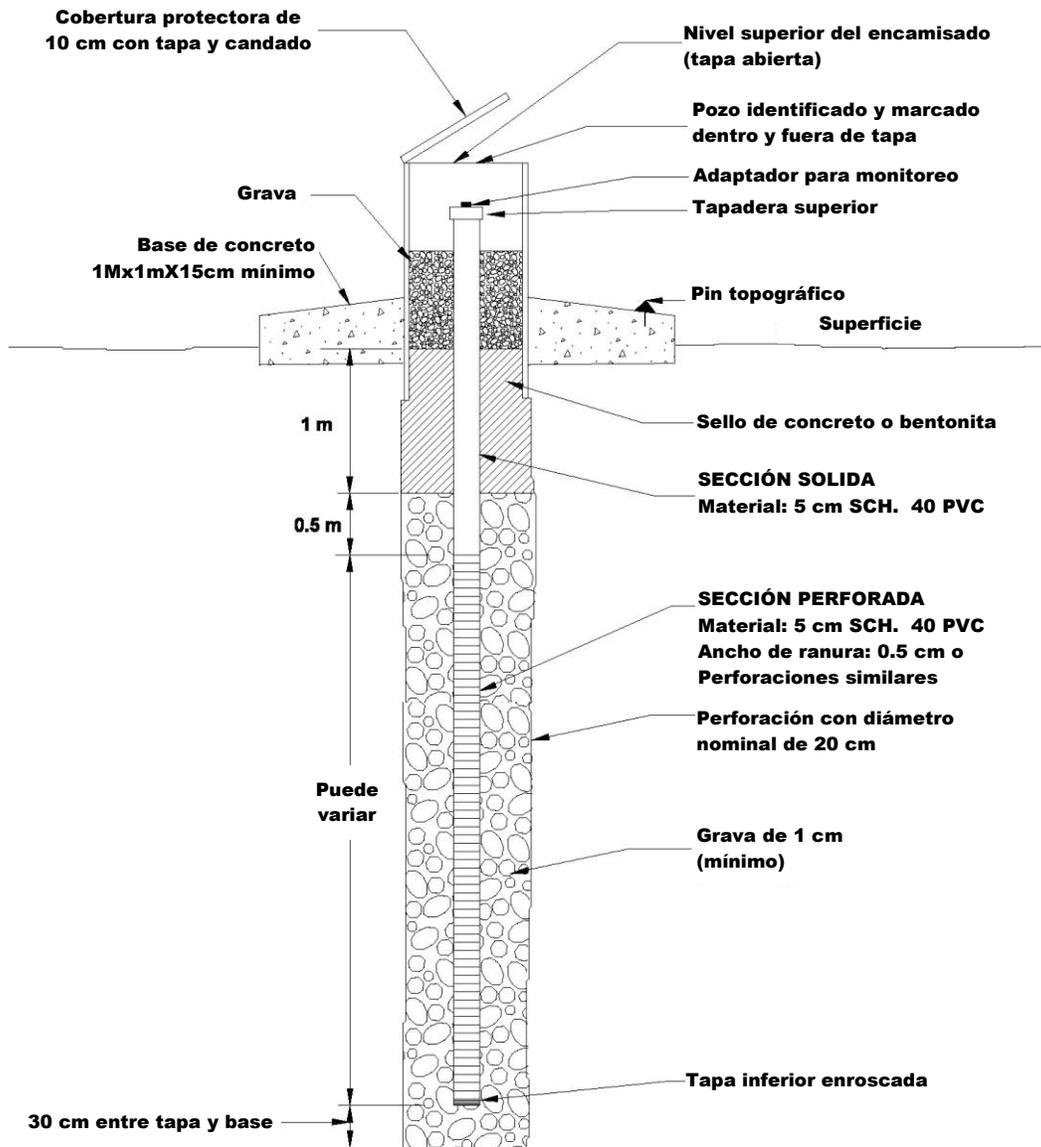


Figura 42: Detalle común de una sonda para el monitoreo de gas en un relleno

8.2 Monitoreo de biogás

El relleno debe monitorear la presencia de biogás una vez cada 3 meses para medir el porcentaje de volumen de metano. El personal de campo deberá conducir una inspección visual de la condición de la sonda. El técnico de campo deberá utilizar un medidor de presión diferencial de gas, un analizador de gas combustible de rango dual y un medidor electrónico para medir el nivel de profundidad del agua. La presión en la sonda de monitoreo sellada se medirá y se determinará la presencia de metano en porcentaje. Entonces se abre la sonda para permitir la medición de la profundidad del agua.

En el evento de que el porcentaje de metano detectado sea mayor del 5% por volumen en cualquier sonda de monitoreo, el relleno debe implementar inmediatamente un Plan de Contingencia.

El Plan de Contingencia deberá incluir notificar a los residentes potencialmente afectados o a los negocios cercanos (a aquellos negocios que se encuentren a 300 metros de la sonda de monitoreo de gas que se vea afectada) y conducir lecturas de seguimiento diarias en la sonda afectada. Si las lecturas de seguimiento sugieren la existencia de niveles de metano que sobrepasan el 5% por volumen en la línea de la propiedad, entonces se realizarán esfuerzos para determinar el punto al cual está migrando el metano de la línea de la propiedad. Los esfuerzos comunes para determinar el grado de migración de gas puede incluir perforar pozos adicionales para sondas de monitoreo y realizar muestras de metano.

Si durante la realización de muestreo de seguimiento se determina que el gas pudo haber migrado hacia una instalación en el sitio o fuera del mismo, los ocupantes de dicha instalación serán notificados inmediatamente del peligro potencial y contactará al propietario de la misma. Entre las acciones correctivas a implementar se debe incluir la instalación de un sistema de alarma en caso de metano si los niveles alcanzados son peligrosos, ventilación activa de la instalación y/o evacuación será necesaria para prevenir una explosión o evitar el peligro a los ocupantes.

El monitoreo de las sondas y cualquier instalación afectada se continuará semanalmente hasta que las lecturas de metano en la sonda se encuentren en menos del 5%.

Las instalaciones deberán preparar un Plan de Remediación para remediar el problema de mitigación de biogás. Este plan puede incluir la construcción de zanjas interceptoras, pozos con conductos (ya sea en la masa de desechos o en el suelo del área afectada), un sistema activo para la captación de biogás o alguna otra solución similar.

8.3 Puntos críticos de inspección

Tabla 13: Puntos críticos de inspección en la sonda de monitoreo de biogás

NO.	DESCRIPCIÓN	CUÁNDO	FRECUENCIA
8	Sonda para el monitoreo de biogás		
8.1	Recubrimiento protector de metal.	Después de la construcción	Cada evento de monitoreo de aguas subterráneas
8.2	Plancha de concreto	Después de la construcción	Cada evento de monitoreo de aguas subterráneas
8.3	Área alrededor de la sonda de monitoreo de gas y plancha de concreto libre de escombros.	Después de la construcción	Cada evento de monitoreo de aguas subterráneas

NO.	DESCRIPCIÓN	CUÁNDO	FRECUENCIA
8.4	Recubrimiento protector cerrado.	Después de la construcción	Cada evento de monitoreo de aguas subterráneas
8.5	La sonda para el monitoreo de gas tiene una conexión para adaptar manguera de medición.	Después de la construcción	Cada evento de monitoreo de aguas subterráneas
8.6	Se evaluó la sonda de monitoreo de gas en cuanto a latitud, longitud y elevaciones.	Después de la construcción	No aplica

APÉNDICES

APÉNDICE A

Glosario

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) - Uno de los más grandes sistemas en el mundo reconocido profesionalmente sobre desarrollo de estándares voluntarios.
- ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - Prueba de suelo de laboratorio que consiste en colocar un peso conocido de una muestra de suelo a través de una serie de coladores de malla de alambre apilados uno sobre otro en tamaños menores sucesivamente y utilizado para determinar el porcentaje en el tamaño de gradación de la muestra.
- ASEGURAMIENTO DE CALIDAD EN LA FABRICACIÓN - Un sistema de actividades planificadas que provea aseguramiento de que las materias primas fueran construidas (fabricadas) según las especificaciones.
- ASEGURAMIENTO DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN - Un sistema de actividades planificado que provee al dueño y a la entidad que lo permita, la seguridad de que la instalación se construyó según se especifica en el diseño.
- BOCA DE PEZ - Una apertura semi-cónica de la costura que se forma en una arruga en la orilla en una hoja de la geomembrana.
- COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (también conocido como Conductividad hidráulica) - La cantidad de flujo por unidad de tiempo a través del suelo bajo un gradiente hidráulico a temperatura estándar.
- CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN - Un sistema de inspecciones planificadas que se utiliza para monitorear y controlar directamente la calidad de un proyecto.
- CONTROL DE CALIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN - Un sistema planificado de inspecciones que se utiliza directamente para monitorear y controlar la fabricación de un material.
- ESFUERZO DE COMPACTACIÓN - La cantidad de energía de compactación que se mantiene constante y que usualmente se transfiere a una muestra del suelo con un dispositivo de compactación, que se utiliza en las muestras del suelo en diversos procedimientos de prueba de laboratorio para establecer la densidad de un suelo a diferentes contenidos de unidad.
- ESPÉCIMEN - (Con relación a las pruebas destructivas de geomembrana) - Un espécimen que es la franja de prueba individual (en ocasiones también llamado cupón) de una ubicación de muestra. Ubicación de muestra que usualmente consiste de muchos especímenes.
- FILM TEAR BOND (FTB) - Una falla en el material de hoja de geomembrana en alguno de los lados de la costura y no dentro de la termo soldadura misma.

- FLUIDO PERMANENTE - Fluido utilizado en un coeficiente de laboratorio para prueba de permeabilidad y limitado a agua de grifo o solución normal de 0.005 de CaSO_4 . Para estos procedimientos no se debe utilizar agua destilada.
- GEOMEMBRANA - Ver RECUBRIMIENTO DE MEMBRANA FLEXIBLE.
- GEOSYNTHETIC RESEARCH INSTITUTE (GRI) [Instituto de investigación geosintética] - Ubicada en la Universidad de Drexel, en GRI se conducen investigaciones con materiales geosintéticos y se desarrollan estándares para las pruebas industriales con estos materiales. Este instituto recibe apoyo de muchos fabricantes de geosintéticos, instaladores y proveedores de materia prima para la industria.
- GRADACIÓN - Ver ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO
- HDPE (POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD) - Un polímero preparado a través de la polimerización a baja presión de etileno como monómero principal y característica de polietileno Tipo III y Tipo IV. Resinas de polímeros que tienen densidades iguales o mayores que 0.941 g/cc.
- ÍNDICE DE PLASTICIDAD - La diferencia numérica entre el LL y el LP de un suelo de granos finos que denota el rango de plasticidad del suelo. A mayor sea el IP, mayor será el rango de plasticidad de un suelo y mayor serán las características de plasticidad.
- LABORATORIO PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS - Un laboratorio independiente en cuanto a su propiedad o control de propiedad en el que se puede utilizar cualquier parte de la construcción.
- LÍMITE LÍQUIDO (LL) - Porcentaje de humedad en un suelo, sujeto a prueba prescrita, que define el punto superior en el cual cambia la consistencia del suelo de estado plástico a estado líquido.
- LÍMITE PLÁSTICO (LP) - Porcentaje de humedad en un suelo, sujeto a prueba prescrita, que define el punto inferior en el cual cambia la consistencia de estado plástico a estado semi-sólido.
- LÍMITES ATTERBERG - Una serie de 6 «límites de consistencia» de suelos de granos finos definidos por el científico de suelos sueco Albert Atterberg, de los cuales dos se utilizan con frecuencia en la actualidad para establecer los límites físicos del suelo en cuanto a sus características de plasticidad. Estos límites de suelo o límites utilizados con mayor frecuencia en la ingeniería geotécnica se basan en la diferencia numérica del Límite líquido y el Límite plástico según la definición que se presenta.
- MATERIAL DE RELLENO DEL SUELO - Suelos en los que el límite de líquidos (LL) y el índice de plasticidad (IP) no varían en 10 puntos. Un suelo que varía en 10 puntos o más del LL o IP establecido inicialmente se considera una fuente de suelo separada para efectos de este manual y requiere de una serie de pruebas de suelos separada.

- **MATERIALES GEOSINTÉTICOS** - Materiales fabricados o hechos a mano que incluyen FML (geomembranas), georejillas, geofiltros, geocompuestos, redes de geodrenajes y geotextiles.
- **MESA DE AGUA** - La superficie superior de la zona de saturación en la cual la presión del agua es igual a la presión atmosférica, excepto donde la superficie se forme por una unidad de confinamiento.
- **MUESTRA ESTRATIFICADA DE FML** - Una ubicación de muestra seleccionada aleatoriamente cada intervalo de 150 metros lineales.
- **MUESTRA REPRESENTATIVA** - Una muestra representativa de material de geomembrana consiste de 1 o más especímenes (comúnmente denominados cupones) de la misma porción rectangular del material de geomembrana, orientado a lo largo de la costura que se elimina para efectos de realización de pruebas de campo o de laboratorio.
- **NIVEL FREÁTICO ESTACIONAL MÁS ALTO** - el nivel freático con la medición más alta o con el cálculo más alto de acuíferos durante las investigaciones para la solicitud de permisos y/o cualquier estudio de caracterización en el sitio.
- **PERMEABILIDAD** - Ver **COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD**
- **PROFESIONAL GEOTÉCNICO** - Un ingeniero profesional registrado, que posee experiencia profesional en ingeniería geotécnica, así como en la realización de pruebas. Los geólogos pueden evaluar y supervisar la calidad en el control de pruebas de los recubrimientos de suelo construido o de los recubrimientos de suelo in-situ si cuentan con el conocimiento y la experiencia en la elaboración de pruebas geotécnicas y en la evaluación de las propiedades del suelo desde el punto de vista de ingeniería.
- **PRUEBA DE PERMEABILIDAD DEL CAMPO** - Una prueba de campo que se realiza en el recubrimiento construido o en suelos in-situ para determinar el coeficiente de permeabilidad en el lugar y usualmente se realiza como una Prueba de infiltrómetro de anillo sellado doble (SDRI, por sus siglas en inglés) o serie de pruebas de campo Boutwell. Este tipo de método de prueba de permeabilidad se considera que usualmente tiene mayor precisión debido al área que se está probando y las condiciones existentes en el campo que pueden ser opacadas en un entorno de prueba de laboratorio.
- **RECUBRIMIENTO DE ARCILLA GEOSINTÉTICA** - Una barrera hidráulica manufacturada por una fábrica que típicamente consiste de arcilla de bentonita u otro material con permeabilidad muy baja, apoyada por geotextiles y/o geomembranas que se unen a través de una termo soldadura o bien con químicos adhesivos.
- **RECUBRIMIENTO DE MEMBRANA FLEXIBLE (FML, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS)** - Un geosintético esencialmente impermeable compuesto por 1 o más capas sintéticas. Ver HDPE.

- **RECUBRIMIENTO IN-SITU** - Recubrimientos de suelos que consisten de suelos intactos que no exhiben las características físicas primarias o secundarias y cumplen con todos los requerimientos de pruebas físicas y de control de calidad.
- **RECUBRIMIENTOS DE SUELO CONSTRUIDOS** - Recubrimientos de suelo construidos de suelo trabajados in-situ, suelos de un material de relleno, o suelos modificados con bentonita. Solamente cuando los suelos son muy permeables.
- **RELACIÓN HUMEDAD/DENSIDAD** - Una prueba en la cual se compactan muestras de suelo en un contenedor volumétrico conocido a diferentes contenidos de humedad y un nivel constante de esfuerzo de compactación para la determinación de sus densidades correspondientes. Los procedimientos de prueba y los esfuerzos de compactación que se utilizan son los normalmente prescritos en ASTM D 698 Y D 1557. A estas pruebas se les designa frecuentemente las pruebas de compactación Estándar de Proctor y Proctor Modificado, denominadas así por M. M. Proctor, el desarrollador de estos procedimientos de prueba para determinar el control de densidad en rellenos de suelo compactado.
- **SERIE DE PRUEBA DE SUELOS** - Pruebas realizadas para determinar las características físicas del suelo y documentar su capacidad de satisfacer los requerimientos del recubrimiento del suelo de MSWR. Estas pruebas incluyen el análisis granulométrico (gradación), Límites de Atterberg, humedad/densidad y coeficiente de permeabilidad.
- **SUELOS IN-SITU** - Suelos intactos; el término rutinariamente se utiliza para describir un recubrimiento de suelo que ya está en el lugar.
- **TÉCNICO INGENIERO CALIFICADO** - un representante que sea certificado en Tecnología de la Ingeniería Geotécnica e inspecciones de instalaciones de materiales geosintéticos al nivel 2 o superior, un técnico en ingeniería con un mínimo de 4 años de experiencia relacionada directamente o un ingeniero o geólogo graduado con 1 año de experiencia relacionada directamente.

APÉNDICE B

Lista de referencias

ASTM 1995, The American Society of Testing and Materials 1995 Annual Book of Standards, Section 4.- Construction, Vol.4.08 and 4.09, "Soil and Rock", Philadelphia, Pennsylvania.

Nota: Los estándares ASTM se encuentran a la venta en:

<http://www.astm.org/Standard/index.shtml?complete>

Bajo «estándares de búsqueda» ingrese el número ASTM y haga clic en «Buscar»

ASTM D 374, "Standard Test Methods for Thickness of Solid Electrical Insulation»

ASTM D 422, "Particle-Size Analysis of Soils»

ASTM D 638, "Tensile Properties of Plastics»

ASTM D 698, "Laboratory Compaction Characteristics of Soils Using Standard Effort (12,400 ft-lbs/ft³ (600 Kn-m/m³))"

ASTM D 751, "Standard Test Methods for Thickness of Solid Electrical Insulation»

ASTM D 792, "Specific Gravity and Density of Plastics by Displacement»

ASTM D 1004, "Initial Tear Resistance of Plastic Film and Sheeting»

ASTM D 1140, "Amount of Material in Soils Finer than the No. 200 (75- μ m) Sieve»

ASTM D 1204, "Linear Dimensional Changes of Nonrigid Thermoplastic Sheeting or Film at Elevated Temperature»

ASTM D 1238, "Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer»

ASTM D 1505, "Density of Plastics by the Density-Gradient Technique» [Densidad de los plásticos por la técnica de densidad - gradiente]

ASTM D 1556, "Density and Unit Weight of Soil In Place by Sand-Cone Method»

ASTM D 1557, "Laboratory Compaction Characteristics of Soils Using Modified Effort (56,000 ft-lbs/ft³ (2,700 Kn-m/m³))"

ASTM D 1593, "Standard Specification for Nonrigid Vinyl Chloride Plastic Sheeting"

ASTM D 1603, "Carbon Black in Olefin Plastics"

ASTM D 1682, "Method of Test for Breaking Load and Elongation of Textile Fabrics"

ASTM D 2167, "Density and Unit Weight of Soil In Place by Rubber Balloon Method"

ASTM D 2434, "Permeability of Granular Soils (Constant Head)"

ASTM D 2487, "Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)"

- ASTM D 2922, "Density of Soil and Soil-Aggregate In Place by Nuclear Methods (Shallow Depth)"
- ASTM D 3015, "Recommended Practice for Microscopical Examination of Pigment Dispersion in Plastic Compounds"
- ASTM D 3042 – Modified, “ Test Method for Determining Degradation of Landfill Drainage Materials Due to Carbonate Content” J&L Test Designation S-105-89”
- ASTM D 3776, “Test Methods for Mass per Unit Area (Weight) of Fabric”
- ASTM D 3895, “Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry”
- ASTM D 4218, “Test Method for Determination of Carbon Black in Polyethylene Compounds By Muffle Furnace Technique”
- ASTM D 4318, "Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils"
- ASTM D 4437, "Practice for Determining the Integrity of Field Seams Used in Joining Flexible Polymeric Sheet Geomembranes"
- ASTM D 4716, “Test Method for Determining the (In-plane) Flow Rate per Unit Width and Hydraulic Transmissivity of a Geosynthetic Using a Constant Head”
- ASTM D 4833, “Test Method for Index Puncture Resistane of Geotextiles, Geomembranes, and Related Products”
- ASTM D 5035, “Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method)”
- ASTM D 5084, "Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter"
- ASTM D 5093, "Field Measurement of Infiltration Rate Using a Double-Ring Infiltrometer with a Sealed Inner Ring"
- ASTM D 5199, "Measuring Nominal Thickness of Geotextiles and Geomembranes"
- ASTM D 5397, “Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test”
- ASTM D 5596, “Test Method for Microscopic Evaluation of the Dispersion of Carbon Black in Polyolefin Geosynthetics”
- ASTM D 5641, “ Practice for Geomembrane Seam Evaluation by Vacuum Chamber”
- ASTM D 5721, “Practice for Air-Oven Aging of Polyolefin Geomembranes”
- ASTM D 5885, “Test Method for Oxidative Induction Time of Polyolefin Geosynthetics by High-Pressure Differential Scanning Calorimetry”
- ASTM D 5994, “Test Method for Measuring Core Thickness of Textured Geomembrane”

ASTM D 6693, "Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembranes"

ASTM Committee D 35 on Geosynthetics (1996), Symposium on Testing and Acceptance Criteria for Geosynthetic Clay Liners, Atlanta, Georgia.

ASTM Standards, Procedures for Testing Soils, American Society for Testing Materials, 1916 Race Street, Philadelphia, PA 19103.

Benson, C.H., Daniel, D.E., and Boutwell, G.P., (1999), "Field Performance of Compacted Clay Liners," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, pp. 390-403.

Boardman, B.T. (1993), "The Potential Use of Geosynthetic Clay Liners as Final Covers in Arid Regions," M.S. Thesis, Univ. of Texas at Austin, 109 p.

Boutwell, G.P., and Tsai, C.N., 1992, "The Two-Stage Field Permeability Test for Clay Liners," *Geotechnical News*, Vol. 10, No. 2, pp. 32-34.

Bowders, J.J. and Daniel, D.E. (1995) "Waste for Ballast - Landfills Below the Ground-Water Table", Proceedings of the 8th Annual Municipal Solid Waste management "Options for Texas '95" Conference, Texas Natural Resources and Conservation Commission, Austin, Texas, January 25-27, 1995.

Cedergren, H.R. (1967) Seepage, Drainage, and Flow Nets, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Cedergren, H.R. (1975) "Drainage and Dewatering" from Foundation Engineering Handbook ed. by Winterkorn, H.F. and Fang, H.Y., Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1975.

Chamberlain, E.J., and Gow, A.J. (1979), "Effects of Freezing and Thawing on the Permeability and Structure of Soil," *Engineering Geology*, Vol. 13., No. 1, pp. 73-92.

Daniel, D.E. (1993), "Geosynthetic Clay Liners (GCLs) in Landfill Covers," presented at the Thirty-First Annual Solid Waste Exposition, The Solid Waste Association of North America, San Jose, California, August 2-5, 1993.

Daniel, D.E., Shan, H.Y., and Anderson, J.D. (1993), "Effects of Partial Wetting on the Performance of the Bentonite Component of a Geosynthetic Clay Liner," *Geosynthetics '93*, Vol. 3, Industrial Fabrics Association International, St. Paul, Minnesota, pp. 1483-1496.

Daniel, D.E., March 10 & 11, 1993, Seminar on clay liner construction and testing given to Texas Water Commission, Field Operations Municipal Solid Waste Landfill Inspectors and Central Office Personnel.

Daugherty, R.L. and Franzini, J.B. (1965) Fluid Mechanics with Engineering Applications, McGraw-Hill Book Company, New York.

Estornell, P. (1991), "Bench-Scale Hydraulic Conductivity Tests of Bentonitic Blanket Materials for Liner and Cover Systems," M.S. Thesis, Univ. of Texas at Austin, 152 p.

Estornell, P., and Daniel, D.E. (1992), "Hydraulic Conductivity of Three Geosynthetic Clay Liners," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, No. 10, pp. 1592-1606.

- Eykholt, G.R. (1988), "Stability of Amended Sand Permeated with Fly Ash Leachate," M.S. Thesis, University of Texas, Austin, 55 p.
- Focht, J.A. Jr. - comunicación personal.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979) Groundwater, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Giroud, J. P., Bonaparte, R., Beech, J. F., and Gross, B. A., "Design of Soil Layer - Geosynthetic Systems Overlying Voids", *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 9, No. 1, 1990, pp. 11-50.
- Gleason, M.H. (1993), "Comparative Testing of Calcium and Sodium Smectite Clays for Geotechnical and Environmental Applications," M.S. Thesis, University of Texas, Austin, 200 p.
- GRI GM6, Standard Practice for "Pressurized Air Test for Dual Seamed Geomembranes".
- GRI GM 12, Asperity Measurement of Textured Geomembrane Using a Depth Gage
- GRI GM 13, Test Methods, Test Properties and Testing Frequencies for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembrane
- Grim, R.E. (1948), "Some Fundamental Factors Influencing the Properties of Soil Materials," *Proceedings, Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rotterdam, Vol. 3, pp. 8-12.
- Grim, R.E. (1962), *Applied Clay Mineralogy*, McGraw Hill Book Company, New York, 442 p.
- Kim, W.H., and Daniel, D.E. (1992), "Effects of Freezing on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, No. 7, pp. 1083-1097.
- Koerner, R.M. (1990), *Designing with Geosynthetics*, Third Ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 783 p.
- LaGatta, M.D. (1992), "Hydraulic Conductivity Tests on Geosynthetic Clay Liners Subjected to Differential Settlement," M.S. Thesis, Univ. of Texas at Austin, 120 p.
- Lambe, T.N. and Whitman, R.V. (1969) Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Lo, I.M.C. (1992), "Development and Evaluation of Clay Liner Materials for Hazardous Waste Sites," Ph.D. Dissertation, Univ. of Texas at Austin, 289 p.
- Mansur, C.I. and Kaufman, R.I. (1962) "Dewatering" from Foundation Engineering ed. by Leonards, G.A., McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.
- Mesri, G., and Olson, R.E. (1970), "Shear Strength of Montmorillonite," *Geotechnique*, Vol. 20, No. 3, pp. 261-270.
- Mesri, G., and Olson, R.E. (1971), "Mechanisms Controlling the Permeability of Clays," *Clays and Clay Minerals*, Vol. 19, pp. 151-158.
- Mitchell, J.K. (1993), *Fundamentals of Soil Behavior*, Second Edition, John Wiley and Sons, New York, 437 p.

- Olson, R.E. (1974), "Shearing Strengths of Kaolinite, Illite, and Montmorillonite," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 100, No. GT11, pp. 1215-1229.
- Othman, M.A., and Benson, C.B. (1991), "Influence of Freeze-Thaw on the Hydraulic Conductivity of Compacted Clay," *Proceedings, Fourteenth Annual Madison Waste Conference, University of Wisconsin at Madison*, pp. 296-312.
- Powers, J.P. (1981) Construction Dewatering, A Guide to Theory and Practice, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Richardson, G. N. and R. M. Koerner, (1987). "Geosynthetic Design Guidance for Hazardous Waste Landfill Cells and Surface Impoundments," *Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, U.S. EPA Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio; Contract No. 68-07-3338*.
- Reed, J. K., Allendorf, M., and Elizondo, M. (2010), "Effective Design and Construction of Subtitle D Liners Below the Groundwater Table", 2010 Global Waste Management Symposium, San Antonio, Texas.
- Savage, G. M., Diaz, L. F., Golueke, C. G., Martone, C., and Ham, R. K. (1998), Guidance for Landfilling Waste in Economically Developing Countries, U.S. EPA Contract 68-C4-0022
- Schubert, W.R. (1987), "Bentonite Matting in Composite Lining System," *Geotechnical Practice for Waste Disposal '87*, R.D. Woods (Ed.), American Society of Civil Engineers, New York, pp. 784-796.
- Shackelford, C.D., and Daniel, D.E. (1991), "Diffusion in Saturated Soil. II: Results for Compacted Clay," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 3, pp. 485-506.
- Shan, H.Y. (1990), "Laboratory Tests on a Bentonitic Blanket," M.S. Thesis, Univ. of Texas at Austin, 84
- Shan, H.Y., and Daniel, D.E. (1991), "Results of Laboratory Tests on a Geotextile/Bentonite Liner Material," *Geosynthetics '91*, Vol. 2, Industrial Fabrics Association International, St. Paul, Minnesota, pp. 517-535.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1967) Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Trautwein, Stephen J. and Boutwell, Gordon P., 1993, "In-situ Hydraulic Conductivity Tests for Compacted Soil Liners and Caps," conference in San Antonio during January 1993, ASTM D-18.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1970, "Laboratory Soil Testing," Office of the Chief of Engineers, Washington, DC, Engineer Manual 1110-2-1906.
- U.S. Army Corps of Engineers, (1971), "Dewatering and Groundwater Control for Deep Excavations", Department of the Army, TM 5-818-5.
- U.S. EPA (1989), "Technical Guidance Document: The Fabrication of Polyethylene FML Field Seams," EPA/530/SW-89/069, U.S. EPA Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC. NTIS PB-90-119595.
- U.S. EPA (1991), "Inspection Techniques for the Fabrication of Geomembrane Field Seams," EPA Technical Guidance Document, EPA/530/SW-91/051.

U.S. EPA (1993a), "Technical Guidance Document: Quality Assurance and Quality Control for Waste Containment Facilities," EPA/600/R-93/182, U.S. EPA Office of Research and Development, Washington DC.

U.S. EPA (1993b), "Solid Waste Disposal Facility Criteria: Technical Manual," EPA/530/R-93/017, U.S. EPA Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington DC. NTIS PB94-100-450.

Williams, C.E. (1989) "Long Term Performance of High Rise Mat Foundation", Proceedings of the Congress on Foundation Engineering: Current Principles and Practices, American Society of Civil Engineers, Northwestern University, Volume 2, pp. 1432-1444.

Wong, L.C., and M.D. Haug (1991), "Cyclical Closed-System Freeze-Thaw Permeability Testing of Soil Liner and Cover Materials," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 28, No. 6, pp. 784-793.

Wright, T. D., W. M. Held, J. R. Marsh, and L. R. Hovater (1987), "Manual of Procedures and Criteria for Inspecting the Installation of Flexible Membrane Liners in Hazardous Waste Facilities," EPA-6803-3247, prepared for Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, U.S. EPA Oficina de investigación y desarrollo, Cincinnati, OH.

APÉNDICE C

Especificaciones de materiales para geomembrana y geored de HDPE

ESPECIFICACIONES DE MATERIAL GEOSINTÉTICO				
GEOMEMBRANA LISA DE HDPE				
Propiedad	Calificador	Método de prueba	Valor especificado 1.50 mm	Frecuencia de la prueba (mínima)
Espesor * individual más bajo de 10 valores	Promedio mínimo	ASTM D5199	1.50 mm -10%	Por rollo
Densidad (geomembrana)	Mínimo	ASTM D1505/D792	0.94 g/cc	90,000 kg
Propiedades de tensión: (1) 1. Fuerza de resistencia 2. Fuerza de ruptura 3. Elongación en la resistencia 4. Elongación en la ruptura	Promedio mínimo (en cada dirección)	ASTM D6693 Tipo IV	22 kN/m 40 kN/m 12 % 700 %	9,000 kg
Fuerza de ruptura	Promedio mínimo	ASTM D1004	187 N	20,000 kg
Resistencia a la perforación	Promedio mínimo	ASTM D4833	480 N	20,000 kg
Resistencia a rajaduras por tensión (2)		ASTM D5397 (Ap.)	300 horas	Por GRI GM-10
Contenido de negro de humo	Rango	ASTM D1603(3)	2.0 – 3.0%	9,000 kg
Dispersión de negro de humo	Nota 4	ASTM D5596	nota 4	20,000 kg
Tiempo de inducción para oxidación (OIT, por sus siglas en inglés) (5) (a) OIT estándar o (b) OIT de alta presión	Promedio mínimo	ASTM D3895 ASTM D5885	100 minutos 400 minutos	90,000 kg
Envejecimiento del horno a 85 ⁰ (5),(6) (a) OIT estándar - % retenido después de 90 días o (b) Presión OIT alta - % retenido después de 90 días	Promedio mínimo	ASTM D5721 ASTM D3895 ASTM D5885	55 % 80 %	Por cada formulación
Resistencia a UV (7) OIT estándar o (b) Presión OIT alta - % retenido después de 1600 horas (9)	Promedio mínimo	ASTM D3895 ASTM D5885	N.R. (8) 50 %	Por cada formulación

(1) Los valores promedio de dirección de la máquina (MD) y dirección cruzada de la máquina (XMD) se deben encontrar en la base de 5 especímenes de prueba en cada dirección.

- La elongación de resistencia se calcula utilizando una longitud de calibración de 33 mm.
- La elongación de ruptura se calcula utilizando una longitud de calibración de 50 mm.

(2) La tensión de resistencia que se utiliza para calcular la carga aplicada para la prueba SP-NCTL debe ser el valor medio del fabricante a través de las pruebas de MQC.

(3) Otros métodos como el D4218 (horno de mufla) o los métodos de microondas son aceptables si se puede establecer una correlación apropiado con el D1603 (horno de tubo).

(4) Dispersión de carbono negro (solamente cerca de aglomerados de esferas) para 10 vistas diferentes.
9 en las categorías 1 o 2 y 1 en la categoría 3.

(5) El fabricante tiene la opción de seleccionar uno de los métodos OIT mencionados para evaluar el contenido de antioxidante en la geomembrana.

(6) También se recomienda evaluar las muestras a 30 - 60 días para compararlos con la respuesta a los 90 días.

(7) La condición de la prueba debe ser de 7 horas. El ciclo de 75⁰C seguido de 4 horas de condensación a 60⁰C.

(8) No se recomienda ya que la alta temperatura de la prueba estándar OIT produce un resultado no realista para algunos de los antioxidantes en las muestras expuestas a UV.

(9) La resistencia UV se basa en el porcentaje de valor retenido sin importar el valor original HP OIT.

ESPECIFICACIONES DE MATERIAL GEOSINTÉTICO				
GEOMEMBRANA TEXTURIZADA DE HDPE				
Propiedad	Calificador	Método de prueba	Valor especificado 1.50 mm	Frecuencia de prueba (mínima)
Espesor * individual más bajo para 8 de 10 valores * individual más bajo de 10 valores	Promedio mínimo	ASTM D5199	1.50 mm(-5%) -10% -15%	Por rollo
Mils de altura de aspereza (1)	Promedio mínimo	GM 12	0.25 mm	Cada 2 ^{do} rollo (2)
Densidad (geomembrana)	Promedio mínimo	ASTM D1505/D792	0.94 g/cc	90,000 kg
Propiedades de tensión: (3) 1. Fuerza de resistencia 2. Fuerza de ruptura 3. Elongación en la resistencia 4. Elongación en la ruptura	Promedio mínimo (en cada dirección)	ASTM D6693 Tipo IV	22 kN/m 16 kN/m 12 % 100 %	9,000 kg
Fuerza de ruptura	Promedio mínimo	ASTM D1004	187 N	20,000 kg
Resistencia a la perforación	Promedio mínimo	ASTM D4833	400 N	20,000 kg
Resistencia a rajaduras por tensión (4)		ASTM D5397 (Ap.)	300 horas	Por GRI GM-10
Contenido de negro de humo	Rango	ASTM D1603 (5)	2.0 – 3.0%	9,000 kg
Dispersión de negro de humo	Nota 6	ASTM D5596	nota 6	20,000 kg
Tiempo de inducción para oxidación (OIT, por sus siglas en inglés) (7) (a) OIT estándar o (b) OIT de alta presión	Promedio mínimo	ASTM D3895 ASTM D5885	100 minutos 400 minutos	90,000 kg
Envejecimiento del horno a 85 ^o (7),(8) (a) OIT estándar - % retenido después de 90 días o (b) Presión OIT alta - % retenido después de 90 días	Promedio mínimo	ASTM D5721 ASTM D3895 ASTM D5885	55 % 80 %	Por cada formulación
Resistencia a UV (9) (a) OIT estándar o (b) Presión OIT alta - % retenido después de 1600 horas (11)	Promedio mínimo	ASTM D3895 ASTM D5885	N.R. (10) 50 %	Por cada formulación

(1) De 10 lecturas: 8 de cada 10 deben ser ≥ 0.18 mm y la lectura individual más baja debe ser ≥ 0.13 mm.

(2) Alternar el lado de medición para las hojas texturizadas de doble lado.

(3) Los valores promedio de dirección de la máquina (MD) y dirección cruzada de la máquina (XMD) deben ser la base de 5 especímenes de prueba en cada dirección.

La elongación de resistencia se calcula utilizando una longitud de calibración de 33 mm.

La elongación de ruptura se calcula utilizando una longitud de calibración de 50 mm.

(4) La prueba P-NCTL no es apropiada para geomembranas con superficies texturizadas o irregulares. La prueba debe conducirse en las orillas lisas de los rollos texturizados o bien en las hojas lisas hechas de la misma formulación que la que se está utilizando para los materiales de hoja texturizada.

(5) Otros métodos como el D4218 (horno de mufla) o los métodos de microondas son aceptables si se puede establecer una correlación apropiada con el D1603 (horno de tubo).

(6) Dispersión de carbono negro (solamente cerca de aglomerados de esferas) para 10 vistas diferentes. 9 en 1 las categorías 1 o 2 y 1 en la categoría 3.

(7) El fabricante tiene la opción de seleccionar uno de los métodos OIT mencionados para evaluar el contenido de antioxidante en la geomembrana.

(8) También se recomienda evaluar las muestras a 30 - 60 días para compararlos con la respuesta a los 90 días.

(9) La condición de la prueba debe ser de 20 horas. El ciclo de 75°C seguido de 4 horas de condensación a 60°C.

(10) Tampoco se recomienda debido a que la alta temperatura de la prueba OIT estándar produce resultados no realistas para algunos de los antioxidantes en las muestras expuestas de UV.

(11) La resistencia UV se basa en el porcentaje de valor retenido sin importar el valor original HP OIT.

ESPECIFICACIONES DE MATERIAL GEOSINTÉTICO				
COSTURAS EN LA GEOMEMBRANA DE HDPE				
Propiedad	Calificador	Unidad	Valor especificado (1)	Método de prueba
Espesor	Promedio mínimo	mm	1.50	NA
Fuerza de la costura (2)	Mínimo	N/mm	29.4	ASTM D4437*
Adhesión de desprendimiento (3)	Mínimo	N/mm	19.4	ASTM D4437*

(1) a. Todas las pruebas de adhesión de desprendimiento positivas deben mostrar una unión de desgaste de película (FTB, por sus siglas en inglés)

b. Por lo menos cuatro de cinco especímenes de cada determinación de desprendimiento y corte deben cumplir con el valor mínimo especificado.

c. El valor promedio de los 5 especímenes de la determinación de desprendimiento y corte debe cumplir con el mínimo valor especificado.

(2) Por lo menos 95 por ciento de la fuerza tensil de la geomembrana especificada en rendimiento.

(3) Por lo menos 62 por ciento de la fuerza tensil de la geomembrana especificada en rendimiento.

* Para pruebas de corte, la hoja debe rendir antes de que suceda la falla en la costura. Para la adhesión de desprendimiento, la separación entre costuras no debe extenderse más del 10% en el ruedo. Para cualquiera de los casos, se debe descontinuar las pruebas cuando la muestra haya rendido visualmente. La falla de la muestra debe ser conforma a una configuración positiva según se describe en el estándar NSF.

ESPECIFICACIONES DE MATERIAL GEOSINTÉTICO				
GEORED SÓLIDA DE HDPE				
Propiedad	Calificador	Unidad	Valor	Método de prueba
Espesor	Mínimo	mm	5.00	ASTM D5199
Masa por área de unidad	Mínimo	N/m ²	0.77	ASTM D3776
Contenido de polietileno	Mínimo	%	95	---
Densidad	Mínimo	g/cc	0.940	ASTM D1505
Contenido de negro de humo	Rango	%	2.0 a 3.0	ASTM D1603 o ASTM D4218
Índice de fluidez	Mínimo	g/10 min	1.0	ASTM D1238 (Condición 190/216)
Fuerza tensil (dirección de la máquina)	Mínimo	N/mm	7	ASTM D1682* o ASTM D5035
Transmisividad	Mínimo	m ² /seg	1 x 10 ⁻³	ASTM D4716**

* Método de prueba modificado según los siguientes aspectos:

- 1) Utilizar especímenes de 10 cm x 20 cm
- 2) Utilizar una separación de 10 cm.
- 3) Utilizar una velocidad de pruebas de 20 cm/min.
- 4) Continuar la prueba hasta que la primera fila se separe completamente
- 5) Reportar promedios de 5 pruebas en dirección de la máquina.

** Gradiente = 1.0; presión de confinamiento = 723 kN/m² (geored sólida), 193 kN/m² (geored con foam) medida entre dos platos de acero una hora después de la aplicación de presión de confinamiento.

APÉNDICE D

Formulario a completar para pozo de monitoreo

Nombre del sitio: _____

Ubicación: _____

ID del pozo de monitoreo No.: _____

Fecha de instalación del pozo de monitoreo: _____

Fecha de desarrollo del pozo de monitoreo: _____

Latitud _____

Longitud _____

Pozo de monitoreo

Perforador: _____ Nombre: _____

NOTAS:

- Reportar todas las profundidades de la superficie y todas elevaciones con relación al nivel del mar medio (msl) hacia el ciento más cercano de un metro.
- El diámetro de las perforaciones debe ser por lo menos de 0.1 metro más grande que el diámetro del recubrimiento del pozo.
- Utilice solamente uniones enroscables de 5 cm de diámetro o más con anillos en o bien cinta PTFE en las uniones.
- El desarrollo de pozos debe continuar hasta que el agua esté clara y el pH y la conductividad sean estables.

Miembro del personal que supervisa la instalación:

Nivel de agua estático después del desarrollo del pozo: _____

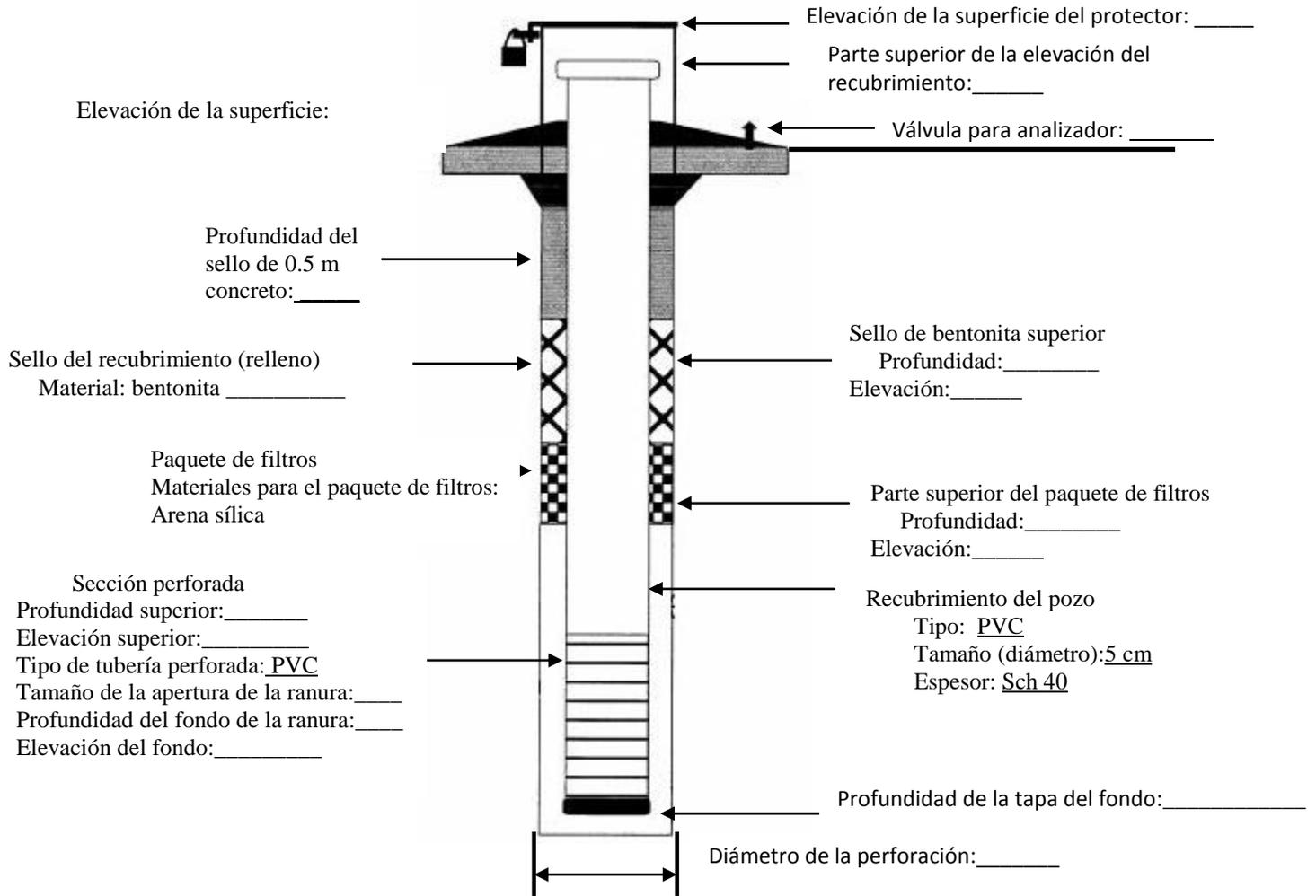
Nombre de las formaciones geológicas en las que se completa el pozo: _____

Tipo de dispositivo para aseguramiento: _____

Tipo de protección: _____

Plancha de concreto en la superficie (con refuerzo de acero)

Dimensiones: _____



Formulario para la finalización de la sonda de monitoreo de biogás

Nombre del sitio: _____

Ubicación: _____

ID de la sonda de monitoreo de gas No.: _____

Fecha de instalación de la sonda de monitoreo: _____

Latitud _____

Longitud _____

Sonda de monitoreo

Perforador _____ Nombre: _____

NOTAS:

- Reportar todas las profundidades de la superficie y todas elevaciones con relación al nivel del mar medio (msl) hacia el ciento más cercano de un metro.
- El diámetro de las perforaciones debe ser por lo menos de 0.1 metro más grande que el diámetro del recubrimiento del pozo.
- Utilice solamente uniones enroscables de 5 cm de diámetro o más con anillos en o bien cinta PTFE en las uniones.

Miembro del personal que supervisa la instalación:

Nombre de las formaciones geológicas en las que se completa el pozo: _____

Tipo de dispositivo para aseguramiento: _____

Tipo de protección: _____

Plancha de concreto en la superficie (con refuerzo de acero) Dimensiones:: _____

APÉNDICE E

LEGISLACIÓN APLICABLE PARA DESECHOS SÓLIDOS

Costa Rica

Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, Normativa de Desechos Sólidos:

http://www.minae.go.cr/acerca/info_general/marco_juridico.html

Este enlace solamente enumera las normativa pero no proporciona su texto.

El principal regulador de desechos sólidos es:

Decreto No. 27001-MINAE, Reglamento para el Manejo de Desechos Sólidos .Gaceta 101, del 27 de mayo de 1998,

Ley ampliada sobre el manejo de desechos sólidos, ley No. 8839 (Oct., 2010) del Ministerio de Salud:

http://www.minaet.go.cr/Ley8839/minsalud_ley2%20con%20ajustes%2010_10.pdf

Reglamento de Rellenos Sanitarios

<http://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/normativas-rellenos-sanitarios-ms>

El Salvador

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales:

http://www.marn.gob.sv/index.php?option=com_content&view=article&id=144:legislacion-y-reglamentos&catid=98:desechos-solidos-y-materiales-peligrosos&id=171

Guatemala

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales:

<http://www.marn.gob.gt>

APÉNDICE F
LISTA DE VERIFICACIÓN PARA AUDITORÍAS/INSPECCIONES

LISTA DE VERIFICACIÓN PARA INSPECCIONES Y AUDITORÍAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE NUEVOS RELLENOS SANITARIOS

INSTALACIONES

NOMBRE DE LAS INSTALACIONES: _____

NOMBRE DEL PROPIETARIO / OPERADOR: _____

UBICACIÓN: _____

NOMBRE DEL REPRESENTANTE DEL DUEÑO / OPERADOR: _____

NÚMERO DE CONTACTO: _____

LISTA DE VERIFICACIÓN PARA AUDITORÍAS/INSPECCIONES

FECHA DE LA AUDITORÍA / INSPECCIÓN: _____

NOMBRE DEL INSPECTOR: _____

FECHA DE LA ÚLTIMA INSPECCIÓN: _____

CONDICIONES DEL CLIMA: _____

NO.	DESCRIPCIÓN	COPMPLETADO SÍ / NO / No aplica	FECHA DE FIN	COMENTARIOS
1	Construcción del relleno			
1.1	Construcción del recubrimiento del suelo			
1.2	Construcción del recubrimiento de la geomembrana.			
1.3	Construcción de la capa para la recolección de lixiviados.			
1.4	Recubrimiento construido por debajo de nivel freático estacional máximo.			
1.5	Documentación e informes sobre la construcción del recubrimiento			
1.6	Construcción de pozos para el monitoreo de aguas subterráneas			
1.7	Construcción de sonda para el monitoreo de biogás			
2	Recubrimiento del suelo			
2.1	La construcción del recubrimiento del suelo cuenta con un monitoreo a tiempo completo de la construcción en aspectos de aseguramiento de calidad y control de calidad.			
2.2	Uniones del recubrimiento a celda de desechos recubierta ya existente			
2.3	Pruebas a los materiales del suelo previo a la construcción			

NO.	DESCRIPCIÓN	COPMPLETADO SÍ / NO / No aplica	FECHA DE FIN	COMENTARIOS
2.4	El suelo cumple con las especificaciones de los materiales del recubrimiento			
2.5	Equipo de compactación y esfuerzo adecuados			
2.6	Recubrimiento del suelo hidratado			
2.7	Tamaño máximo de terrones y rocas 25 mm			
2.8	Controles para el drenaje de la superficie presentes para evitar que el agua de la superficie entre al área del recubrimiento.			
2.9	No hay agua estancada en el recubrimiento del suelo.			
2.10	El recubrimiento del suelo mantuvo la humedad antes de la colocación de la geomembrana para reducir el agrietamiento por rajaduras.			
2.11	Pruebas en cuanto a la densidad del campo y el contenido de humedad.			
2.12	Pruebas de laboratorio del suelo de la construcción incluyendo análisis granulométrico, límites de Atterberg y coeficiente de permeabilidad.			
2.13	El evaluador realiza verificación del espesor de 60 cm del recubrimiento del suelo			
2.14	Otro recubrimiento del suelo.			
3	Recubrimiento de la geomembrana			
3.1	La construcción del recubrimiento de la geomembrana cuenta con un monitoreo a tiempo completo de la construcción en aspectos de aseguramiento de calidad y control de calidad.			
3.2	recubrimiento de membrana flexible de polietileno de alta densidad de 0.152 mm (60 mil)			
3.3	Geomembrana fabricada adecuadamente, embarcada, enviada y almacenada para proteger el material en caso de daños.			
3.4	La subrasante se compacta y se apisona hasta quedar liso y libre de piedras filosas, o bien piedras mayores de 1 cm en tamaño; se elimina también palos y otros materiales.			
3.5	Se despliega la geomembrana para no dañar la subrasante.			
3.6	Los únicos vehículos que se pueden permitir sobre la geomembrana son			

NO.	DESCRIPCIÓN	COPMPLETADO SÍ / NO / No aplica	FECHA DE FIN	COMENTARIOS
	los vehículos de presión baja sobre el suelo (p.ej. carritos de golf, vehículos todo terreno o bien equipo pequeño con llantas de hule y un una presión sobre el suelo inferior a 35 kPa y un peso total de menos de 340 kg).			
3.7	Todas las selladuras fueron soldadas por puntos por fusión o soldadas por extrusión.			
3.8	Se verifica la presión de aire en todas las soldaduras por puntos de fusión.			
3.9	Se realiza la prueba de caja de vacío en todas las soldaduras de extrusión.			
3.10	No selladuras arriba de 40° C o por debajo de 1° C a temperatura ambiente en el aire			
3.11	Control de dobleces, arrugas grandes y bocas de pez.			
3.12	Al final del día laboral, se deben anclar todas las orillas no selladas.			
3.13	Pruebas apropiadas de los materiales de la geomembrana.			
3.14	Pruebas destructivas en las selladuras.			
3.15	Construcción y rellenado de zanja de anclaje.			
3.16	Se coloca una cubierta protectora o una capa de drenaje sobre la geomembrana para controlar los tramos y minimizar las arrugas y dobleces en la geomembrana.			
3.17	Un mínimo de 60 cm de cubierta protectora y/o capa de drenajes granular			
3.18	Control de rocas mayores de 1 cm, vegetación u otros materiales que pudieran dañar la geomembrana.			
3.19	Otro recubrimiento de la geomembrana.			
4	Sistema de recolección de lixiviados			
4.1	La construcción del sistema de recolección de lixiviados cuenta con un monitoreo a tiempo completo de la construcción en aspectos de aseguramiento de calidad y control de calidad.			
4.2	Capa de drenaje granular, capa de recolección de lixiviados de geocompuesto o geored y geotextil.			
4.3	El material cumple con las especificaciones de la capa de drenaje			

NO.	DESCRIPCIÓN	COPMPLETADO SÍ / NO / No aplica	FECHA DE FIN	COMENTARIOS
4.4	Lugar de los materiales y desplazamiento adecuados.			
4.5	Tubería de recolección de lixiviados			
4.6	Colectores de lixiviados.			
4.7	Sistema para el manejo de lixiviados.			
4.8	Otro sistema de recolección de lixiviados.			
5	Recubrimientos construidos por debajo del nivel freático estacional más alto			
5.1	El sistema de decantación y/o la construcción de balastro cuenta con un monitoreo a tiempo completo de la construcción en aspectos de aseguramiento y control de calidad.			
5.2	Sistema de decantación construido y en funcionamiento			
5.3	Otros deshidratadores y balastros.			
6	Documentación e informes sobre la construcción del recubrimiento			
6.1	Reporte de evaluación de recubrimiento			
6.2	Reporte de evaluación de balastro.			
6.3	Documentación e informes sobre la construcción del recubrimiento.			
7	Pozo para el monitoreo de aguas subterráneas			
7.1	Recubrimiento protector de metal.			
7.2	Plancha de concreto			
7.3	Área alrededor del pozo de aguas subterráneas y plancha de concreto libre de escombros.			
7.4	Recubrimiento protector cerrado.			
7.5	El pozo de monitoreo tiene una tapa removible.			
7.6	Se evaluó la latitud, longitud y las elevaciones del pozo de monitoreo.			
7.7	Otro pozo para el monitoreo de aguas subterráneas.			
8	Sonda para el monitoreo de biogás			
8.1	Recubrimiento protector de metal.			
8.2	Plancha de concreto			
8.3	Área alrededor de la sonda de monitoreo de gas y plancha de concreto libre de escombros.			
8.4	Recubrimiento protector cerrado.			
8.5	La sonda para el monitoreo de gas tiene una tapa removible con una conexión rápida.			

